

博士学位論文

水中 3 次元測定器の基礎研究

Fundamental Study on Underwater Coordinate Measuring Machine

国立大学法人 東京農工大学大学院

工学府 機械システム工学専攻

下野 宗司

Soji Shimono

平成 31 年 3 月

Abstract

This paper reports the fundamental study on a novel underwater positioning system using multi-joint serial link. The proposed positioning system consists of an underwater robot and multi-joint serial link. The link is connected between the underwater robot and base point positioned on the water surface. The position of the robot from the base point is obtained by kinematics of the serial link.

Firstly, the mechanism of the serial link for the proposed system is explained. The functions of the serial link for the proposed system are defined and component technology for underwater equipment is explained. Then the structure of the serial link is designed based on the above discussion. The position error due to the joint angle measurement error is calculated. The result shows the proposed system performs better accuracy at the shallower depth than deeper depth. Then the experimental model of the serial link which has five joints is introduced.

Then the evaluation of the position accuracy, and its improvement using an artificial neural network is described. The kinematics of the experimental model is constructed based on DH notation. Its calibration and evaluation of positioning accuracy are conducted with an experiment that measures known positions. The experiment was conducted both underwater and in the air; the position accuracy of the underwater experiment is better than the experiment in the air. To improve position accuracy, an error compensation method based on an artificial neural network is constructed. The network model is trained by joint angle information and position error of the kinematics, and it reduces 51.0% of the position error of the kinematics.

Next, the effect of water pressure and water current for the proposed system when it is deployed in the actual environment is discussed. The position error due to the strain of the link receiving water pressure is calculated, and the result shows the effect of the strain is slight. Then the influence of drag force affecting the link due to the water current is discussed. The required torque for the joint actuator when the serial link actuates in the water currents is evaluated. In addition, the required thrust force for the underwater robot when the serial link is a passive joint is also evaluated.

The results of this study indicate that the proposed system is good for shallow and low water current conditions. Moreover, the system can perform stable measurements near complicated structures. Thus, it is considered that the proposed system is suitable for underwater positioning at underwater structures such as dams, water tanks, or harbors.

目次

第 1 章 緒言	1-13
1.1 研究背景	1
1.1.1 水中ロボット	1
1.1.2 水中測位装置	4
1.2 研究目的	11
1.3 論文構成	13
第 2 章 水中 3 次元測定器の設計	15-26
2.1 水中 3 次元測定器の設計要件	15
2.2 耐水圧性	16
2.2.1 耐圧構造をとるリンク寸法の検討	18
2.3 防水性	20
2.4 水中 3 次元測定器リンク機構の構成	22
2.5 関節角度計測分解能による誤差	23
2.6 まとめ	26
第 3 章 試作機の開発	27-35
3.1 試作機の概要	27
3.2 機構	29
3.3 電装部	33
3.4 陸上機器	34
3.5 まとめ	35
第 4 章 水中 3 次元測定器の精度評価	36-65
4.1 運動学	36
4.2 運動学のキャリブレーション	38
4.2.1 キャリブレーション手法	38

4.2.2	実験方法	41
4.2.3	実験結果とキャリブレーション後の精度	44
4.3	ニューラルネットワークを用いた誤差補正	54
4.3.1	ニューラルネットワーク	54
4.3.2	誤差補正手法	55
4.3.3	補正結果	59
4.3.3	隠れ層の構成と誤差推定性能	62
4.3.4	学習データ数と誤差推定性能	64
4.4	まとめ	65

第5章 水中環境の影響の考察 67-78

5.1	水圧による影響	67
5.2	流れによる影響	69
5.2.1	水中環境の流れ	69
5.2.2	能動駆動の場合	69
5.2.3	受動関節の場合	74
5.3	まとめ	78

第6章 結言 79-82

6.1	各章のまとめと結言	79
6.2	今後の展望	82

参考文献 83-88

謝辞 89

第1章 緒言

1.1 研究背景

1.1.1 水中ロボット

海洋をはじめとする水中環境は人間には過酷な環境であり、踏み入るためには相応の技術が不可欠である。このために海洋はいまだ未知な事柄が多く、調査実施のための技術開発と科学が両輪となり研究活動が行われている。また近年では海底にレアメタル、メタンハイドレートをはじめとする資源の存在がわかってきており、これらを探査し採掘するための技術開発が盛んにおこなわれている^[1]。陸水においても、湖沼の環境調査^[2]や水中の遺構調査^{[3],[4]}、ダムをはじめとする社会インフラの点検^{[5],[6]}など、水中環境へのニーズが存在している。

こうした水中環境にアプローチするための技術として水中ロボット^[7]がある。水中ロボットは推進装置をもち自航可能な水中移動体であり、作業内容に応じてカメラ、ソナーといったセンサや生物や岩石、海水のサンプリング装置を搭載して水中作業を実施する。

水中ロボットは大きく遠隔操縦型、自律航行型に分けられる。遠隔操縦型はロボットが通信および電力供給用のケーブルで水面上からつながれた形式で、陸上もしくは船上のオペレータが遠隔操縦を行う（図 1.1）。この形式は一般に **Remotely Operated Vehicle (ROV)** と呼ばれ、最も古くから利用されている。用途は深海探査から外洋の石油プラントの維持管理、貯水槽の点検など様々であり、大型の機種はマニピュレータを備え、大水深での作業が可能である（図 1.1 (a)）。また、小型の機種はカメラ映像の取得に特化したものが多い（図 1.1 (b)）。

自律航行型はエネルギー源、コンピュータ、センサ類を搭載し、あらかじめ設定したタスクを自律的に実行する水中ロボットであり、**Autonomous Underwater Vehicle (AUV)** と呼ばれる（図 1.2）。ケーブルがないためにロボットの行動が妨げられにくく、広範囲を泳ぎ回ることが可能である。また操縦に専門のオペレータを必要としないため、運用者の負担低減になる。自律型には大きく、広範囲を探査する航行型^[8]、特定の海域を精密に調査するホバリング型^[9]に分けられる。航行型は主に海底地形の取得に用いられる。海底に接近して周波数の高いソナーを用いて計測を行うことで、水面の船舶からでは困難な高解像度の地形取得が可能で

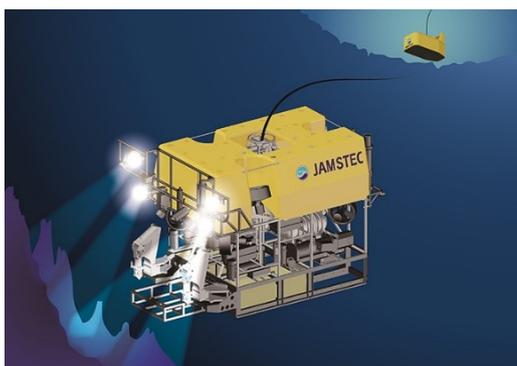
ある^[10] (図 1.2 (a)).

ホバリング型は航行型よりもさらに海底や調査ターゲットへ接近しての精密調査が可能であり, カメラ画像による詳細な海底画像の取得等に成功している^[11]ほか, 人工建造物の自動点検^[12]の研究例がある (図 1.2 (b)).

自律航行型ロボットは研究開発での製作が多かったが, 航行型については実用^[13]に入っており, 市場にも製品として登場している.

また, 近年では小型かつ安価な水中ドローン^[14]と呼ばれるタイプも登場している. 空中にて急速に普及したドローンに関連した技術・部品の採用により従来のロボットよりも大幅なコストダウンが実現されている. このため, 従来コスト面で利用の難しかった分野での活用も期待される. これらの多くはケーブルで遠隔操縦されるが, エネルギー源としてバッテリーを内蔵しているため, 水上設備が簡単ですみ様々な現場に持ち込んで運用することが容易である.

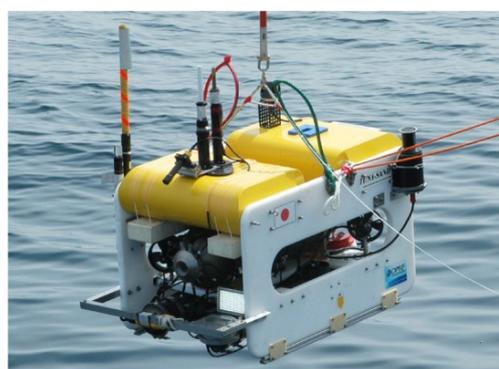
以上ロボットは遠隔操縦型から自律型, さらに低コストとバリエーションを広げている. 水中環境の利用, 調査のニーズは海底資源探査, 水中インフラの点検と高まっており, 人間の活動が困難な環境での作業を実現する水中ロボットの高度化は不可欠である.



(a) “KAIKO Mk-IV”^[15], JAMSTEC

(b) “VideoRay Pro 4”^[16], VideoRay

Fig. 1.1 Remotely operated vehicle



(a) Cruising type AUV
“Urashima”^[17], JAMSTEC

(b) Hovering type AUV
“TUNA-SAND”^[18], Tokyo university

Fig. 1.2 Autonomous underwater vehicle

1.1.2 水中測位装置

水中ロボットにはその運用環境のために、防水性や耐圧力性をはじめとする陸上のロボットとは異なる技術が求められる。この一つとして自己位置把握がある。自律航行を行う AUV では自己位置認識は航行に不可欠であるほか、人間が操縦を行う ROV においても単なる目視による確認だけでなく、人工建造物の継続的な点検といった作業の高度化に伴い作業箇所的位置を正確に知ることの重要度が高まっている。

陸上のロボットでは多くの場合、屋外では Global Navigation Satellite System (GNSS)、また屋内ではカメラ等を用いて自己位置把握を行うことができる。しかしながら水中では、GNSS は衛星からの信号が水で減衰されるため利用できない。また水中では濁りにより視界の見通しが制限され、加えて深い水深では太陽光も減衰することからロボットが備えたライトで照らした範囲しか映像取得ができない。このため多くの水中ロボットは位置把握に音響測位、慣性航法のいずれか、もしくはこれらを複合的に用いている。それぞれ以下に紹介する。

a. 音響測位装置

音響測位装置^[9]は基準座標と計測対象の間で超音波を送受し、音波の到来時間または位相差をもって、双方の相対位置を得る。基準座標の絶対位置を GNSS、電波測位等の方法で得ることで、水中の計測対象の絶対座標を得ることができる。音響測位に用いられる音源の方式には以下の三つが利用されている。

1. ピンガ:一定周期で音波を送波する。この音源を用いた測位システムでは通常、計測対象の方向のみの計測が可能であり、簡易な位置計測に用いられる。精密な時計によりピンガと受波側を時刻同期することで、距離の計測も可能である。
2. トランスポンダ:音波によるトリガ信号をうけて超音波を送波する。受波側との時刻同期が可能のため、音波の到来角度と距離が計測可能である。ケーブルがないためロボットの行動を妨げない。
3. レスポンダ:水中ケーブルからのトリガ信号を受けて超音波を送波する。トランスポンダと同様に受波側との時刻同期が可能のため、音波の到来角度と距離を計測することができる。音波の往復がないためにトランスポンダに対して、

測定レートが速く、精度がよい。
上記音源を持った音響測位装置は形式により LBL, SBL, SSBL に大きく分けられる。

a-1. LBL (Long Base Line)

LBL は海底に設置した三つ以上のトランスポンダを基準座標として、送受波器を備えた計測対象との間で送受する音波の到来時間から各基準座標と計測対象の距離を求め、これをもとに位置を計算する (図 1.3, 1.4)。期線長を長くとることができるため高精度を得やすく、広範囲での計測が可能である。一方で基準座標として海底に設置するトランスポンダの位置を事前に計測するキャリブレーションが必要であり、設営には技術と時間を要する。

a-2. SBL (Short Base Line)

SBL はトランスポンダ、またはレスポンダを海底ではなく船舶等の底部に設置した方法であり、計測原理は LBL と同様である (図 1.5)。トランスポンダは船底に固定されているため一度位置関係が決まれば、LBL で設置ごとに必要となるトランスポンダ座標のキャリブレーションが不要となり運用が簡単である。一方で基線長に制限があるため精度は LBL よりも低い。また基準座標が動揺する船舶に設置されるため、その座標および姿勢を計測して補正を行う。

a-3. SSBL (Super Short Base Line)

USBL (Ultra Short Base Line) とも呼ばれる。受波器を一か所に集め、計測対象の方位を音波の位相差から求める (図 1.6)。距離に関しては LBL, SBL と同様に音波の到来時間より求める。図 1.7 に示すように計測装置がコンパクトなユニットにまとまるため設置場所を選ばず、岸壁やチャーター船からの位置計測も可能である。運用が容易なことから小規模なシステムにも適しており、水中ロボットの位置把握に用いられることが多い。

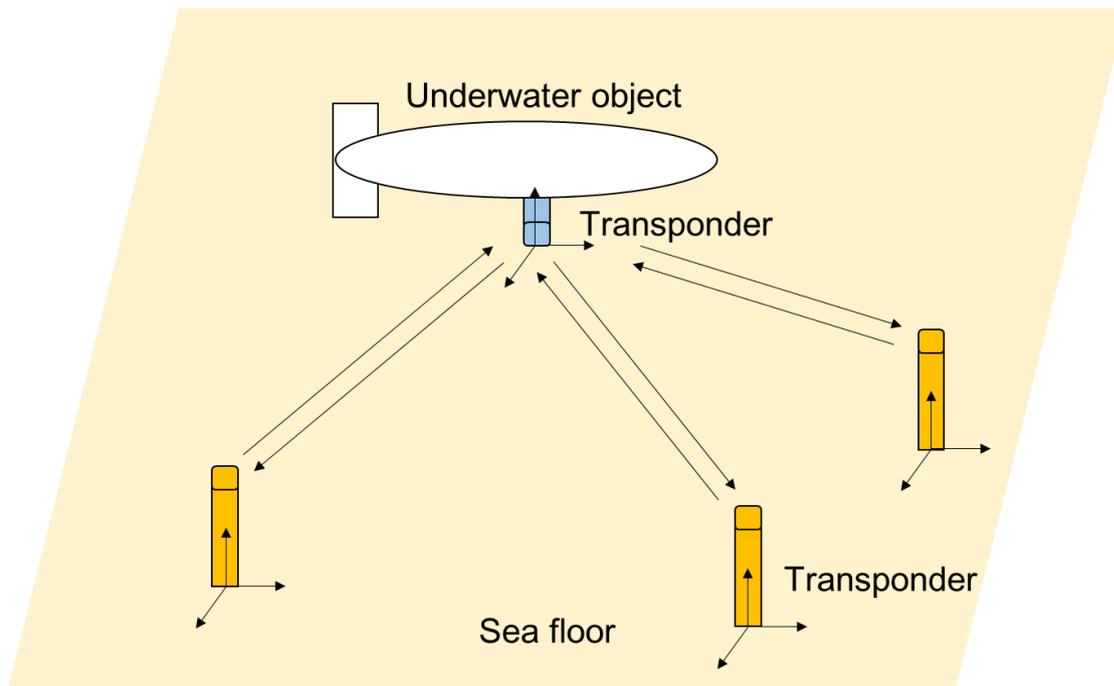


Fig. 1.3 LBL



Fig. 1.4 LBL Transponders^[20]

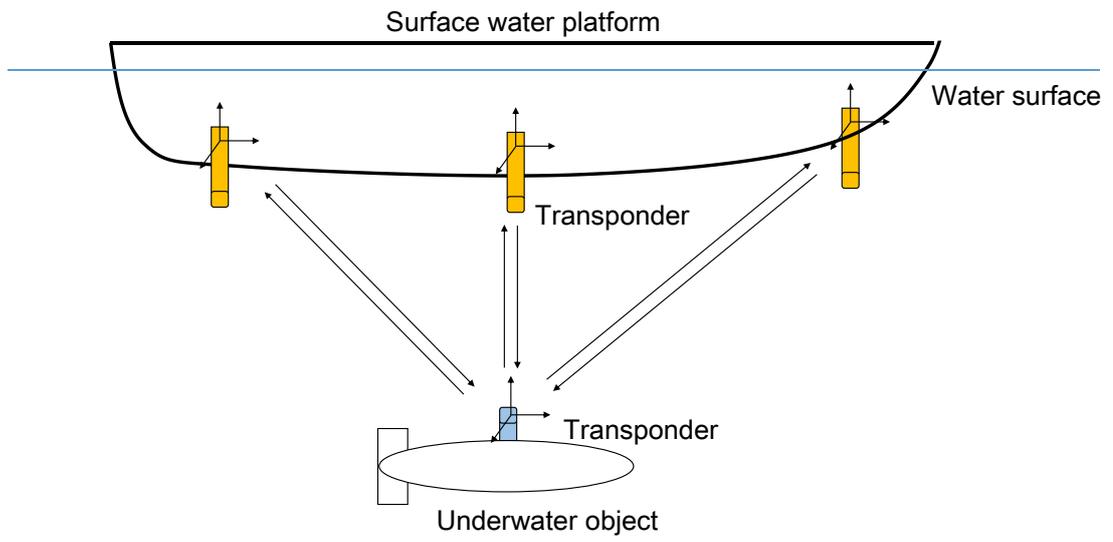


Fig. 1.5 SBL

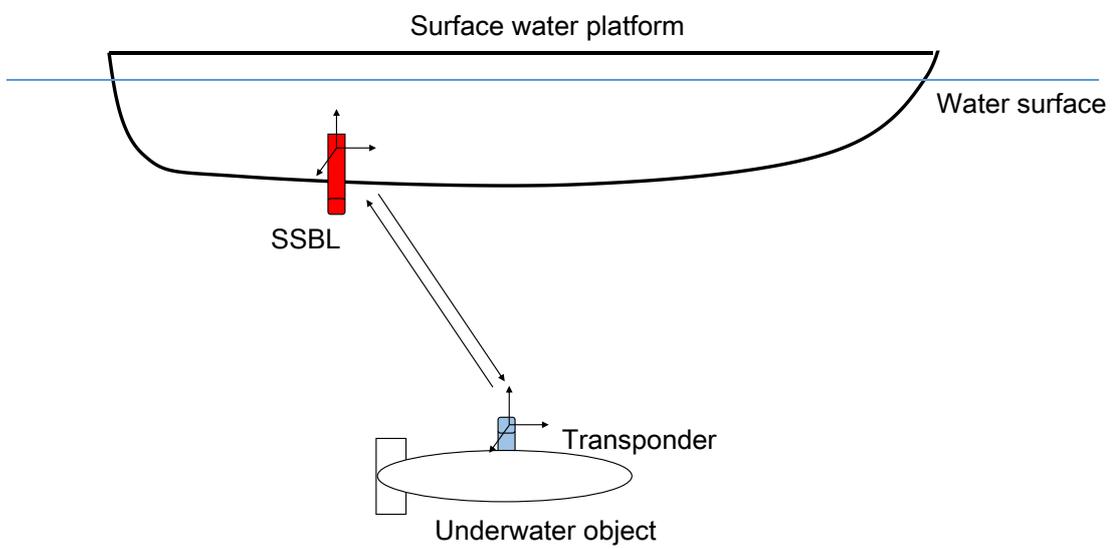


Fig. 1.6 SSBL



Fig. 1.7 SSBL transceiver^[21] (LinkQuest, Inc.)

b. 慣性航法装置

慣性航法装置は加速度計, ジャイロセンサによりロボットの角速度, 加速度を計測しロボットの姿勢角, 位置を計算する装置である. 音響測位に対して高い計測レートが得られる. センサ計測値の積分により位置計算を行うため, 計測値誤差の蓄積による計測位置のドリフト生じるが, これを低減するため高精度なセンサが用いられる. ジャイロセンサとしてはリングレーザジャイロ, 光ファイバジャイロが用いられている. 海洋研究開発機構 (JAMSTEC) にて開発されたリングレーザジャイロを搭載した慣性航法装置を図 1.8 に示す. 時間による位置ドリフトを低減する手法としては, Doppler Velocity Log (DVL) と呼ばれる, 基準 (海底が多い) に送波した音波の反射波のドップラ効果による周波数シフトから基準との相対速度を得る速度計により慣性航法装置の速度誤差を補正する方法がある.



Fig. 1.8 Inertial navigation system^[22] (JAMSTEC)

c. 音響測位装置と慣性航法装置の複合システム

以上述べたように、慣性航法装置は本質的に位置ドリフトが避けられず、長時間の運用では誤差が無視できない。一方、音響測位装置では、位置の計測周期が音波の伝搬時間で制限される。入り組んだ場所や構造物の近くでは音波のマルチパスや遮断により誤った計測結果を得ることがある^[23]。また港湾等水中での騒音が大きい場所でもやはり計測誤差が大きくなるといったデメリットをもつ。このため実運用においては両者を複合的に用いて、デメリットを補完する手法も取られる。音響測位装置による測位情報で慣性航法装置のドリフトを補正できる。また音響測位装置の計測周期の間の位置情報は慣性航法装置によって得られ、計測エラーが生じた際でも短時間なら慣性航法装置のドリフトも問題とならないため位置情報が途切れなく得られる。しかしながら、位置把握システムを構成するセンサが多くなるため高額になりシステムの規模が大きくなり、開発や運用の規模が大きなロボットでないと採用は難しい。

このように、音響および慣性航法による位置把握手法は広く利用されているものの、多様化の進む水中ロボットの利用状況をカバーするには課題がある。

d. そのほかの位置把握手法

音響や慣性航法とは異なるアプローチとして、KCF Technologies の SmartTether^[24]がある。これは図 1.9 に示すように ROV のテザーケーブルに一定間隔でセンサユニットを配し、ケーブル形状を推定して ROV の位置を得るシステムである。センサユニットは加速度計、水圧計、ジャイロセンサ、地磁気センサを備え、ケーブルの既知の箇所の姿勢、深さ情報を得る。これをもとに水中ケーブルの形状が計算される。これは船底の点検時の位置計測を目的として開発されている。内界センサのみで計算されるため、騒音の大きい港湾でも利用可能である。また、考古学研究において入口の狭い水路における ROV 調査の位置把握手法としての利用例がある^[4]。計測精度は 1.5m 以下と示されているが、運用時の構成に依存するとされている^[25]。位置計測を柔軟な水中ケーブルの形状推定で行っていることから、流れや障害物等の外乱を受けた場合には推定誤差が大きくなりやすいと考えられる。

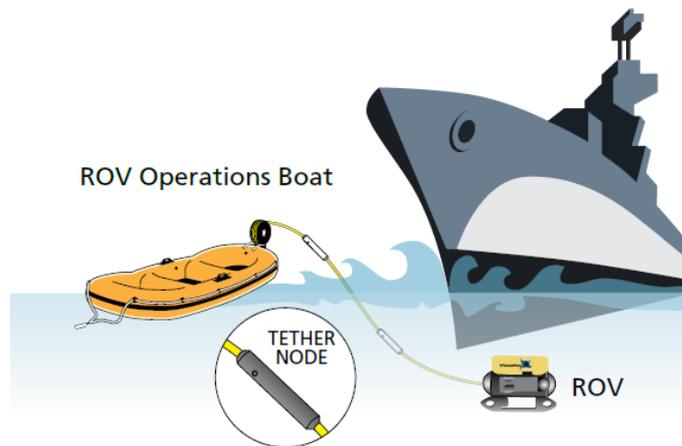


Fig. 1.9 KCF Technologies “SMART TETHER”^[26]

1.2 研究目的

1.1 節では現状の水中測位装置について紹介したのち、それぞれの課題として、音響測位装置では、障害物付近では計測ミスが生じることがある、慣性航法装置では、位置ドリフトが避けられない、水中ケーブルを用いた手法では、柔軟なケーブルの形状推定誤差により高精度の計測が難しいと考えられる事を述べた。

以上を踏まえ、本研究では多関節の直列リンク機構を用いた新しい水中位置把握手法を提案する。提案システムの概念図を図 1.10 に示す。水面上の基準点より水中に挿入される多関節リンクは水中ロボットへと接続される。基準点の座標および姿勢は他の手法と同様に GNSS, 姿勢センサを用いて計測可能である。基準点からロボットまでの相対位置は、リンク自身で計測される関節角度と、リンクの運動学から求めることができる。これによりロボットを絶対位置が得られる。この位置計測方法は前述した既存の測位手法に対して以下のメリットが考えられる。

1. 位置ドリフトが発生しない。
2. 関節角度情報と機構のパラメータから位置計算が可能であるため、音響測位で見られる入り組んだ場所や構造物付近での位置計測エラーが生じない。
3. 形状変化が水中ケーブルに比べて少ないリンク機構を用いるため、高精度な計測が期待できる。陸上における多関節リンク機構による位置計測を行うものとして図 1.11 に示す三次元測定器があり、高精度な物体の形状計測装置として実用化されている。

提案手法の水中位置把握手法としての実用性を評価するためには、到達可能な位置把握精度、運用可能な環境条件（水深、水の流れ）の把握が必要であり、本研究ではこれらの考察のため基礎研究を行う。

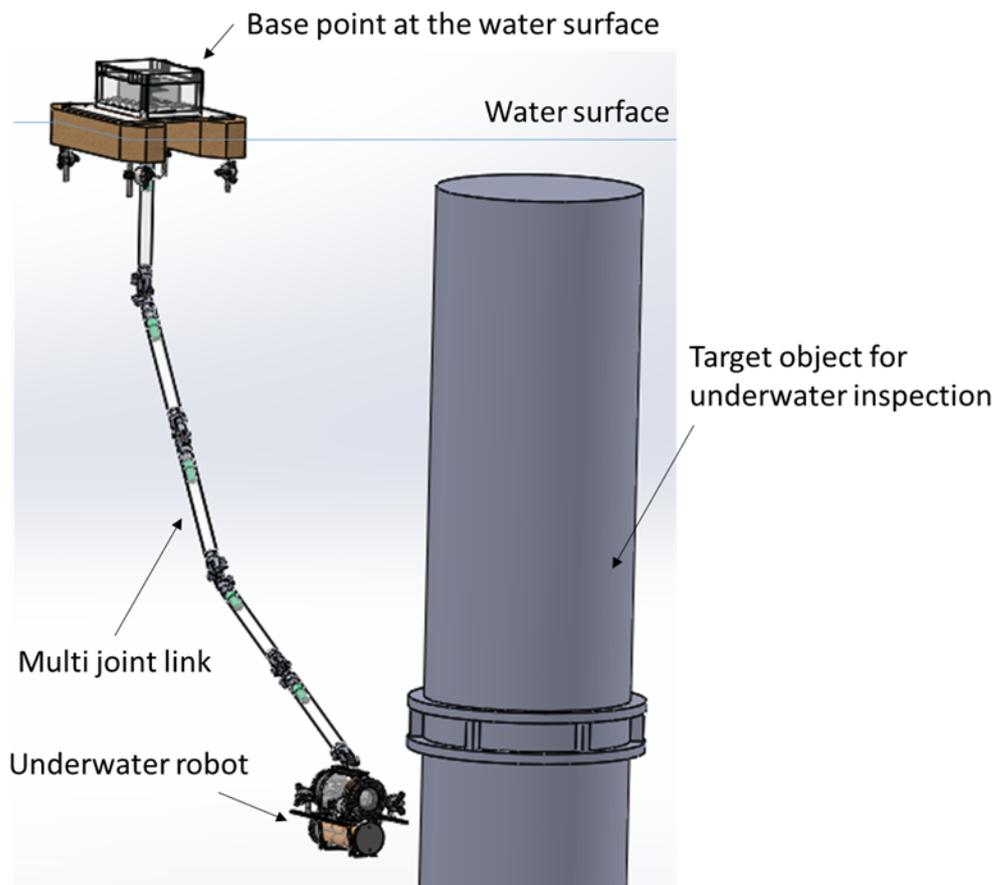


Fig. 1.10 Concept of underwater coordinate measuring machine



Fig. 1.11 Coordinate measuring machine^[27] (FARO Technologies, Inc.)

1.3 論文構成

第1章では水中ロボットについて概要とその種類について解説した。そして、水中ロボットにおける重要技術の一つである水中位置把握手法について、現在主に用いられている音響測位装置、慣性航法装置およびそのほか手法について紹介し、それぞれの課題を述べた。そして、これら課題を踏まえた新しい水中位置把握手法として、多関節リンク機構を用いた水中3次元測定器を提案した。

第2章では提案手法の多関節リンク機構の設計に関して報告する。水中環境で要求される防水構造、耐圧構造について述べたのち、これを踏まえた多関節リンク機構の基本構成を解説する。続いて、関節角度の計測分解能から生じる位置計測誤差を計算し、SSBLの精度との比較を行った。

第3章では提案手法の評価実験のために製作した5関節を持つ試作機について解説する。

第4章では第3章で報告した試作機に関してDH記法にもとづく運動学を構築した。そして、運動学モデルパラメータの実機との差を修正するキャリブレーション手法について述べる。そして、陸上および水中での位置計測実験によりキャリブレーションを実施し試作機の計測精度の評価を行った。

加えて、キャリブレーション後の計測誤差をさらに低減するため、ニューラルネットワークを用いた機械学習で試作機の計測誤差推定器を構築した。構築したネットワークはキャリブレーションと同様に試作機の水中計測データにより学習を行った。学習後の誤差補正モデルによる修正後の位置計測精度について述べる。

第5章では提案手法を実際に海洋や水深のある場所で運用した際に想定される水圧、流れの影響を考察する。水圧の影響に関しては高い水圧がリンクに加わった場合のひずみによる計測誤差について考察した。流れに関しては流れからリンクが受ける抗力を求め、関節を能動的に駆動する際に必要となるトルク、及びこれに耐えるリンク構造を検討した。またリンクを受動的とした際に求められる水中ロボットの推進力について検討を行った。これらについて述べる。

第1章 緒言

第6章では各章の研究成果についてまとめ、今後の展望について述べる.

第2章 水中3次元測定器の設計

2.1 水中3次元測定器の設計要件

水中3次元測定器の多関節リンク機構に求められる設計要件を整理する。

まず、第1章で述べたように水中3次元測定器では、多関節リンク機構の関節角度情報と機構の運動学より、リンク手先に接続される水中ロボットの位置が計算される。このため、各関節における角度計測機能、および計測した角度情報を水中ロボットまたは陸上装置に伝達する通信機能が不可欠である。また、本装置は水中環境で使用するため、水深に伴って増加する水圧が構造に加わる。これに耐える構造であるとともに、水圧により浸水が生じ機能が損なわれない防水性能が求められる。関節の形式としては、ロボットの移動に合わせて受動的に可動するものと、能動的に駆動し状況に合わせてリンク姿勢を制御する方式が考えられる。本研究では、後者も想定し検討を行っていく。

続いて水中ロボットの運用時の状況に目を向けると、その条件は目的によって様々であり、水中3次元測定器のリンク機構に求められる長さも、調査対象の水深、水上の起点からの距離に依存する。このため、リンク機構はROVにおける水中ケーブルと同様に十分な長さを持つものをリール状に畳んでおき、適宜繰り出していくか、現場ごとに適当な長さを持つリンク機構を適用することが考えられる。状況に応じてリンク長を調節するためには、1リンクごとに機能をモジュール化したユニットとし、これを必要な長さに合わせて適宜接続する方法が考えられる。この形式は各リンクでの基本構造を同一とすることができるため、設計・製造コストの低減にもつながる。

以上のように水中3次元測定器における多関節リンク機構は、

- 関節角度計測機能
- 通信機能
- 関節駆動機能
- 耐水圧・防水機能

を有するモジュール化されたリンクユニットを複数接続した超冗長な多関節直列リンク機構とする。

2.2 耐水圧性

水中ロボットにおける耐水圧手法と水中3次元測定器で採用する手法について解説する。水中における物体は水の重さによる圧力をうけ、水中で運用される装置はこの圧力下でも支障なく動作する耐水圧性能が求められる。水中で物体に働く圧力 P [N/m²] は以下の通りである。

$$P = \rho g h \quad (2.1)$$

ρ は流体の密度， g は重力加速度， h は物体が位置する水深である。

水中ロボットに用いられる機器は陸上の機器と同様な電子部品などが使用される。これらの多くは直接水に暴露できないため、耐水圧性と防水性を備えた容器に格納され水から隔離され使用される。水圧に耐える手法としては、現在は大きく二つの手法が利用されている^[28]。一つは想定される水圧に耐えるよう設計された耐圧容器^[29]を用い、外圧をうけても陸上と同じ一気圧に保たれる容器内部に必要な機材を格納する方法である（図 2.1）。陸上の機器をそのまま利用することができることから部品選択の自由度が高い方法である。もう一方は機器を格納する容器の内部を絶縁性の油で満たし、容器の内圧も外界と同じとする均圧容器^[30]を用いる方法である（図 2.2）。容器の内外で圧力差が生じないため、水圧による応力に耐える堅牢な容器は不要となり、軽量化に作ることができる。このため大深度の水中機器では、高い圧力に耐えるよう頑丈に設計された耐圧容器による重量の増加を避けるため、軽量化が可能な均圧手法が用いられることが多い。しかしながら、容器に収納される機器は外圧と同じ圧力にさらされるため、高圧化でも特性変化がないものに限られる。

水中3次元測定器の多関節リンク機構においては、水およびその圧力からの保護が必要な機器には関節角度を計測するセンサ、および通信を行うマイコンが考えられる。これらはそれぞれ、関節部に設ける容器、及び中空構造としたリンク内部に格納する事を考える。また、耐水圧の手法としては、モジュール化したユニットを適直接続する構成上ユニットの接続と切離時における油の管理は煩雑であると思われるため、本研究ではリンクモジュールは耐圧構造を採用することを考える。

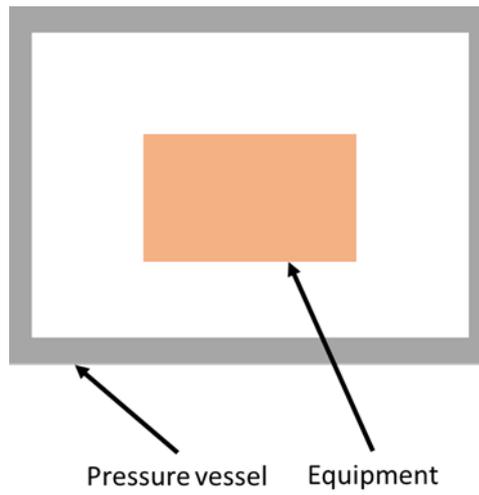


Fig. 2.1 Pressure vessel

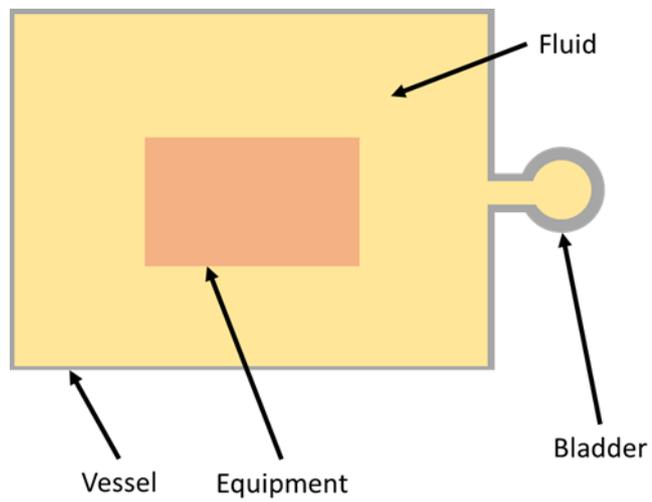


Fig. 2.2 Fluid filled pressure compensated system

2.2.1 耐圧構造をとるリンク寸法の検討

耐圧構造をとるリンクは水圧に耐える肉厚が必要となる。一方でリンク径が大きくなると水の抵抗よる力を受け、ロボットの運動の妨げとなる。このため、リンクの外径は流体抵抗を少なくなるよう小さいことが望ましい。ここでは耐圧構造のリンク円筒に必要な外径を検討する。

円筒型耐圧容器の円筒部において、弾性座屈を生じる圧力は次式で得られる^[29]。

$$P_k = E \times \left[\frac{\pi^4}{n^4(n^2 - 1)} \times \left(\frac{r}{l}\right)^4 + \frac{(n^2 - 1)}{12(1 - \nu^2)} \times \left(\frac{t}{r}\right)^2 \right] \times \left(\frac{t}{r}\right) \quad (2.2)$$

P_k : 弾性座屈圧力 [Mpa]

E : ヤング率 [Mpa]

n : 座屈モード数

ν : ポアソン比

t : 円筒肉厚 [m]

r : 円筒平均半径 = 円筒内半径 + $t/2$ [m]

l : 円筒長さ [m]

上式は応力状態が弾性状態であることを仮定しているため、式(2.2)を満たすと同時に、以下に示す三軸応力^[29]から得られる相当応力 σ を基準とし、これが許容応力以下となるリンク寸法を求めた。

$$\text{半径方向応力: } \sigma_r = -P_k \times \frac{\left(k^2 - \frac{k^2}{R^2}\right)}{(k^2 - 1)} \quad (2.3)$$

$$\text{周方向応力 : } \sigma_\theta = -P_k \times \frac{\left(k^2 + \frac{k^2}{R^2}\right)}{(k^2 - 1)} \quad (2.4)$$

$$\text{軸方向応力 : } \sigma_z = -P_k \times \frac{k^2}{(k^2 - 1)} \quad (2.5)$$

$$\text{相当応力 : } \sigma = \sqrt{\frac{(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2}{2}} \quad (2.6)$$

$k = (\text{円筒外半径}) / (\text{円筒内半径})$, $R = (\text{円筒任意半径}) / (\text{円筒内半径})$

水圧を受けるリンクの寸法を検討する。リンク内径を、第3章で述べる試作機の電装機器の格納空間と同様の21mmを確保するとし、リンク外径を調整し耐圧性能を満たすことを考える。安全率を2として、リンク材料には、A6061-T6, SUS304,

Ti-6Al-4V を用いて計算すると、耐圧性の確保に必要なリンクの肉厚および外径は水深ごとに図 2.3 のように得られた。水の密度を $1.03 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 、重力加速度を 9.81m/s^2 、リンク長さを 350mm 、また $R = 1.0$ として計算を行った。計算に用いた材料のパラメータを表 2.1 に示す。SUS304 では水深 800m 付近でグラフは折れ傾きが増加するが、これは肉厚を決定する要因が弾性座屈から相当応力へと移るためである。ほかの材質ではより深い水深でこの折れ点が見られる。図より、A6061-T6、SUS304、及び Ti-6Al-4V でおよそ 1.5mm 以上の肉厚があれば、水深 1000m の圧力に耐えることがわかる。

耐圧容器の設計においては同じ水圧に耐える場合でも、円筒の内径が大きいほど不利であり、必要な肉厚は円筒内径に比例して増加する。このため、円筒内部に格納される電装部品はできるだけ小型化・細長い形状に収め、必要とされるリンク内径を抑えることがリンク構造の小型軽量化につながる。

Table 2.1 Mechanical property of link substance

	A6061-T6	SUS304	Ti-6Al-4V
Young's modulus [Gpa] ^[31]	68.67	193.26	112.82
0.2% proof stress [Mpa] ^[31]	245.3	206.0	824.0
Poisson's ratio	0.33	0.3	0.3

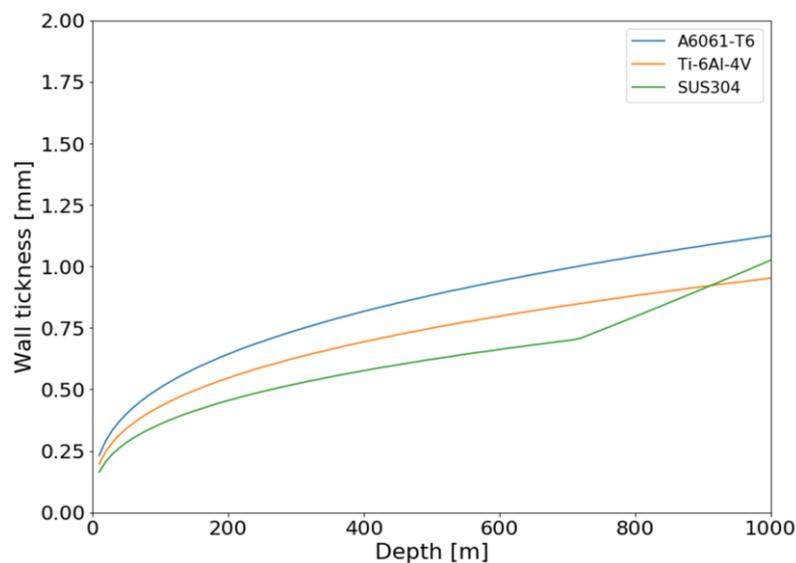


Fig. 2.3 Wall thickness of link

2.3 防水性

水中容器内部への水の浸入は機器の損傷につながるため、適切にシールし防水性を確保する必要がある。特に耐圧容器においては容器内外の圧力差が生じている状態でも気密性を保つ必要がある。水中機器のシールには一般にOリング^[32]が用いられる。これは図2.4の様に容器の接続部に溝を設け、そこにOリングを配置し、接続部の気密性を保つものである。Oリングの材質にはニトリルゴムやシリコンなど柔軟性を持つものが使用される。圧力差が生じた場合にはOリングは溝内で移動と変形をし、接続部の隙間を埋めることで気密性が確保される。高い圧力差ではOリングの変形が過大となり、損傷し気密性が損なわれる恐れがある。このため高圧力下ではバックアップリングを溝の設置しOリングの変形を低減する。

容器の内外で水密性を確保しつつ回転を伝達する場合には、回転軸にシールを設ける方法と、マグネットカップリングを用いる方法がある^[33]。軸シールには、前述のOリングシールのほかに、メカニカルシールが用いられる。軸シールではシールと軸の摺動部からわずかながら浸水が生じるため、適切な使用時間の後のメンテナンスか、浸入した水を排出する機構が必要となる。また、耐圧方式では大深度になるほどシール摺動部に掛かる負荷が増大するため、シール寿命が短くなる。均圧方式では差圧が小さくシールへの負担が小さいため深海用の回転軸シールでは均圧方式が用いられる。マグネットカップリングは磁力により、密閉容器の隔壁越しに回転を伝達する方法である。本方式は容器の内外に貫通軸を持たずシールが必要な摺動部がないため、高信頼の機構となっている。磁力を効率よく伝えるため隔壁はあまり厚くできないため、大深度用ではやはり均圧方式が用いられる。

水中3次元測定器の多関節機構におけるシールが必要な箇所としてはリンクの接続部、関節角度センサの接続される関節軸およびモータ駆動軸が挙げられる。リンク接続部は固定シールであるため、Oリングを用いる。回転軸においては、軸シールを用いる。マグネットカップリングはシールの信頼性の面で利点があるが、本機構においては関節角度の正確な計測が重要である。磁力による回転伝達では入力と出力軸に角度ずれが避けられないため、関節角度センサと関節軸を機構的に接続できる軸シールの方式を用いる。

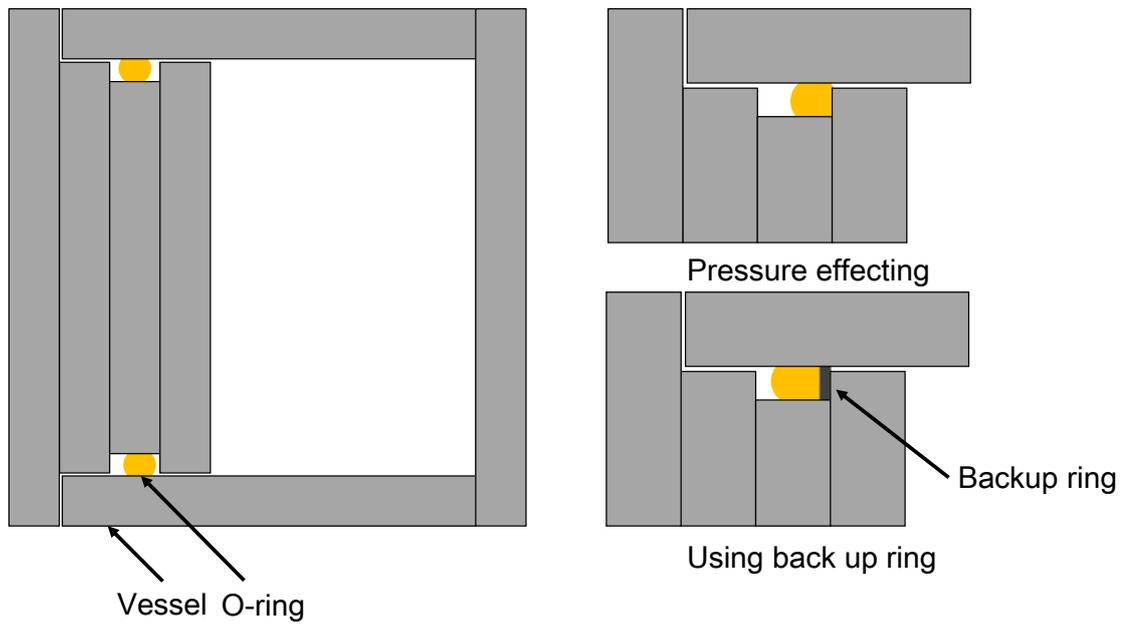


Fig. 2.4 O-ring seal

2.4 水中3次元測定器リンク機構の構成

以上の設計要件から水中3次元測定器のリンクユニットの基本構成を示す。

図2.5にリンクのモジュールを示す。1関節当たりの自由度は1としており、簡易な機構にすることで防水構造とした際のモジュールの大型化を防ぐ。関節軸方向を変えてモジュールを直列に接続していくことで全体として多自由のリンク機構を構成する。

関節角度の計測にはロータリエンコーダを用いる。Oリングシールされた水密容器にエンコーダを配置し、軸シールされた関節軸が接続される。エンコーダの読み取り、ロボット及び陸上機器との通信を行う電装部は中空構造のリンク内部に格納される。リンクの耐圧方式は、取り扱いの容易さから耐圧構造を基本とする。

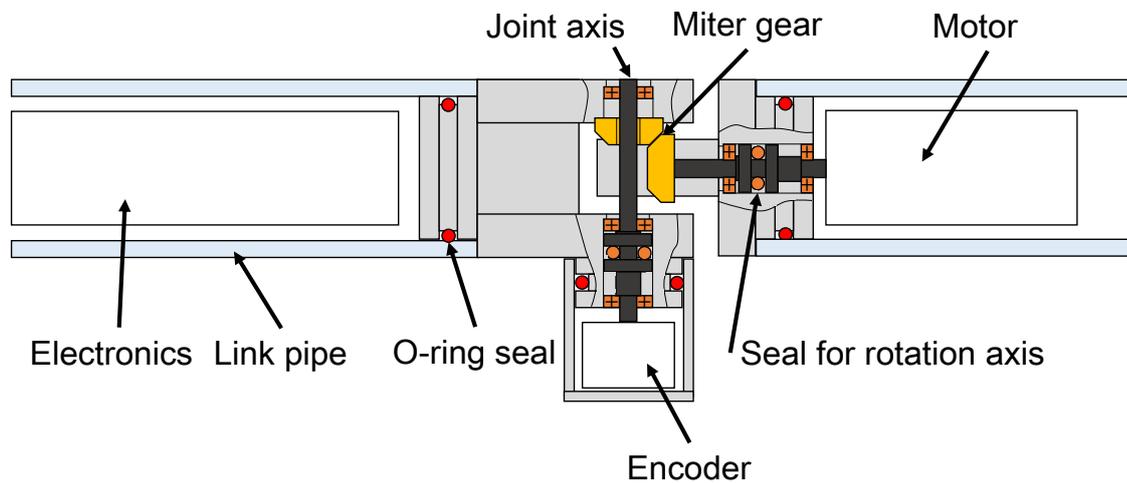


Fig. 2.5 Link unit structure

2.5 関節角度計測分解能による誤差

水中3次元測定器は関節角度情報から手先位置を計算する。運動学パラメータ誤差や外力によるリンクのひずみ等の外乱がない場合においても関節角度の計測分解能により、手先位置の測定精度の上限が決まる。

角度計測に1回転当たり c カウントのエンコーダを用いるとすると、1カウント当たりの角度変化は、

$$2\pi / c \quad (2.7)$$

となり、各カウントが含む最大の計測誤差は、 ± 0.5 カウントであるため、各関節での計測誤差 e [rad] は、

$$e \leq \pi / c \quad (2.8)$$

である。この角度誤差は根元側から手先へと積算されながら伝搬していく。

根元側から n 番目の関節における手先位置は、次式で表される。

$$\mathbf{r}(\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{R}^i \left(\frac{\pi}{2} \right) \cdot \mathbf{R}^k(\theta_1) \cdot \mathbf{l}_1 + \sum_{m=2}^n \left(\mathbf{R}^i \left(\frac{\pi}{2} \right) \cdot \mathbf{R}^k(\theta_1) \cdot \dots \cdot \mathbf{R}^i \left(-\frac{\pi}{2} \times -1^m \right) \cdot \mathbf{R}^k(\theta_m) \right) \cdot \mathbf{l}_m \quad (2.9)$$

$$\mathbf{R}^i(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

$$\mathbf{R}^k(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

ここで \mathbf{R}^i はリンク軸回りの回転行列であり、関節ごとに $\pi/2$ を正負交互に回転するものとした。また \mathbf{R}^k は関節軸回りの回転行列である。また $\mathbf{l}_1 \sim \mathbf{l}_m$ は各リンクの長さで、 $\mathbf{l}_i = (l_i, 0, 0)$ である。 l_i はリンク軸方向の長さを示す。各関節角度を角度ベクトル $\boldsymbol{\theta}$ に代入することで手先位置が得られる。この関節角度ベクトルに計測誤差を含めた時の手先位置の差から、エンコーダ分解能による手先位置誤差を求める。

同じ全長であれば関節数が少なく1つのリンクが長い条件が関節角度誤差の影響が小さいことは自明であるが、実際の運用を考えると長いリンクは不便である。そこで、1リンクの長さを0.35mとし、エンコーダ分解能を1回転当たり262144カウント、65536カウント、16384カウントとした場合の関節角度計測誤差による

位置誤差を求めた。1回転当たり 262144 カウントの分解能は3章で述べる試作機のエンコーダ分解能である。リンク姿勢はすべて $\theta=0$ となる鉛直に下げた状態で考え、関節角度計測誤差としてはすべての関節で最大の 0.5 カウントが生じたものとした。

計算から得られた手先の計測誤差及び比較として SSBL の精度を図 2.7 に示す。ここではリンクを鉛直姿勢として計算したため、リンク全長=水深として示した。音響測位には LBL, SBL, SSBL があるが、LBL, SBL では展開に時間と技術を要する事、専用の船舶が必要なことから運用性に優れる SSBL について考える。市場にある SSBL の精度は計測距離に対する割合もしくは距離精度と方位精度で表されている。精度は製品によるが、計測距離当たりの精度で示すと計測精度は 0.06%~1%ほどである^{[34],[35]}。また精度は環境中の雑音と送受する音波信号の SN 比による影響される。雑音減としては周囲から到来するものとして、波浪、降雨、生物、船舶から発生する雑音があり、また自己雑音としては計測プラットフォームから発生する雑音、SSBL 自身が受ける流れによる雑音が挙げられる。このように音響測位装置の計測精度は環境中の雑音に依存するため図 2.7 では想定誤差として、0.06%~1%の範囲で示している。

図より、水中3次元測定器はリンク全長が長くなる程、誤差増加の割合が大きくなることわかる。一方で音響測位装置は深さに対して一定の割合の誤差を持つため水深が深くなるにつれて不利となるが、浅い深度においては、条件によるが同等以上の精度が期待できる。加えて浅い深度では必要なリンク全長も短くなることからコスト面でのメリットもある。また前述の様に周囲環境の影響を受けないため、安定な計測が可能なメリットがある。以上の様に水中3次元測定器は既存手法に対しては浅深度でメリットがある。また市場にある水中ロボットの対応水深に目を向けると、比較的浅い深度で利用される小型 ROV は概ね 300m 程度に対応している^{[36],[37]}。このため、本論文ではこれを越える水深 500m までの水深での運用を想定した議論を進める。

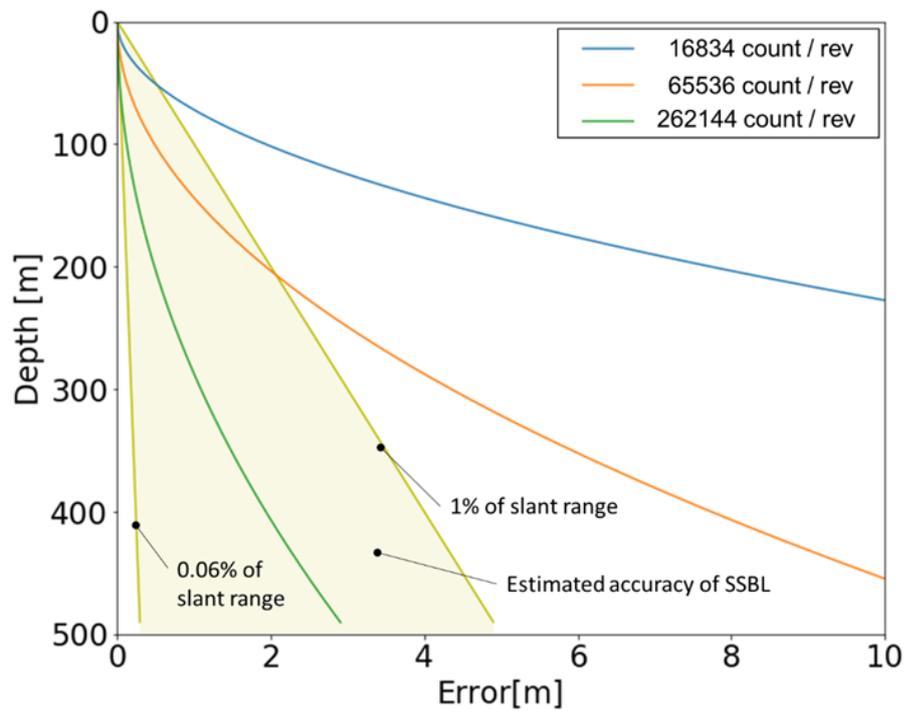


Fig. 2.6 Position error caused by joint angle measurement error

2.6 まとめ

水中3次元測定器の中心となる多関節リンク機構の構造に関する検討を行った。多関節リンク機構に求められる機能として、リンク構造をとること、関節角度の計測、計測情報の通信が挙げられる。加えて水中の機器であることから耐水圧性、防水性を持つことが必要である。これらについて水中機器に通常用いられる要素技術について解説し、多関節リンク機構へ適用した。また、リンクを中空円筒とした際に水圧に耐えるために必要となる肉厚を計算した。

水中3次元測定器の運用環境には様々な水深が想定されるため、リンクの全長はこれに対応する長さに適宜対応する必要がある。このため、リンクを1リンクごとに各機能を備えたユニットを順次接続することとし、1つの関節と、上述の機能を備えたリンクユニットの基本構造を示した。

エンコーダ分解能に起因する水中3次元測定器の計測誤差を計算し、市場にあるSSBLの精度との比較を行った。水中3次元測定器の計測誤差はリンク全長が長く関節数が増加するにつれて誤差増加の割合が増え、SSBLは計測距離に対して一定の割合の誤差が生じる。このため、水中3次元測定器は水深が浅く関節数が少ないほど、精度面では利点があるといえる。

第3章 試作機の開発

提案システムの実験的評価のため、プールにおける使用を想定した多関節リンク機構の試作機を製作した。本章では製作した試作機について詳説する。

3.1 試作機の概要

製作した試作機の外観図および諸元を図 3.1、表 3.1 に示す。図 3.1 では試作機はアルミフレームに取り付けられている。

試作機は全長約 1.9m で 5 関節を持つリンク機構となっている。防水構造をとっており水中での使用が可能である。同一構造のモジュール化されたリンクユニットを数珠つなぎにして多関節リンクを構成している。



Fig. 3.1 Appearance of experimental model

Table 3.1 Specification of experimental model

Length[m]	1.9
Weight in air[kg]	3
Weight in water[kg]	1
Number of joint	5

3.2 機構

図 3.2 にリンクユニットの外観，図 3.3 に機構の断面図を示す．電装部を格納するリンク円筒と関節機構で構成される．プール実験は水深数 m 程度で行われるため，試作機は大きな水圧に耐える必要はない．このためリンク円筒はアクリル樹脂製とし，内部の状態を目視で確認できるようにした．

関節機構は 1 自由度を持ち，関節角度は 1 回転当たり 262144 カウン트의分解能を持つアブソリュート型のロータリエンコーダにより計測される．使用したエンコーダおよびその諸元を図 3.4，表 3.2 に示す．エンコーダは関節軸にカップリングのみを介して取り付けしており，歯車等を介さないことで極力誤差の少ない計測を行える取り付けとしている．リンクの姿勢制御用のモータはリンク内に格納されるように設置している．モータ軸は駆動軸にカップリングで接続され，マイタギアを介して関節軸に動力を伝達する．モータの諸元を表 3.3 に，外観を図 3.5 に示す．

関節軸，駆動軸，エンコーダハウジング，およびリンク円筒と関節機構の接続部は O リングでシールし，リンク円筒内の気密性を保っている．また，リンクを数珠つなぎにするにあたり，電源と通信線の取り回しが必要になるが，これには空気圧配管用のチューブフィッティングとチューブをリンク間に設け，この内部に電線を通した．空気圧配管は本来内圧の掛かる配管の気密性を確保するものであるため，外圧の掛かる状況化では浸水の恐れがある．このため，配管の接続部にはゴム状接着剤を塗布しシールした．



Fig. 3.2 Structure of a link unit

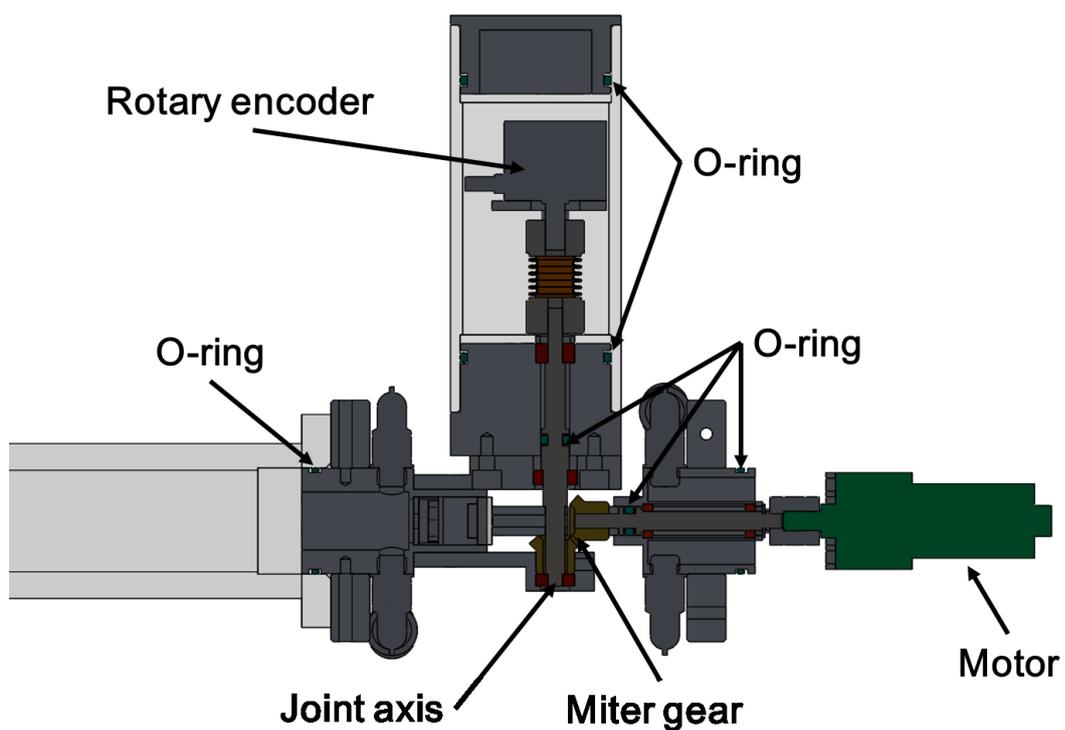


Fig. 3.3 Cross sectional view of joint mechanism

Fig. 3.4 Appearance of rotary encoder^[38]Table 3.2 Specification of rotary encoder^[38]

Manufacturer	Microtech laboratory Inc
Model	MAS-14-262144N1
Resolution	262,144 count / rev
Power supply voltage[V]	DC5
Diameter[mm]	21
Length[mm]	26.5
Weight[g]	30



Fig. 3.5 Appearance of joint drive motor^[39]

Table 3.3 Specification of joint drive motor^[39]

Manufacturer	Pololu
Voltage[V]	6
No load speed[rpm]	180
stole torque[kgf-cm]	4.3
Diameter[mm]	20
Length[mm]	56.5
Gear ratio	73:1

3.3 電装部

電装部はリンクパイプ内側に設置され、エンコーダによる関節角度計測値の読み取り、モータ駆動、陸上装置との通信を行う。電装部のブロック図を図 3.6 に示す。電装部にはマイコンを備えており、上記の機能を制御する。陸上装置との通信には CAN^[40]を用いた。CAN 通信は多対多通信が可能であり、バス型の配線構造をとることができるため任意の数のユニットを数珠つなぎにする構造に適している。電装部はユニバーサル基板に実装した (図 3.7)。

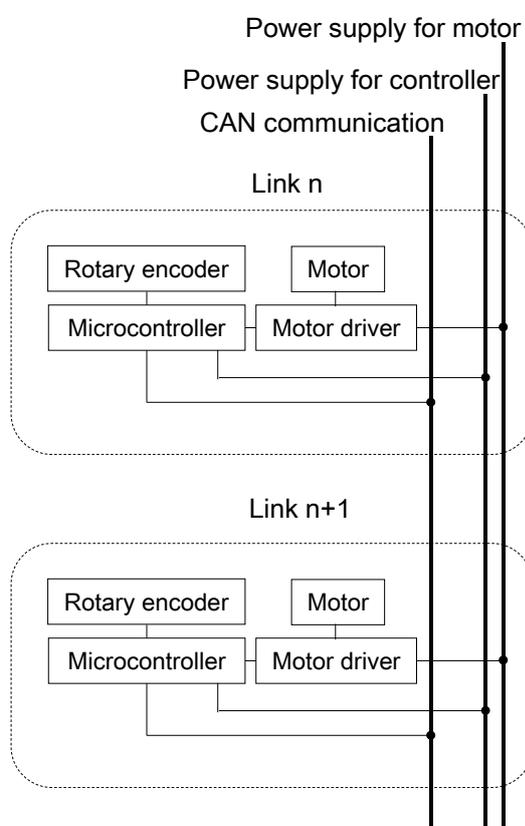


Fig. 3.6 Block diagram of electronics

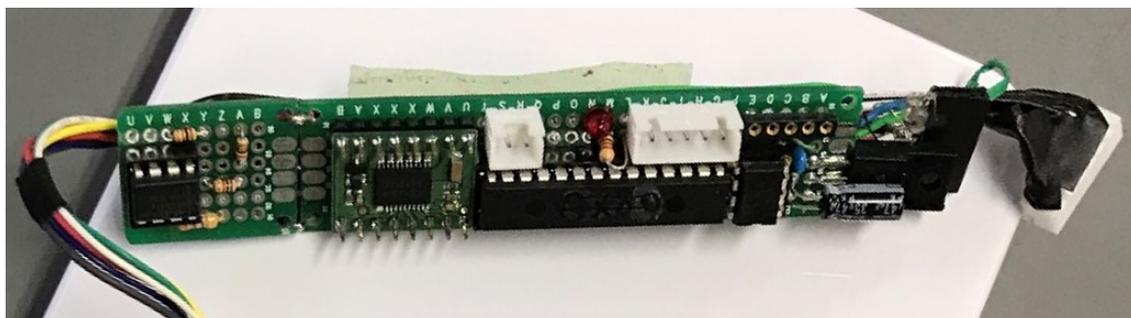


Fig. 3.7 Controller board

3.4 陸上機器

試作機は陸上の機器より給電, 及び通信を行う. 給電には汎用の安定化電源を用いた. 通信にはシングルボードコンピュータである Raspberry pi (図 3.8) を用い, 各関節のマイコンより CAN 通信で送信される関節角度の読み取りと保存を行った. Raspberry pi はそのままでは CAN 通信のインターフェースを持たないため, SPI 通信を介して CAN 通信が可能な microchip 社の MCP2515 と CAN トランシーバを搭載する基板(図 3.9)を接続し CAN インターフェースを設けている. Raspberry pi の操作は汎用のノートパソコンにより SSH 接続を行い, CAN 通信プログラムの起動および保存データのノートパソコンへの転送作業を行った.

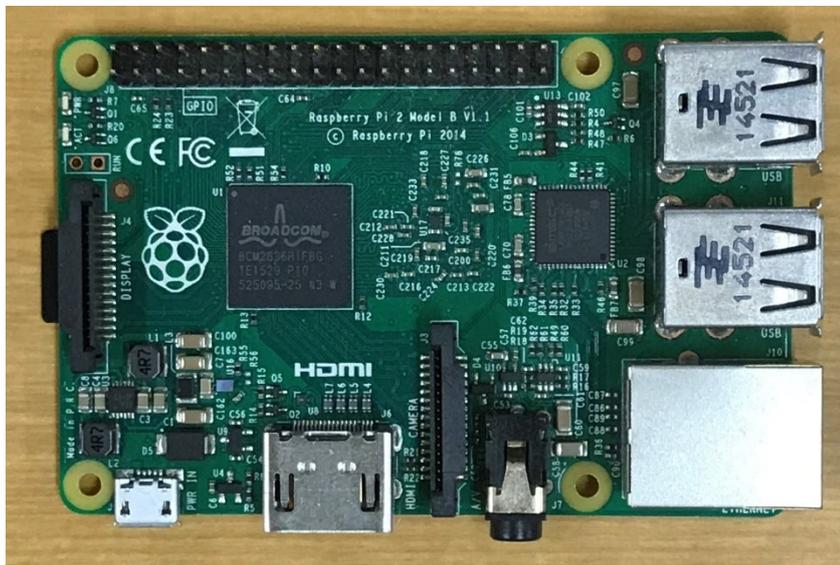


Fig. 3.8 Raspberry pi



Fig. 3.9 CAN interface

3.5 まとめ

水中3次元測定器の精度に関する実験的な研究のため、2章で示した基本設計をとる多関節リンク機構の試作機を製作した。試作機は5関節を持ち全長1.9m、重量約3kgである。各関節角度はロータリエンコーダで計測され、マイコンを通じてCAN通信で水上の機器に伝送される。

第4章 水中3次元測定器の精度評価

水中3次元測定器の関節角度情報より先端のロボットの位置を得るには、機構の運動学が必要となる。本章では、DH記法にもとづく運動学について述べたのち、運動学パラメータを実機に合わせて補正し計測誤差を低減するキャリブレーション手法について解説する。そして試作機を用いた計測実験により、キャリブレーション後の試作機の計測精度の評価を行った。また、キャリブレーション後の計測誤差を低減するため、ニューラルネットワークを用いた誤差推定モデルを構築し、試作機の計測誤差補正を行った。これらについて述べる。

4.1 運動学

多関節リンク機構試作機のリンク根元から手先までの位置ベクトルを得るための順運動学を Denavit-Hartenberg (DH) 記法^{[41],[42]}に基づいて構築する。DH記法は機構上に定義された複数の座標系について、ある座標系から次の座標系への変換を、 x 軸方向に d の平行移動、 x 軸回りに α の回転、 z 軸方向に a の平行移動、 z 軸回りに θ の回転、の4つの座標変換で表すものである。各変換のパラメータ d , α , a , θ をDHパラメータと呼ぶ。

座標系 Σ' を Σ へと、平行移動と回転を合わせて変換する行列を同時変換行列とよび、次のように表される。

$$\Sigma = \mathbf{T} \Sigma' \quad (4.1)$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{P} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

\mathbf{R} は座標の回転、 \mathbf{P} は平行移動を表す行列である。

\mathbf{T} をDH記法に基づき次のように示す。

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

ここで、右辺の各行列は左側より、 x 軸方向への平行移動、 z 軸回りの回転、 z 軸方向の平行移動、 x 軸回りの回転を表している。シリアルリンク機構において根元座標から手先座標の位置ベクトルを得るには、関節から関節への座標変換を順次か

けていくことで、次のように求められる。

$$\mathbf{r}_0^i = \mathbf{T}_0^1 \mathbf{T}_1^2 \mathbf{T}_2^3 \cdots \mathbf{T}_{i-1}^i \quad (4.4)$$

運用中に変化する DH パラメータは可動関節の角度のみであるため、位置ベクトル \mathbf{r} を関節角度に対応するパラメータの関数とすると、関節角度よりシリアルリンク機構の手先位置を求める順運動学が得られる。

多関節リンク機構の試作機の運動学を得るため座標系を図 4.1 (a) の様に定義した。機構の関節軸を z 軸方向、リンク長手方向を x 軸方向としている。関節の構成を図 4.1 (b) に示す。試作機の DH パラメータの設計値は表 4.1 の通りである。

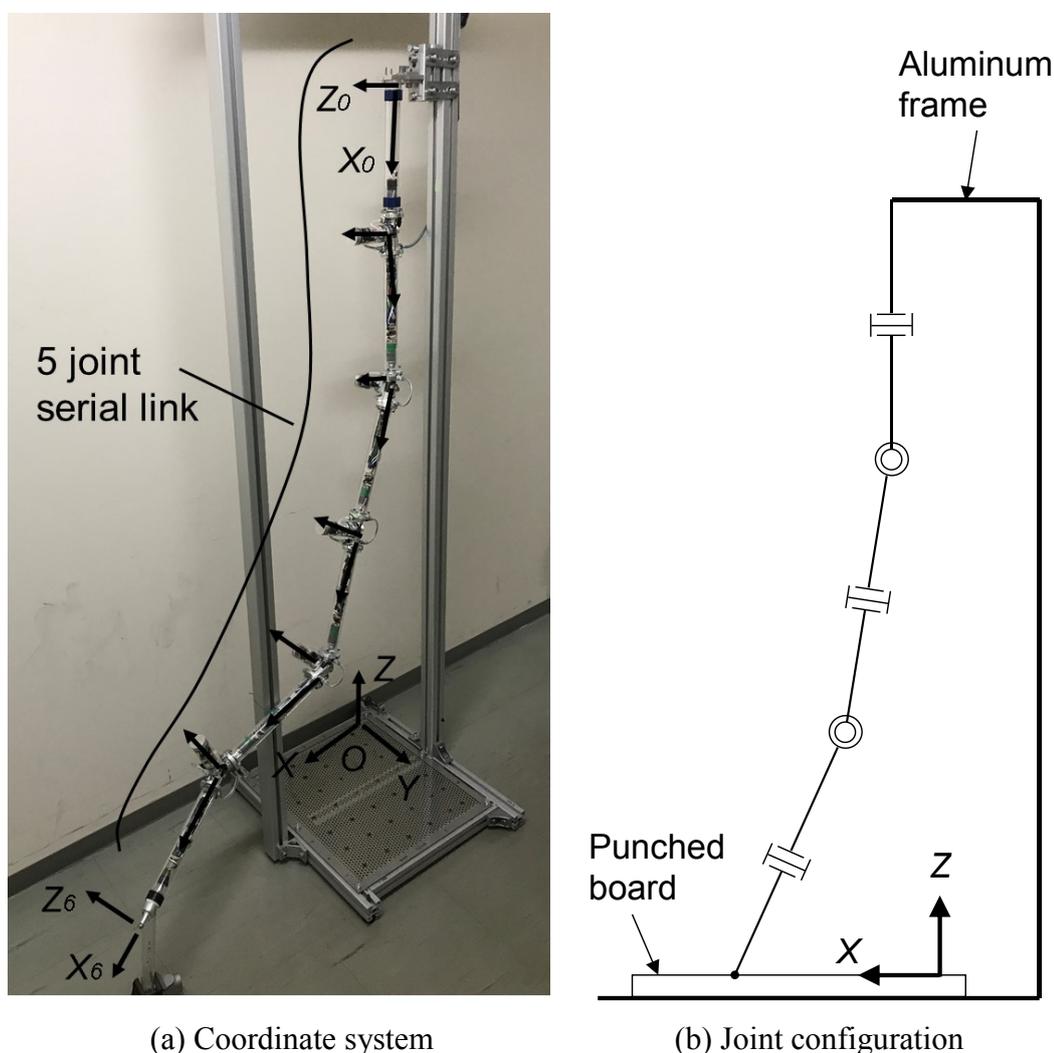


Fig. 4.1 Coordinate system of experimental model

Table 4.1 DH parameter of experimental model

Coordinate system	a [mm]	d [mm]	α [degree]	θ [degree]
0 → 1	284	0	0	θ_1
1 → 2	330	0	90	θ_2
2 → 3	330	0	-90	θ_3
3 → 4	330	0	90	θ_4
4 → 5	330	0	-90	θ_5
5 → 6	339	-	-	-

4.2 運動学のキャリブレーション

リンクの手先位置は DH パラメータに基づく順運動学により得られるが，設計値と実際の装置のパラメータは装置部品の加工誤差，また組み立て誤差から異なる値をとり，このために運動学から得られる手先位置と実際の手先位置には誤差を生じる．これを避けるため，順運動学の DH パラメータを実機に合わせるキャリブレーション^{[43],[44],[45]}が必要となる．水中3次元測定器の試作機を対象に行ったキャリブレーションについて解説する．

4.2.1 キャリブレーション手法

実施したキャリブレーション手法について解説する．本手法は手先位置ベクトルの DH パラメータに関するヤコビ行列を用いて，手先位置およびパラメータの微小変化の関係式を得る．そして手先位置の微小変化として計測誤差を代入しこれに対応するパラメータの微小変化を得ることで DH パラメータを更新する．

キャリブレーションの対象となるパラメータを定義する．関節角度はエンコーダで計測されるが，取り付け時のオフセット誤差が存在する．このため DH パラメータに表 4.2 の様に θ のオフセット s を加え，順運動学はキャリブレーション対象となるパラメータ $\boldsymbol{\varphi}$ ，エンコーダの計測値 $\boldsymbol{\theta}$ の関数 $\mathbf{r}(\boldsymbol{\varphi}, \boldsymbol{\theta})$ とする．

ここで， $\boldsymbol{\varphi} = (a_1, d_1, \alpha_1, s_1, \dots, a_5, d_5, \alpha_5, s_5, a_6)$ ， $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5)$ である．

ある任意の点を計測したときのエンコーダ計測値 $\boldsymbol{\theta}$ を式に代入すると，そのリンク姿勢における手先の x, y, z 方向の微小変位と DH パラメータの微小変位の関

係式は、手先位置ベクトルの DH パラメータに関するヤコビ行列から次の様に得られる。

$$\Delta \mathbf{r} = \frac{\partial \mathbf{r}(\boldsymbol{\varphi}, \boldsymbol{\theta})}{\partial \boldsymbol{\varphi}} \Delta \boldsymbol{\varphi} \quad (4.5)$$

測定点の数を n とすると、上式は次のように拡張できる。

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{r}_1 \\ \Delta \mathbf{r}_2 \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{r}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{r}(\boldsymbol{\varphi}, \boldsymbol{\theta}_1)}{\partial \boldsymbol{\varphi}} \\ \frac{\partial \mathbf{r}(\boldsymbol{\varphi}, \boldsymbol{\theta}_2)}{\partial \boldsymbol{\varphi}} \\ \vdots \\ \frac{\partial \mathbf{r}(\boldsymbol{\varphi}, \boldsymbol{\theta}_n)}{\partial \boldsymbol{\varphi}} \end{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\varphi} \quad (4.6)$$

ここで、 $\Delta \boldsymbol{\varphi}$ に掛かる行列を \mathbf{J} とすると、 \mathbf{J} の一般逆行列より、パラメータの微小変化 $\Delta \boldsymbol{\varphi}$ は

$$\Delta \boldsymbol{\varphi} = \mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{r}_1 \\ \Delta \mathbf{r}_2 \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{r}_n \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

と得られる。 $\Delta \mathbf{r}_i$ をキャリブレーション前のパラメータを用いて計算された手先位置と実際の手先位置の差

$$\Delta \mathbf{r}_i = (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}(\boldsymbol{\varphi}, \boldsymbol{\theta}_i)) \quad (4.8)$$

とすると、計測誤差に対応するパラメータの微小変化 $\Delta \boldsymbol{\varphi}$ が得られる。この値を用いてパラメータを次のように更新する。

$$\boldsymbol{\varphi}_i = \boldsymbol{\varphi}_{i-1} + \Delta \boldsymbol{\varphi}_i \quad (4.9)$$

更新されたパラメータから得られる計測誤差をもって、上記処理をパラメータの修正が収束するまで繰り返す。

Table 4.2 Identification of DH parameter for calibration

Coordinate system	a [mm]	d [mm]	α [degree]	θ [degree]
$0 \rightarrow 1$	a_1	d_1	α_1	$\theta_1 + s_1$
$1 \rightarrow 2$	a_2	d_2	α_2	$\theta_2 + s_2$
$2 \rightarrow 3$	a_3	d_3	α_3	$\theta_3 + s_3$
$3 \rightarrow 4$	a_4	d_4	α_4	$\theta_4 + s_4$
$4 \rightarrow 5$	a_5	d_5	α_5	$\theta_5 + s_5$
$5 \rightarrow 6$	a_6	-	-	-

4.2.2 実験方法

キャリブレーションの実施には任意の手先座標の計測誤差とその時の関節角度情報が必要になる。これを取得する位置計測実験を行った。

実験装置は図 4.2 の通りである。多関節リンク機構の試作機がアルミフレームに取り付けられている。アルミフレームにはステンレス製のパンチボードが取り付けられている。また、試作機のリンク先端にはプローブとして鋼球が取り付けられており、パンチボードの孔に球をセットすることで手先を任意の座標に固定する。測定孔はボード上で 42 点を図 4.3 の様に選択した。各孔の座標は門型の 3 次元測定器にてあらかじめ計測した。

計測実験ではこの 42 点の孔にプローブを順次セットし、孔ごとに五つの関節角度を記録した (図 4.4)。測定孔にセットされたプローブは試作機の自重によりパンチボードに押付けられ位置が保持される。手先位置の操作は人の手で行った。

パンチボードとリンク根元の相対位置は、測定前に事前に計測した。パンチボード座標における x , y 方向については下振りを根元リンクパイプ中心より下げ、振り子の先端が接触する点の位置を用いた。根元リンクの長手方向軸に沿って下振りを降下させるため、パンチボード面と根元リンクは気泡管式水平器をもちいて水平、および鉛直に調整し計測を行った。 z 方向についてはボードから根元リンク下端までの距離を巻尺で計測し、リンク長さを加算した値とした。

関節角度についてはエンコーダの計測値そのままでは、取り付け誤差が乗った値となるため、リンクを真直ぐに伸ばした状態で関節角度を計測し、このときに関節角度が 0 となるように各関節でオフセット値を加えた。

本実験では各孔は 6 回ずつ計測され、5 回はキャリブレーション、1 回分は精度検証用に用いた。計測時の姿勢には 3 回分は先端関節が+側に回転する姿勢、もう 3 回分は-側に回転する姿勢で行った。また計測は大気中、水中で実施した。水中での測定は、水面でプローブをセットした後、水深約 2m プールに実験装置を降下させ、関節角度を記録した (図 4.5)。降下中の振動、水の抵抗によりプローブが測定孔からずれることを防ぐため、孔の下にはネオジウムマグネットを設置し、磁力によりプローブを引き付けた。

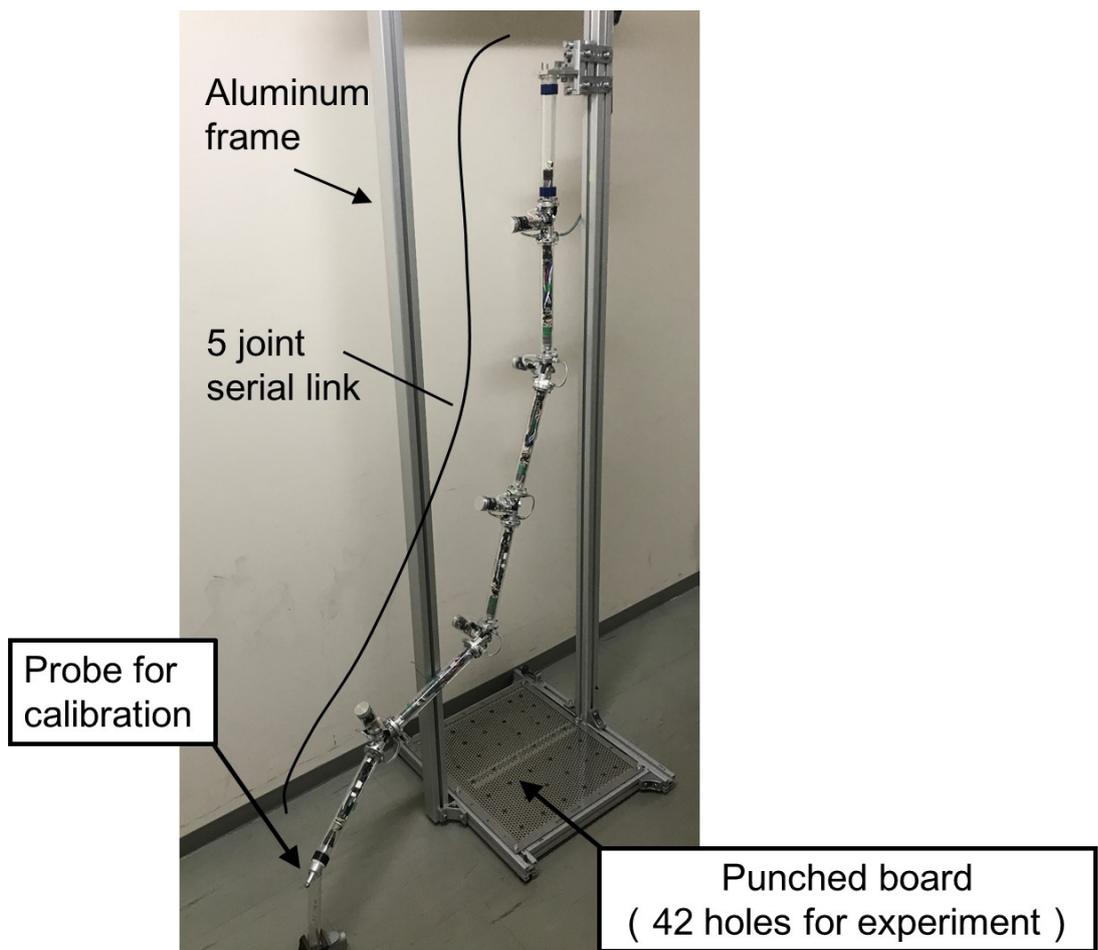


Fig. 4.2 Experimental equipment

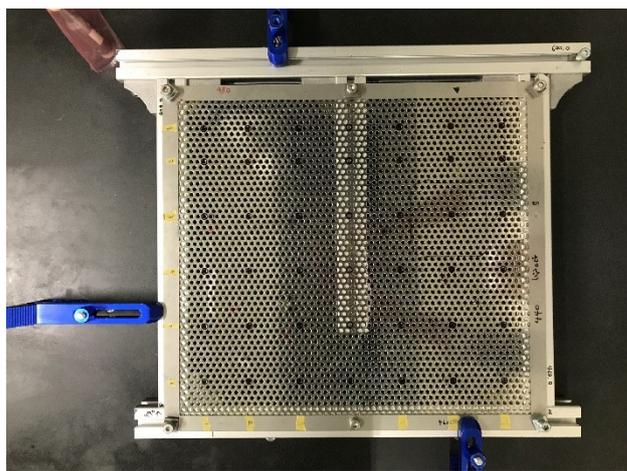


Fig. 4.3 Target holes on punched board

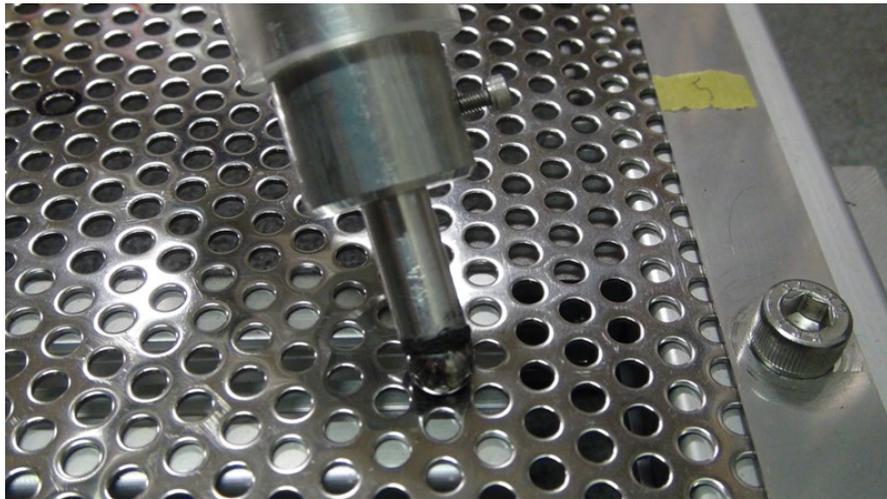


Fig. 4.4 Probe set on hole of punched board

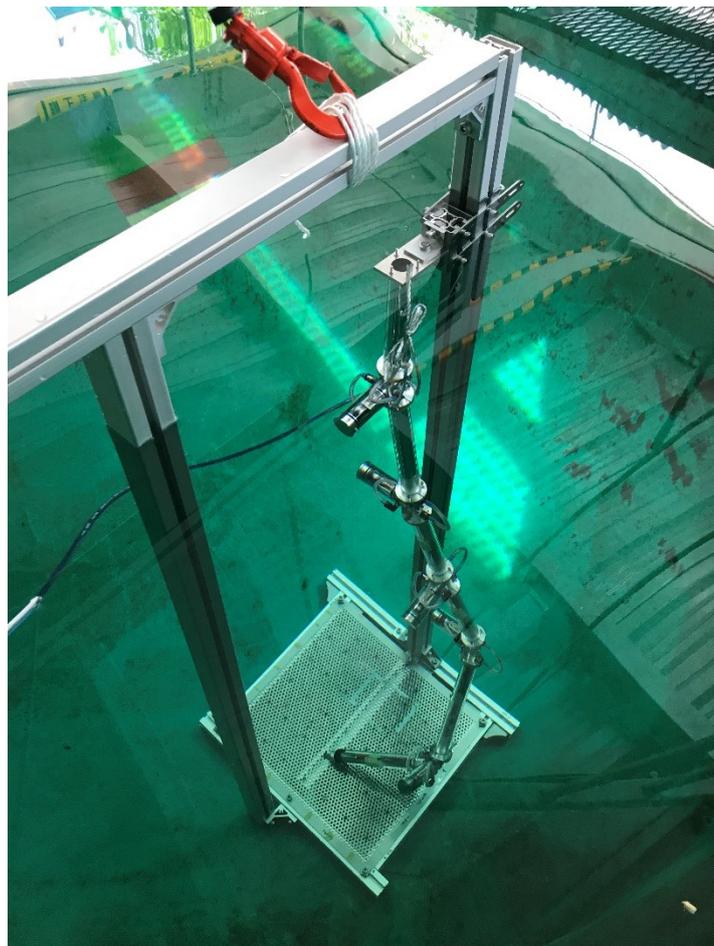


Fig. 4.5 Measurement experiment at the water tank

4.2.3 実験結果とキャリブレーション後の精度

a. 大気中での測定結果

大気中における測定データでは、DHパラメータのすべてをキャリブレーション対象とした場合では計算が発散した。よって、キャリブレーションが実施できた角度パラメータ α , s のみを対象としたキャリブレーションを実施した。以降角度パラメータのみのキャリブレーションを Calibration I, すべてのパラメータを対象とした場合を, Calibration II とする。

キャリブレーション用データおよび、検証用データにおける計測座標の x - y 方向のプロットを図 4.6, 4.7 にそれぞれ示す。黒点が実際の測定孔の位置であり、オレンジ点がキャリブレーション前、青が後をそれぞれ示している。図よりキャリブレーションにより計測座標が実際の座標へと近づき、誤差が減少していることがわかる。検証データのキャリブレーション前後の誤差の平均, 最大値, 標準偏差を表 4.3 に示す。表中の Total の標準偏差は x, y, z 方向の標準偏差の二乗和の平方根を示している。誤差は最大で 28.4mm, 平均で 16.8mm という結果が得られた。また, キャリブレーション後のパラメータを表 4.4 に示す。

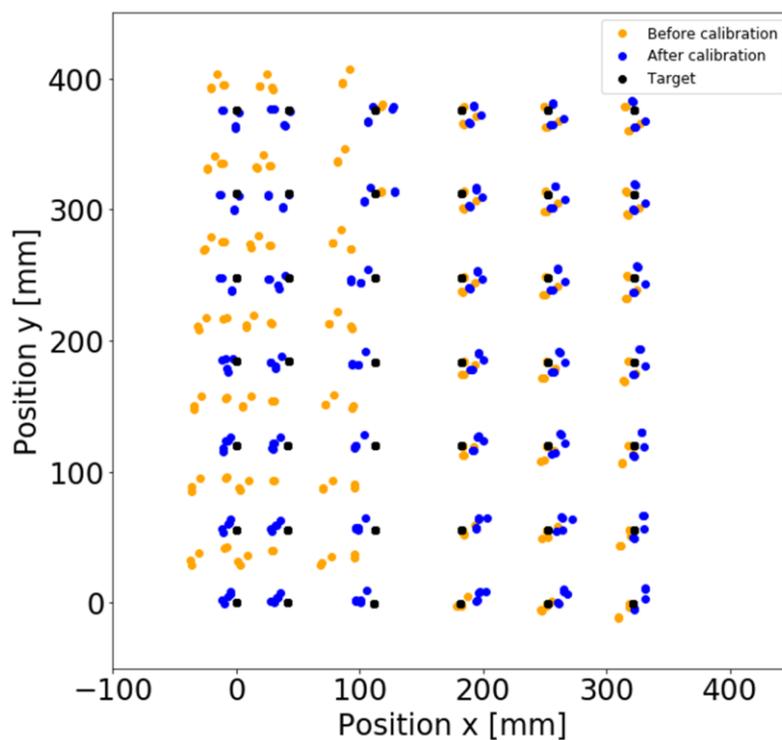


Fig. 4.6 Result of calibration I
with data for calibration obtained at atmosphere

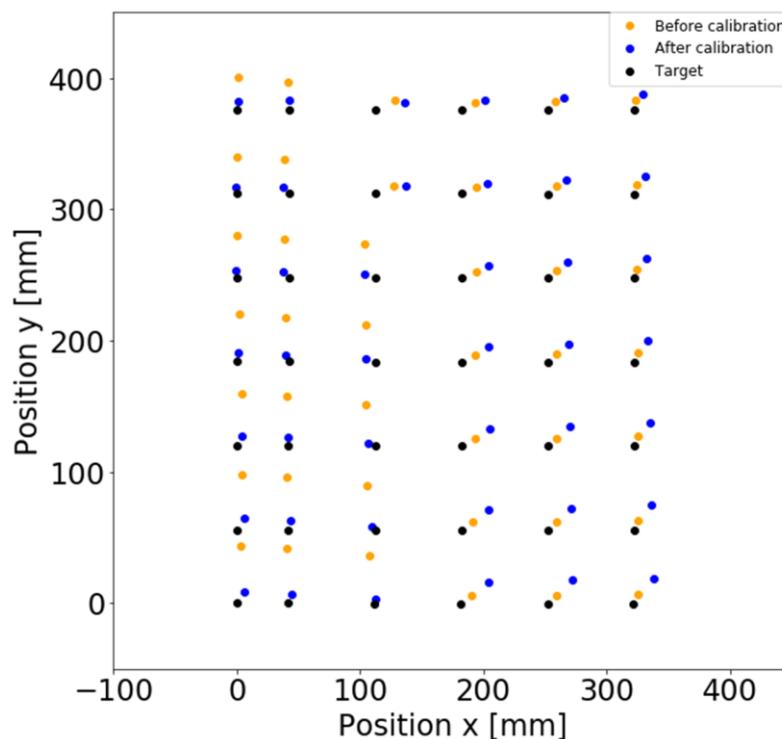


Fig. 4.7 Result of calibration I
with data for verification obtained at atmosphere

Table 4.3 Positioning error

		Mean[mm]	Max[mm]	Standard deviation
x	Before	3.3	15.7	6.2
	After	9.1	24.9	10.3
y	Before	18.5	43.8	14.3
	After	9.5	19.6	5.1
z	Before	0.5	10.7	6.7
	After	3.2	10.2	6.4
Total	Before	22.0	44.1	16.9
	After	16.8	28.4	13.1

Table 4.4 Corrected value of DH parameter

Coordinate system	a [mm]	d [mm]	α [degree]	θ [degree]
0 → 1	-	-	-0.72	-1.52
1 → 2	-	-	-0.04	-0.26
2 → 3	-	-	-0.82	2.31
3 → 4	-	-	-1.45	2.14
4 → 5	-	-	1.90	-1.18
5 → 6	-	-	-	-

b. 水中での測定結果

水中での測定データを用いたキャリブレーションでは角度パラメータのみの場合とすべてのパラメータを対象とした場合とも収束する結果が得られた。

Calibration I のキャリブレーション用データ，及び検証用データのプロットをそれぞれ図 4.8, 4.9 に示す。また検証データのキャリブレーション前後の誤差の平均，最大値，標準偏差を表 4.5 に示す。誤差は最大で 9.3mm，平均で 6.0mm となった。キャリブレーション後のパラメータを表 4.6 に示す。

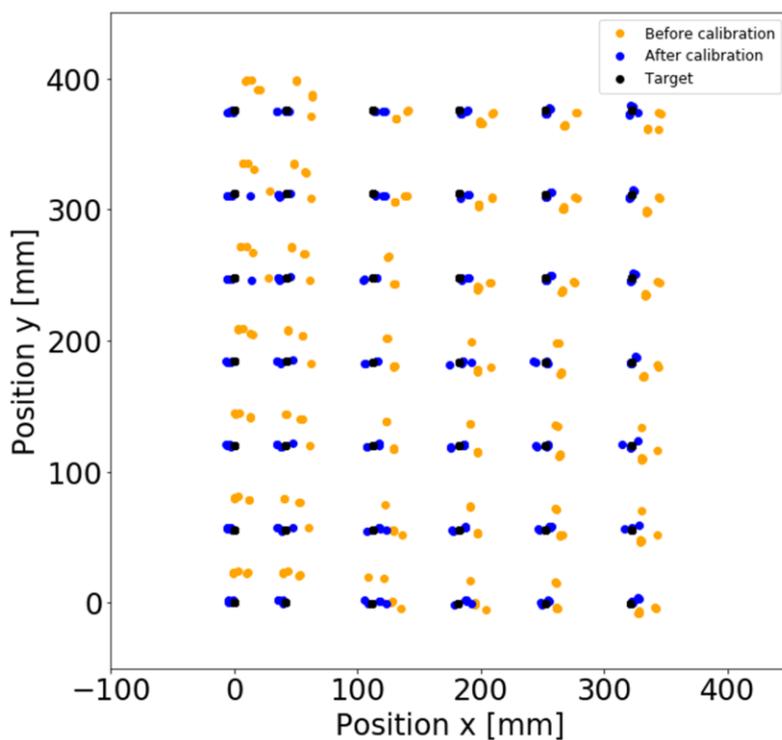


Fig. 4.8 Result of calibration I
with data for calibration obtained at water tank

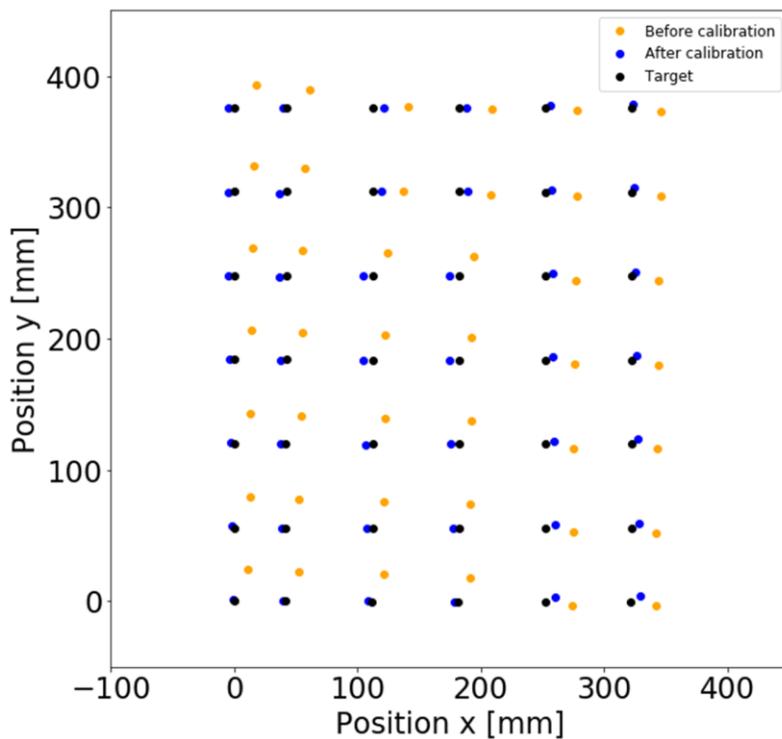


Fig. 4.9 Result of calibration I
with data for verification obtained at water tank

Table 4.5 Position error

		Mean [mm]	Max [mm]	Standard deviation
x	Before	17.2	28.4	6.3
	After	-0.2	8.7	5.6
y	Before	10.0	23.9	11.2
	After	0.9	4.2	1.6
z	Before	0.0	2.7	1.6
	After	2.2	3.7	1.1
Total	Before	23.6	28.7	13.0
	After	7.0	10.3	6.0

Table 4.6 Corrected value of DH parameter

Coordinate system	a [mm]	d [mm]	α [degree]	θ [degree]
0 \rightarrow 1	-	-	-1.54	-1.09
1 \rightarrow 2	-	-	0.14	-0.70
2 \rightarrow 3	-	-	-0.24	1.35
3 \rightarrow 4	-	-	-1.35	-0.12
4 \rightarrow 5	-	-	1.04	0.26
5 \rightarrow 6	-	-	-	-

Calibration II のキャリブレーション用データ, 及び検証用データのプロットをそれぞれ図 4.10, 4.11 に示す. また検証データのキャリブレーション前後の誤差の平均, 最大値, 標準偏差を表 4.7 に示す. 誤差は最大で 3.0mm, 平均で 1.5mm となった. キャリブレーション後のパラメータを表 4.8 に示す.

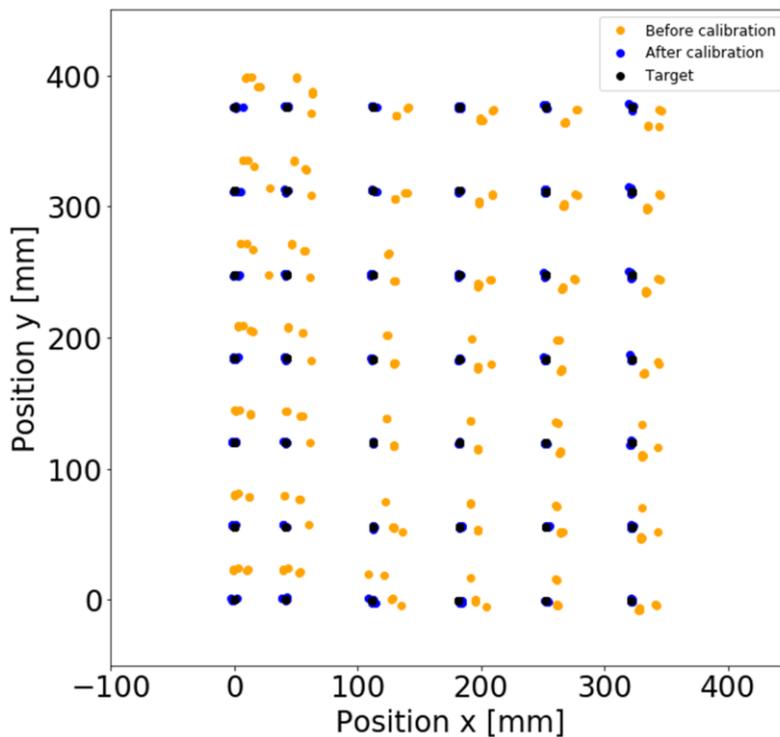


Fig. 4.10 Result of calibration II with data for calibration obtained at water tank

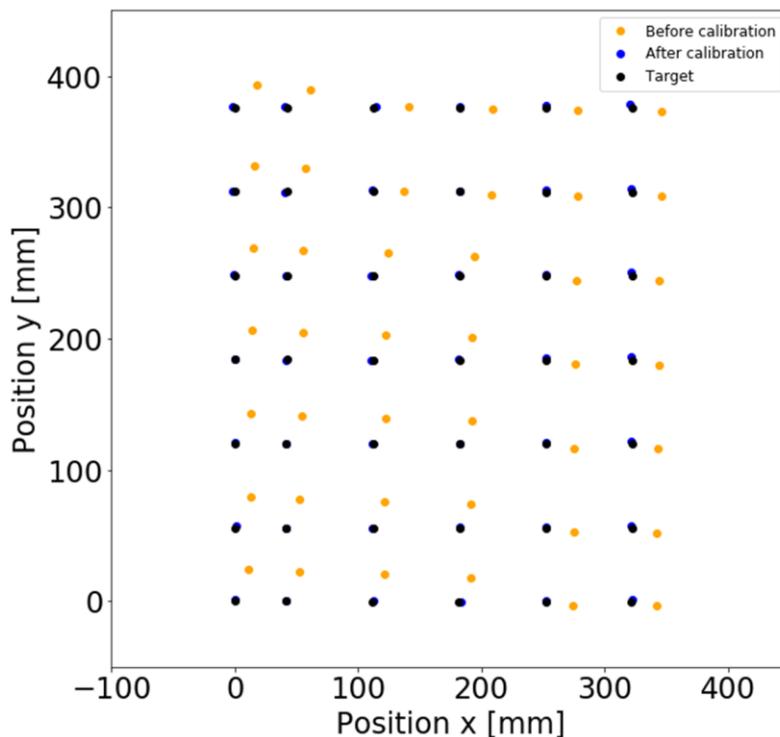


Fig. 4.11 Result of calibration II with data for verification obtained at water tank

Table 4.7 Position error

		Mean [mm]	Max [mm]	Standard deviation
x	Before	17.2	28.4	6.3
	After	-0.3	1.7	0.9
y	Before	10.0	23.9	11.2
	After	0.8	2.4	0.8
z	Before	0	2.7	1.6
	After	0.4	1.3	0.7
Total	Before	23.6	28.7	13.0
	After	1.5	3.0	1.3

Table 4.8 Corrected value of DH parameter

Coordinate system	a [mm]	d [mm]	α [degree]	θ [degree]
0 \rightarrow 1	-0.91	-4.55	-1.19	-0.78
1 \rightarrow 2	-17.66	-1.39	-0.14	-0.24
2 \rightarrow 3	14.97	-3.50	0.28	0.84
3 \rightarrow 4	5.52	3.41	-1.88	-1.03
4 \rightarrow 5	0.97	6.06	0.81	0.52
5 \rightarrow 6	0.71	-	-	-

c. 考察

大気中での計測と水中での計測の比較としては、計算の収束した角度のみのキャリブレーション I の場合では水中での計測時の精度が良い結果となっている。この要因としてはリンクに生じた浮力が考えられる。水中環境によってリンク機構が受ける影響としては、浮力のほかに水圧、流れが考えられるが、本実験は閉鎖されたプールで実施しており、また水深も 2m 程度と浅くこれらの影響は無視できると考えられる。浮力によって計測誤差が低減する要因としては、浮力によってリンクの自重が低減され、リンクや関節部のたわみが減少することが考えられる。

水中における測定ですべてのパラメータをキャリブレーション対象とした場合が最も測定精度が良い結果となった。しかしながら、キャリブレーションされたパラメータを見ると、設計値からの変化量が十数 mm に達しているパラメータがあることがわかる。角度パラメータについては、リンクパイプの取り付け、関節角度のゼロ点設定のずれなどの理由でオフセットが生じることは考えられるが、長さ方向については、組み立て時においても十数 mm 変動するような調整幅はなく、また加工誤差としては大きい。よってキャリブレーション結果は計測誤差を低減しているが、修正後のパラメータとしては実際とは異なる値になっていると考えられる。この要因としては、限定された範囲の測定点を用いているため、この範囲内で最適化されたパラメータになったこと、またリンクおよび関節のたわみ、がたつき等のモデル化されていない要因から生じる誤差の影響が挙げられる。

4.3 ニューラルネットワークを用いた誤差補正

DHパラメータのキャリブレーションにより運動学の位置精度は向上した。しかしながら、この手法では運動学でモデル化されているリンクの幾何学的パラメータによる誤差までしか対処できず、前述のようなリンクのたわみや関節のがたつきによる誤差を低減することができない。そこで、計測精度をさらに向上させるために、ニューラルネットワークを用いた運動学の誤差補正を行う。運動学およびそのキャリブレーションには、たわみなどの非幾何学的な要因も取り入れたものが研究されている^[46]。しかしながら、これらモデルは複雑になり^[47]、またこれらモデルでも明示的に記述されていない誤差要因の補正はDHパラメータのキャリブレーション同様困難と思われる。一方ニューラルネットワークは学習データからネットワークの重みを調整して、入力データから出力データを得るモデルを獲得するため、誤差要因が明らかでない場合でも、誤差を補正できると考えられる。ニューラルネットワークの多関節リンク機構への応用例としては産業用マニピュレータの逆運動学を対象としたものがある^{[48],[49],[50]}。またニューラルネットワークを用いた多関節機構の誤差補正には Nguyen^[51]らによる産業用マニピュレータへ適用がある。これはキャリブレーション済みの運動学の誤差をニューラルネットワークにより補正しており、ネットワークへの入力情報としては、誤差への寄与が大きいとして根元側の3関節の角度情報を用いている。水中3次元測定器においてリンクは水中に位置し、根元側にて重量を支える産業用ロボットとは異なる運用となる。このため、本研究ではニューラルネットワークへの入力情報としては機構のすべての関節情報を用い、手先の位置誤差を推定するモデルを構築した。

4.3.1 ニューラルネットワーク

ニューラルネットワークは生物の神経細胞であるニューロンの働きを計算機上で表現し、目的に応じてネットワークを学習させることでデータの分類や画像認識といった機能を持たせることが可能になっている。人工ニューロンのモデルを図4.12に示す。

ネットワークを構成するニューロンはいくつかの入力をもとに計算処理を行った値を出力する。出力は式(4.10)の様に入力それぞれに重み w を掛けて和をとり、これにオフセット値 k を加えた結果を出力関数 f に渡した出力が次のニューロ

ンへの入力またはネットワークの出力となる。このニューロンを複数結合したネットワークがニューラルネットワークである。各ニューロンがもつ重み、またバイアスの値によりネットワークの出力が変化する。ネットワークが期待の出力を得るよう、パラメータを調整する事をネットワークの学習と呼ぶ。

$$v = f \left(\sum_{i=1}^n \omega_i u_i - k \right) \quad (4.10)$$

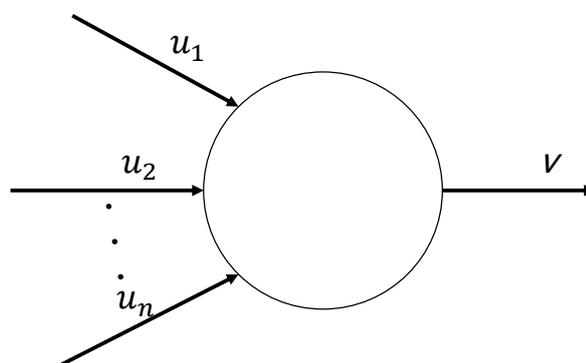


Fig. 4.12 Artificial neuron model

4.3.2 誤差補正手法

構築した誤差補正手法について解説する。誤差補正の流れを図 4.13 に示す。ニューラルネットワークに関節角度情報が入力され、運動学の誤差値が出力される。そして、これを用いて運動学から得られる手先座標を修正し最終的な手先座標が得られる。

試作機の誤差補正に構築したニューラルネットワークを図 4.14 に示す。ネットワークは入力層、隠れ層、出力層より構成される。入力層には試作機の五つの関節角度が入力され隠れ層のニューロンへ出力される。関節角度は正規化した後に入力される。出力層は三つのニューロンをもち運動学の x , y , z 方向における位置誤差をそれぞれ出力する。隠れ層は 1~7 層、ニューロン数を 5~300 の範囲で組み合わせを複数評価し、誤差の補正結果が良好だった 4 層で各層のニューロン数が 175 個である組み合わせを選択した。隠れ層の違いによる誤差推定結果については 4.3.3 項にて述べる。

各層のニューロンの活性化関数には、出力層においては実数を表現するため、

$$f(x) = x \quad (4.11)$$

となる線形関数を用いた。そのほかの層では Rectified linear unit (ReLU) 関数^{[52],[53]}を選択した。ReLU 関数は図 4.15 に示すように、

$$\begin{aligned} f(x) &= 0 \quad (x < 0) \\ f(x) &= x \quad (x \geq 0) \end{aligned} \quad (4.12)$$

となる関数である。

本ネットワークは機械学習用のソフトウェアライブラリである Keras と TelsorFlow を用いて実装した。

構築したネットワークはキャリブレーションと同様のパンチボードに設けた測定孔を計測したときの関節角度とキャリブレーション済みの運動学の誤差情報により学習される。学習の評価関数としては、二乗平均を用い、またニューロンの重みの最適化としては adaptive moment estimation (Adam) の手法^[54]を用いた。Adam のパラメータは参考文献の推奨値である $b1=0.9$, $b2=0.999$ とし学習率は 0.001 とした。また学習時に同時に処理するデータ点数であるバッチサイズとしては、測定孔と同数の 42 とした。学習の繰返し数としては、1000 回を上限とし、学習に伴う評価関数の評価出力の改善が見られなくなってから 100 回の学習を繰り返したところで打ち切った。

ニューラルネットの学習用に 42 点の測定孔を 12 回それぞれ計測した。42 点を 1set のデータのまとまりとおくと、まず 11set を用いて運動学のキャリブレーションを行い、12set のデータすべてにおける先端の誤差を得る。続いてキャリブレーションに用いた 11set のデータでニューラルネットワークの学習を行い、残りの 1set で学習結果の検証を行った。検証データに選択する set ごとに結果がばらつくことが想定されるため、上記の学習と評価は 12 個の set それぞれが検証用データとして選択された場合について実施した。

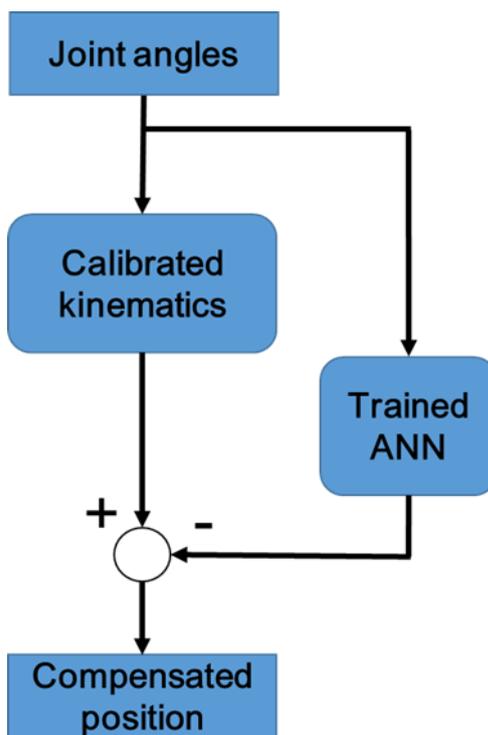


Fig. 4.13 Error compensation flow using artificial neural network

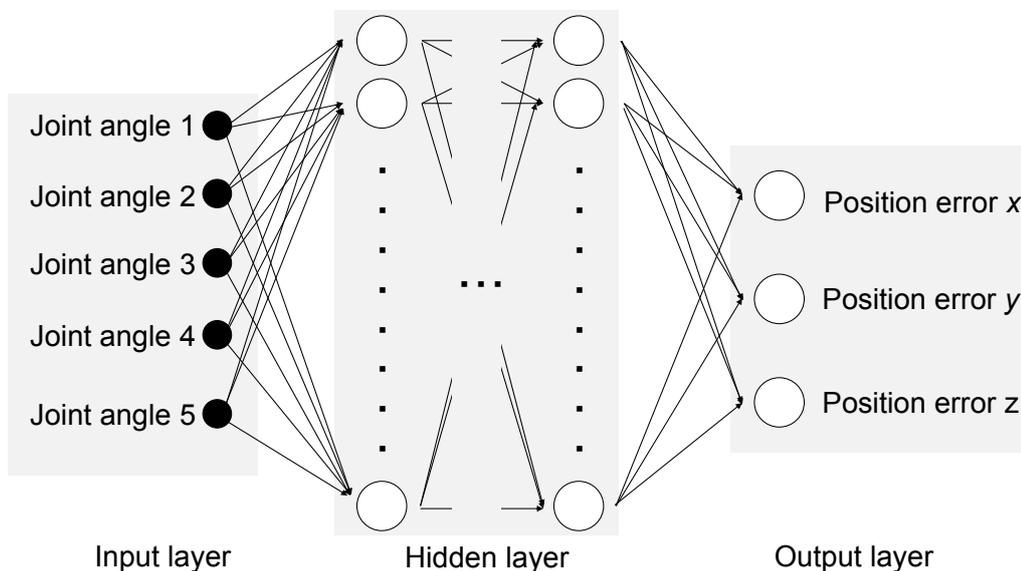


Fig. 4.14 Structure of artificial neural network

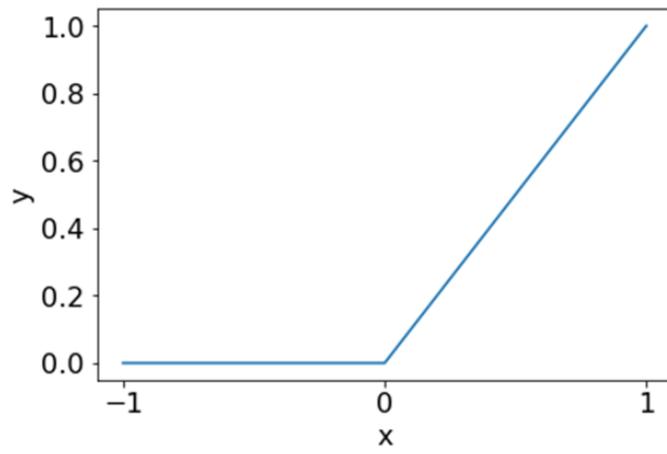


Fig. 4.15 ReLU function

4.3.3 補正結果

学習したニューラルネットワークによる誤差推定結果の x , y 方向について、図 4.16 に示す。本結果は 12set 目のデータを検証用データに選択した場合となっている。橙色線が推定目標の誤差であり、青色線が学習済みのニューラルネットワークによる推定結果となっている。本グラフより学習済みのネットワークは運動学の位置誤差をよく推定していることがわかる。また各点におけるキャリブレーション前後及びニューラルネットワークによる補正後の x , y 方向の誤差を図 4.17 に示す。ニューラルネットワークによる補正後の 42 点の平均誤差と最大誤差について、各 set における値を図 4.18 に示す。ニューラルネットワークの学習結果はパラメータの初期値で多少ばらつきがあるため、ここでは各セットで 20 回の学習結果の平均を示している。橙色線が補正前の運動学の誤差であり、青色線が補正後の誤差である。また赤色線がキャリブレーション前の誤差となっている。グラフより、どの set を検証用データに選択した場合においても、補正後の誤差が減少していることがわかる。最大で 67.1%、平均では 51.0%の誤差低減効果が得られた。

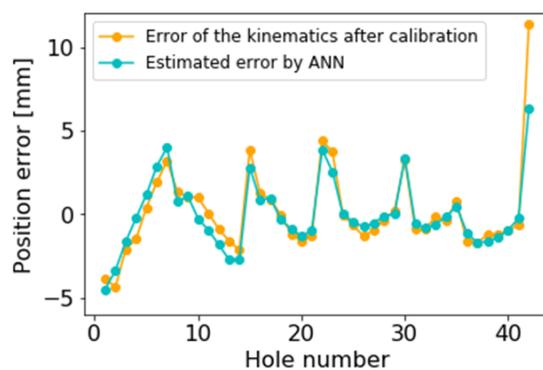
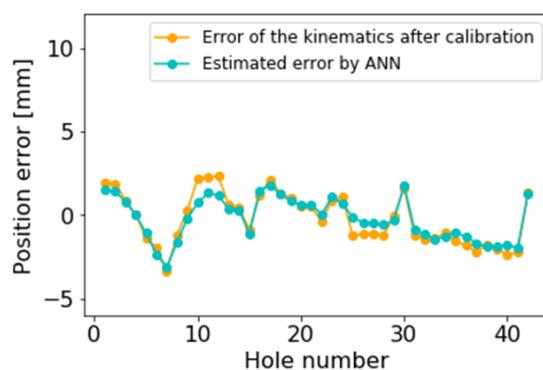
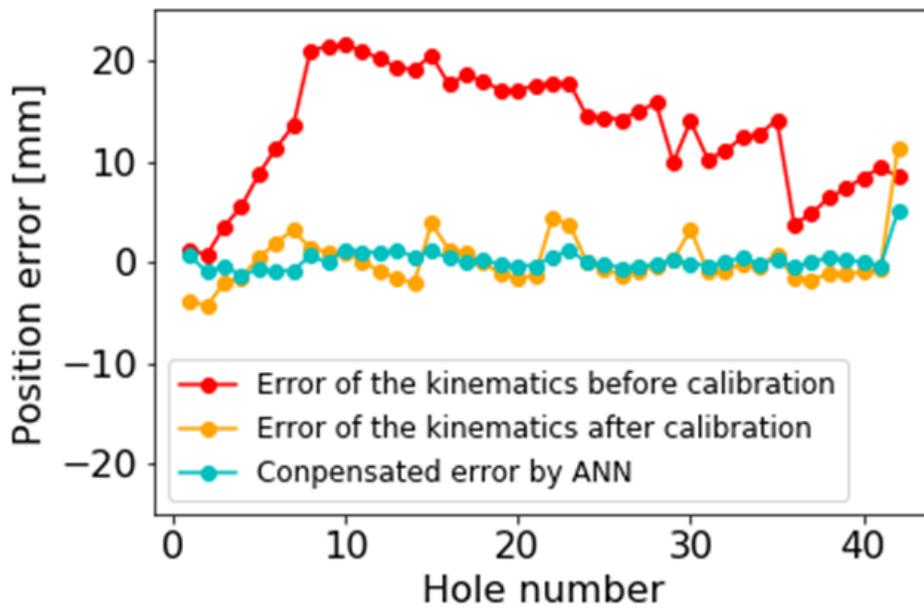
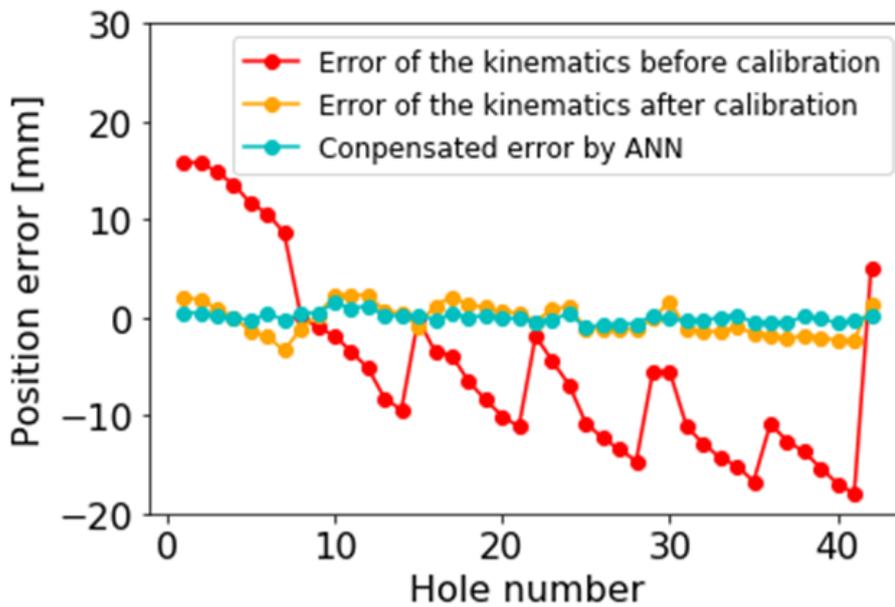
(a) x direction(b) y direction

Fig. 4.16 Error estimation result

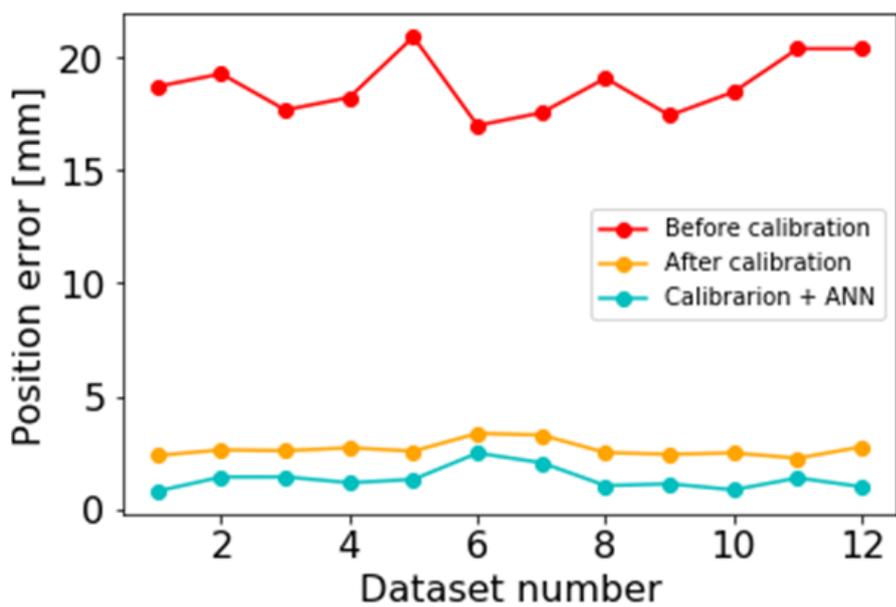


(a) *x* direction

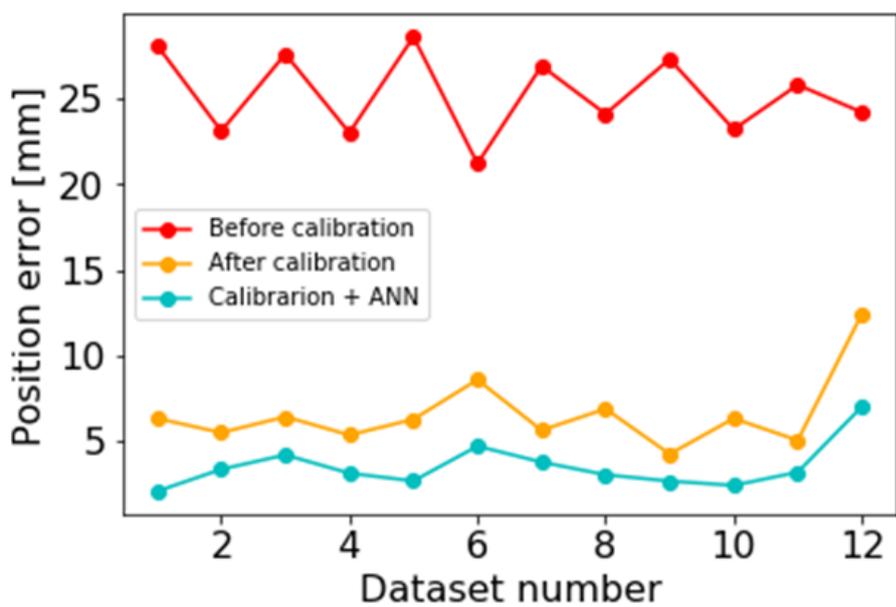


(b) *y* direction

Fig. 4.17 Error compensation result



(a) Average error



(b) Maximum error

Fig. 4.18 Error compensation result on each dataset

4.3.3 隠れ層の構成と誤差推定性能

ネットワークの入力層と出力層は入出力データの次元に合わせた設計となるが、隠れ層は任意の構成をとることができる。隠れ層の構成による誤差推定性能の変化を確認するため、構成を変えたいくつかの隠れ層で学習、検証を行った。

マニピュレータの順運動学、逆運動学に関するニューラルネットワークの応用例を見ると、隠れ層は1から2層程度、ニューロンの数は12~40個ほどの構成がみられた^{[48],[49],[50],[51]}。本研究では隠れ層を1から7層、ニューロン数を5から300個まで変化させ誤差の推定性能を比較した。用いるデータとしてはキャリブレーション用データとして切り分けた11setの角度情報と誤差情報から、1setを評価データとし残りを学習に用いた。選択する学習データごとの評価関数出力の平均値で評価する。

各構成での誤差補正性能を図4.19に示す。x軸はニューロン数を示し、y軸は層数ごとの評価関数の出力を示している。数値が小さいほど誤差の推定性能が高い。結果はばらつきが大きいものの、大局的にみると1層と2層以上で異なる傾向を示している。1層ではニューロン数が少ないと誤差推定性能が2層以上に比べ低く、ニューロン数が275個程度と大きくなると、2層以上のネットワークと同等の誤差推定性能となっていることがわかる。2層以上のネットワークでは、ニューロン数としては25個程度まではニューロン数につれて性能は増加するが、それ以上では大きな変化はない。また2層以上の層数における推定性能は大きく変わらなく、規模の大きなネットワークが必ずしも性能が良いわけではないことがわかる。本結果から本研究では隠れ層が4層でニューロン数が175個の構成を採用した。

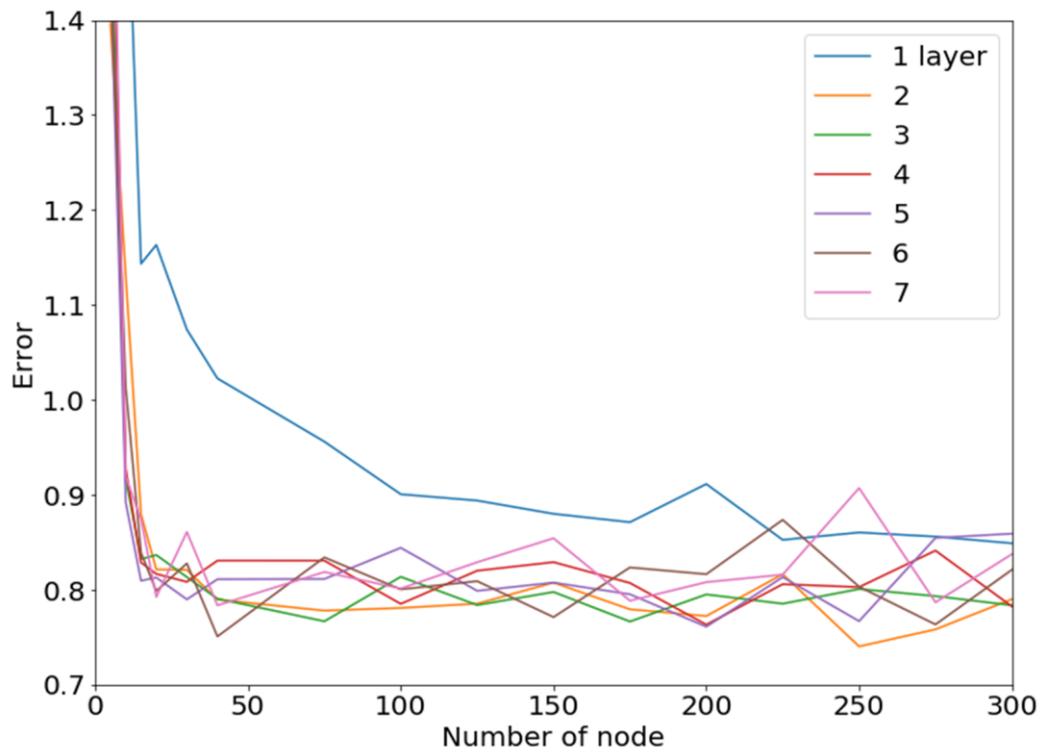


Fig. 4.19 Error estimation result with each hidden layer configuration

4.3.4 学習データ数と誤差推定性能

機械学習の実施にはある程度の学習データ数が必要である。本研究における学習用データはプールでの測定実験で得られるが、一点の測定の度に装置をプールに降下させるため42点の測定では約2時間程度を要し、多数のデータを得ることは困難である。このため、学習データ数の変化に対する誤差推定性能を評価し、学習に必要なデータ数を調べた。

12setの測定データを学習用データ11setと検証用データ1setに切り分け、そのうち学習に用いるset数を2~11setまで1setずつ変化させ学習を実施し、学習後のニューラルネットワークによる誤差補正結果を評価した。結果を図4.20に示す。横軸が学習に用いたセット数、縦軸は誤差を示している。誤差は12setのデータそれぞれが検証データに選択された結果の平均を用いた。また各検証データの誤差は、学習用データの選択を順番に入れ替え評価した結果の平均としている。図よりデータ数が多いほど誤差は少なくなっていることがわかる。また学習データ数が6setほどから誤差低下の割合は緩やかになっている。このことから6setつまり250点程度まではデータ点数を増やすことによる誤差低減の効果が大きく、少なくともこれ以上のデータ取得を行うことが望ましいと考えられる。

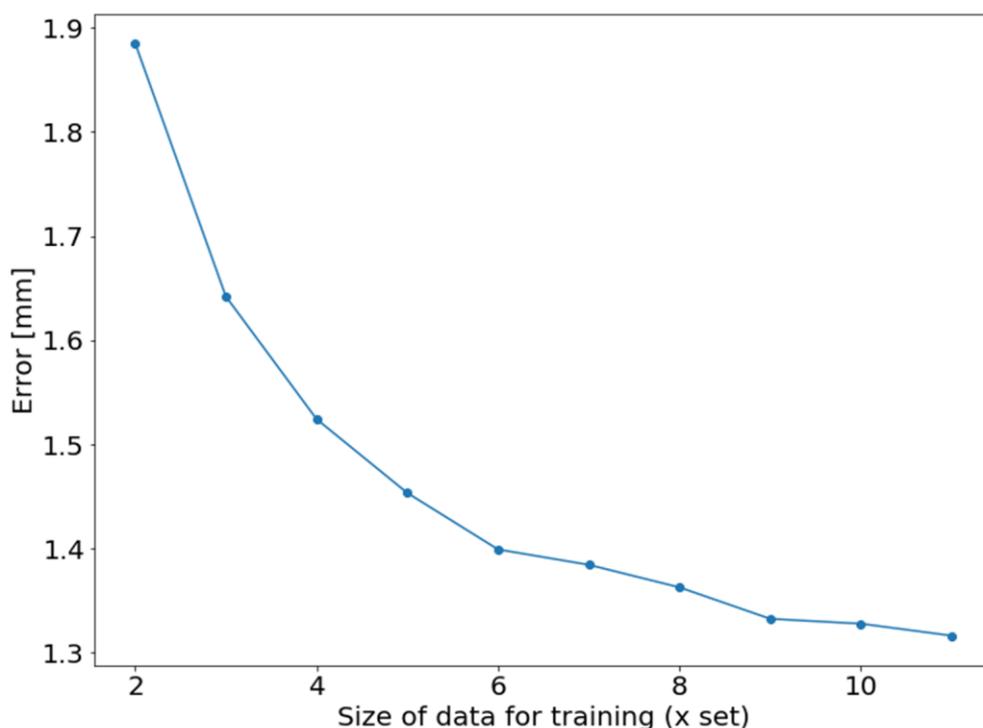


Fig. 4.20 Error compensation result with each training data size

4.4 まとめ

製作した試作機の精度評価を行った。まずリンク機構による位置計測のため DH 記法に基づく運動学を定義した。そして、運動学のパラメータを実機に合わせるキャリブレーション手法について述べた。キャリブレーションの実施のため試作機を用いた計測実験を行った。42 点の既知座標を持つ測定点の複数回の計測データを用いてキャリブレーションを実施した。計測は水中環境、陸上環境それぞれで行い、キャリブレーション後の計測精度としては水中での計測精度が最も良好であった。この要因として、リンクが水中での浮力を受け、リンク自重が低減されたことにより、たわみが減少したことが考えられる。水中での計測における精度は平均誤差で 1.5mm が得られた。

つづいて、水中 3 次元測定器の計測精度の向上のため人工ニューラルネットワークを用いて計測誤差の補正を行った。ネットワークは関節角度情報から運動学の誤差を出力する。水中での計測データから得た運動学の計測誤差により学習させたネットワークを用い学習データとは切り分けた検証データの誤差を推定させ、運動学の誤差補正を行った。これにより平均で 51.0%の誤差低減が行えた。

ニューラルネットワークはその構成により性能が変わる。そこで隠れ層の層数およびニューロンの数を変化させ、誤差推定性能の変化を評価した。結果としては 1 層と 2 層以上で異なる傾向を示した。1 層ではニューロン数が少ない場合に誤差推定性能が 2 層以上に比べ低く、ニューロン数が 275 個程度と大きくなると、2 層以上のネットワークと同等の誤差推定性能となった。2 層以上のネットワークでは、ニューロン数 25 個程度まではニューロン数につれて性能は増加したが、それ以上では大きな変化はない。また 2 層以上の層数における推定性能は大きく変わらない結果となった。上述の誤差補正に用いたネットワークでは 4 層で各層 175 個ニューロンを持つネットワーク構成を用いた。

ニューラルネットワークの学習には訓練データが必要であるが、学習データは実験的に得る必要があり、多量なデータ数を得ることは多大な労力が伴う。必要なデータ数を把握するため学習に用いるデータ数を変化させての推定性能を評価した。データ数の増加に伴い性能は向上するが、その向上率はデータが多くなるにつれて低下した。データ数としては 6×42 点以下で性能低下が顕著であるため、本条

第4章 水中3次元測定器の精度評価

件においてはこれ以上のデータ数で学習を行うことが望ましいことがわかった.

第5章 水中環境の影響の考察

水中3次元測定器の運用時に想定される、水中環境から受ける影響について考察する。水中環境において考慮すべき要因としては、水圧、流れが考えられる。本章ではこれらの要因が水中3次元測定器に及ぼす影響について考察を行う。

5.1 水圧による影響

耐圧構造をとるリンクは周囲の水圧と内部の圧力差により応力を受け、ひずみを生じる、運動学パラメータであるリンク寸法の変化は計測誤差につながる。

外圧を受けるリンクには軸方向、周方向、半径方向のひずみが生じるが、リンクを円筒とみなすと、周方向、半径方向のひずみは軸回りに均一であり、運動学パラメータに影響するのは軸方向の変位となる。3方向の応力が生じている状態での軸方向のひずみは、

$$\epsilon = \frac{1}{E} (\sigma_z - \nu (\sigma_r + \sigma_\theta)) \quad (5.1)$$

で表せられる^[55]。3方向の応力は2章2節の式より得る。リンクひずみによる手先位置誤差を求める。簡単のため、リンク姿勢を水面から鉛直に海底に向けて下げられているものとする。鉛直姿勢ではリンク自重による引張力が水圧による圧縮と反対方向に生じるが、ここではリンクは自重と浮力の釣り合った中性浮力の状態にあるとし、自重による引張は考慮しない。各リンクの材質、寸法が同一とすると、上式のひずみは $\epsilon(h)$ と水深の関数とすることができる。リンク中央の水深をそれぞれの代表水深とすると、各節のリンクひずみは以下となる。

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= \epsilon \left(\frac{1}{2} l \right) \\ \epsilon_i &= \epsilon \left(\sum_{k=1}^{i-1} l'_k + \frac{1}{2} l \right) \quad (i > 1 \text{ のとき}) \end{aligned} \quad (5.2)$$

ここで l は大気圧でのリンク長であり、 l' は水圧により変化したリンク長 $l' = l \times (1 - \epsilon)$ である。リンク先端の誤差はリンク数を j とすると、以下より得る。

$$e_j = \sum_{i=1}^j (l'_i - l) \quad (5.3)$$

リンク長を関節間距離としたときの多関節リンクの全長に対する水圧による手

先誤差を図 5.1 に示す. リンク材質は Ti-6Al-4V とし, リンク内径は 21mm, 外径は 26mm として計算を行った. 水深が深くなるにつれ誤差は増加するが, 水深 500m ほどでは水圧によるリンクの変位は 8mm ほどであり, 水深に対する割合で見ると 0.0017%程度である. 水圧によるひずみの計測精度への影響は小さいと考えられる.

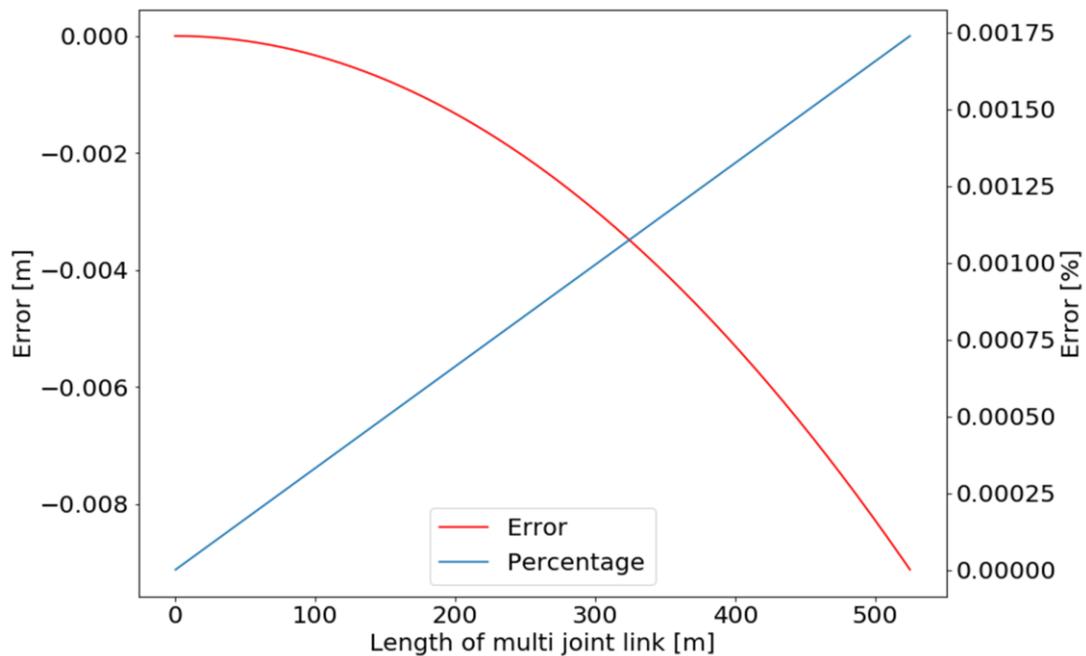


Fig. 5.1 Position error caused by water pressure

5.2 流れによる影響

水中環境中の流れによりリンクが受ける抗力の影響について考察する。水中 3 次元測定器の運用方法としては、関節のアクチュエータを用いて能動的にリンク姿勢を制御する方法、及び受動関節とし水中ロボットの推進器による移動を任せする方法がある。本節ではそれぞれの運用方式での流れの影響について考察する。

5.2.1 水中環境の流れ

水中環境における流れとしては、風、水の温度差を要因とする地球規模の海水の循環である海流と、潮汐により生じる海水の流れであり一日の変動が大きな潮流が考えられる。これらは地域、また水深によりその流速は異なる。文献を参考にすると、潮流は日本では強いところで鳴門海峡があり、5.2m/s 程度^[56]である。また海流である黒潮の観測例^{[57],[58]}では、表層付近で流速が大きくおよそ 1.0m/s ほどであり、水深に連れて小さくなり、1000m 以降ではごく弱い流れになっている。このように実環境の流れは多様かつ複雑な流れをもつが、本章では、水中 3 次元測定器の流れに対する基本的な性質を考察するため、上述の流速以下であり、水深に対して一様な流れを想定して考察を進める。

5.2.2 能動関節の場合

リンクを能動的に駆動するには流れの抗力に対抗する関節トルクとこれに耐えるリンク構造が必要となる。また必要トルクはリンク長さに伴い増加する。能動駆動可能な条件について考察する。

流れの中で必要な関節トルクはリンク姿勢により異なるが、ここでは流れの中でリンク姿勢を鉛直に保とうとする条件を考える。リンクは中性浮力に調節するものとし、また水中ロボットに働く抗力は推進器により対抗するとして考慮しないとする。1つのリンクを関節機構と円筒部から構成される円柱とすると、加わる抗力は次式で得られる。

$$D = \frac{1}{2} \rho C_d l d v^2 \quad (5.4)$$

ρ は流体の密度、 C_d はリンクの抗力係数、 l はリンク全長、 d はリンク径、 v は流速である。円柱の抗力係数は図 5.2 より得られる。想定する流速を 0.05m/s から

1.0m/s 程度，リンク径を 0.03m ほどとすると，レイノルズ数は

$$Re = \frac{uL}{\mu} \quad (5.5)$$

より，およそ 10^3 から 10^4 の大きさであるから，抗力係数 Cd は本節では図 5.2 より 1.2 とした．流速一様の条件では，リンク長さを一定とすると抗力はリンク径の変数 $D(d)$ とすることができる．抗力によりリンク及び関節に生じるトルクは根元に向けて大きくなるため，これに耐えるリンク円筒部の外径は根元ほど大きくなる．このためリンクごとに重量が異なり，中性浮力とするには各リンクの重量に見合った浮力材を備える必要がある．浮力材は密度が 1 以下であり目的の水圧に耐え，水中機器の水中重量を低減する目的で利用される．代表的なものにシンタクチックフォームやガラス球がある^[59]．ここではリンクを覆う形で比重 0.5 のシンタクチックフォームを付加する．したがって，流れの抗力はリンクに付加した浮力材の外径により決定される．実際の構造では関節部で浮力材が円筒形状とならない箇所が想定されるが，本計算では考慮しない．手先から k 番目の関節の抗力によるモーメントを次式から得る．

$$M_k = \sum_{i=0}^k \left(i + \frac{1}{2} \right) \times l \times D(d_{k-i}) \quad (5.6)$$

続いて上記トルクを受ける円筒部の曲げ応力が許容応力以下となる肉厚と，そのリンク重量を中性浮力とする浮力材外径を求める．これをリンク手先から根元へ向けて順次計算した．浮力材の外径 D は式より得た．

$$D = d_o + \sqrt{\frac{4m}{l \times (\rho_{aq} - \rho_b) \times \pi}} \quad (5.7)$$

$$m = m_j + \left(\frac{d_o^2 - d_i^2}{4} \right) \times \pi \times l_r \times (\rho_r - \rho_{aq}) \quad (5.8)$$

ここで， ρ_{aq} ， ρ_r ， ρ_b はそれぞれ流体，リンク円筒部，浮力体の密度である，また m_j は関節機構の水中重量である．本計算では試作機を参考に 0.26kg とした．関節機構もリンク円筒部と同様にモーメントを受けるが，本計算では関節機構はこれに耐えるとし計算を行った． l_r はリンク円筒部の長さであり，リンク全長から関節

機構の長さ l_i を引いた長さである。本計算では $l_i = 80\text{mm}$, $l_r = 920\text{mm}$ とし、リンク全長 l を 1000mm とした。リンク材質を密度 4430kg/m^3 のTi-6Al-4Vとしたときの計算結果を図に示す。計算条件としては、リンク内径 d_i を 21mm , リンク外径 d_o の初期値を 26mm , 流体密度を 1030kg/m^3 , 安全率を2とした。

図5.3に水深ごとのリンク根元に作用するモーメントを、図5.4にこのモーメントに耐えるリンク径を示す。水深 500m では流速 0.05m/s で 20kNm , 流速 0.1m/s では 160kNm と大きなモーメントに耐える必要があることがわかる。市場にある大トルクを発生するモータをリンクの必要トルク上に示すと図5.4のようになる。発生トルクのみに着目すると、 0.05m/s 程度の流れにおいては水深 450m 程度での駆動トルクが得られるが、モータ寸法と重量が大型となり現実的ではないと考えられる。

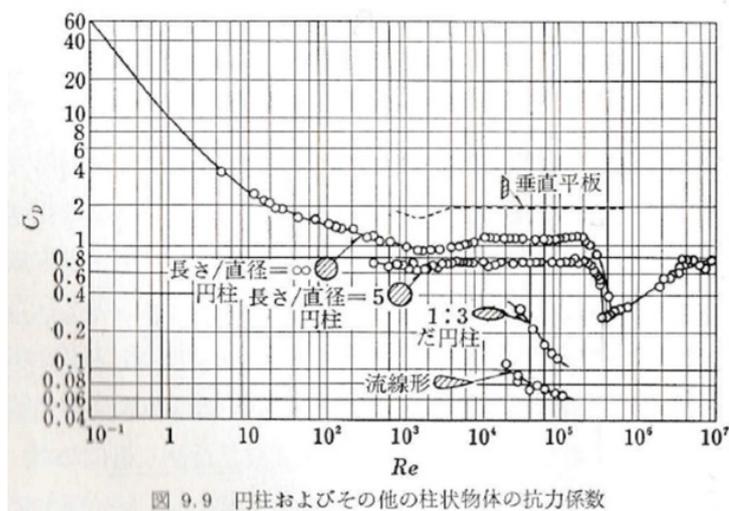


図 9.9 円柱およびその他の柱状物体の抗力係数

Fig. 5.2 Drag coefficient of cylinder^[60]

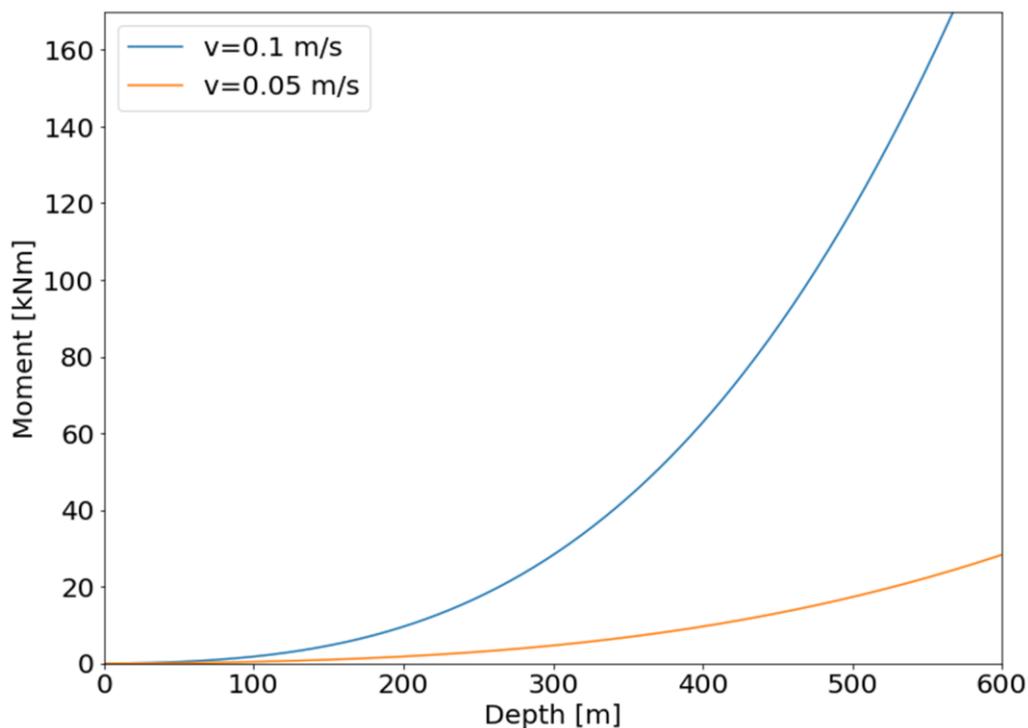


Fig. 5.3 Moment effecting for link in water current

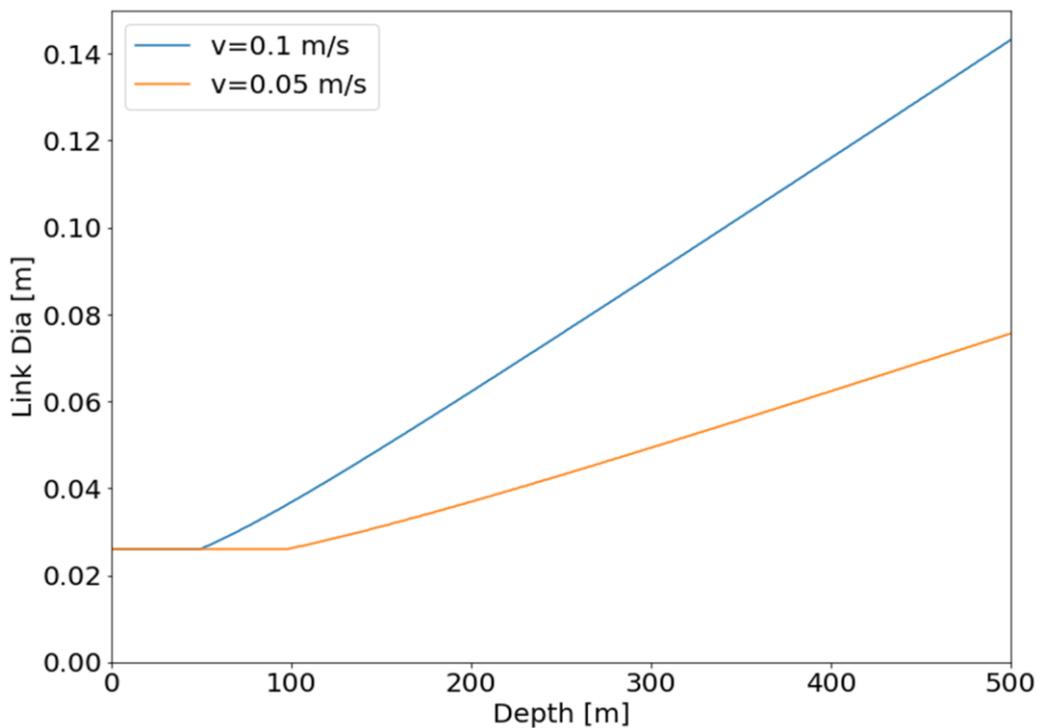


Fig. 5.4 Link diameter withstand water current

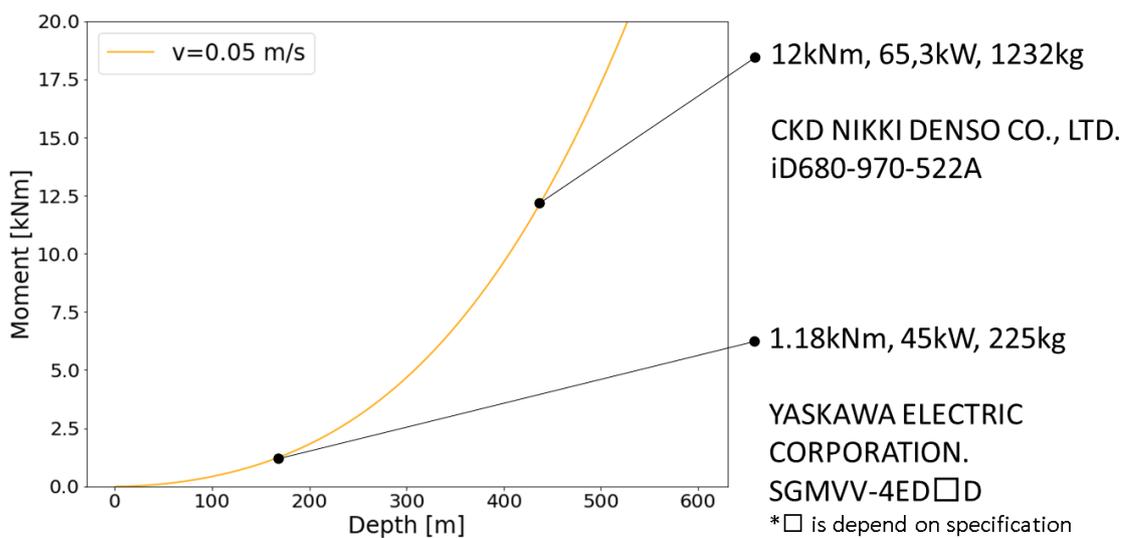


Fig. 5.5 Motors for joint actuation^{[61],[62]}

5.2.3 受動関節の場合

リンクを受動関節とした場合の流れの影響を考察する．受動関節とした場合には手先位置は水中ロボットの移動により操作され，リンクに加わる抗力はロボットが受け持つことになる．水中ロボットに必要な推力について考える．

流れを受ける柔軟なケーブルの形状推定として，水中の観測装置であるカメラやセンサ類を搭載した曳航体を船舶で曳航する際のケーブルの挙動に関する研究^[63]がある．水中ケーブルは図 5.6 に示すように有限長さの剛棒が多数接続されたものとしてモデル化されており，剛棒に加わる抗力のつり合いにより流れの中におけるケーブル形状を求めている．本節ではこの手法を用いて考察を進める．

つり合い式は手先を起点とし，根元側へと順次求めていく．簡単のため深度と水平方向の平面で考える．水中ロボットが発生する x , y 方向のけん引力を F_x , F_y とすると，これと釣り合う力とその向きは，

$$T = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (5.9)$$

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{F_y}{F_x}\right) + \pi \quad (F_x > 0 \text{ のとき}) \quad (5.10)$$

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{F_y}{F_x}\right) \quad (F_x \leq 0 \text{ のとき})$$

より得られ，これがロボットに接続されるリンクに働く軸方向の力とリンクの向きとなる．このリンクに働く抗力の x , y 方向を参考文献^[63]よりそれぞれ，

$$D_x = -(1 - \mu - \gamma) \times R \times \sin^3(\theta) - (\mu + \gamma \times \sin(\theta)) \times R \quad (5.11)$$

$$D_y = (1 - \mu - \gamma) \times R \times \sin^2(\theta) \times \cos(\theta) \quad (5.12)$$

$$R = \frac{1}{2} \rho C_d d l v^2 \quad (5.13)$$

μ : Friction ratio ($0 \leq \mu \leq 1$) , γ : Form ratio ($0 \leq \gamma \leq 1$)

とすると，続いて接続されるリンクのつり合い条件は

$$T = \sqrt{(F_x + D_x)^2 + (F_y + D_y)^2} \quad (5.14)$$

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{F_y + D_y}{F_x + D_x}\right) + \pi \quad (F_x > 0 \text{ のとき}) \quad (5.15)$$

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{F_y + D_y}{F_x + D_x}\right) \quad (F_x \leq 0 \text{ のとき})$$

となる．このように，手先 2 番目より k 番目のリンクの張力および姿勢は力のつり合いより以下の様に求められる．

$$T_k = \sqrt{\left(F_x + \sum_{i=1}^{k-1} D_{xi}\right)^2 + \left(F_y + \sum_{i=1}^{k-1} D_{yi}\right)^2} \quad (5.16)$$

$$\theta_k = \text{atan}\left(\frac{F_y + \sum_{i=1}^{k-1} D_{yi}}{F_x + \sum_{i=1}^{k-1} D_{xi}}\right) + \pi \quad (F_x > 0 \text{ のとき}) \quad (5.17)$$

$$\theta_k = \text{atan}\left(\frac{F_y + \sum_{i=1}^{k-1} D_{yi}}{F_x + \sum_{i=1}^{k-1} D_{xi}}\right) \quad (F_x \leq 0 \text{ のとき})$$

各リンクの姿勢および長さから，流れの中での多関節リンクの形状を得る．

上記手法より水中ロボットに求められる推力を求める．条件としては，水面の固定座標からリンクが挿入されているとし，その鉛直下の任意の水深にロボットが位置保持するとき水中三次元測定器の抗力への対抗に必要な x , y 方向の推力を求める．上述の手法はまずロボットの推力が決定されてから根元位置が定まるため，二分法により水中ロボットの位置が目標位置より $\pm 0.1\text{m}$ 以内となる推力を求めた．また，水中三次元測定器の抗力は目標水深が同一でも水中に挿入するリンク長により異なる．このためリンクの接続数を複数変化させ，必要な推力の x 方向， y 方向の合力が小さくなる条件を用いた．図 5.7 に水深 500m までの流速 0.05, 0.1, 0.5 m/s と変化させた場合の水中ロボットに必要な推力を示す．能動駆動の際と同様にリンク全長を 1000mm，関節機構の長さを 80mm とし，リンク円筒部の外径は 26mm とした．リンク円筒部の重量と水中重量 0.26kg の関節機構と釣り合う比重 0.5，外径 59mm の浮力材をリンクに付加した．流体密度を 1030kg/m^3 ，また $\mu = 0.75$ ， $\gamma = 0$ とし計算を行った．遠隔操縦型的水中ロボットは水中ケーブルを備えるが，中型の機種のカابل外径はおよそ 10~20mm 程度と付加する浮力体外径よりも小さく，水中 3 次元測定器ではより大きな抗力を受ける．水深および流速に伴って必要推力が増加することがわかる．現在市場にある 1000m 以内の水深で利用される中型の ROV の推力を表 5.1 に示す．機種によるが前進方向では 200~1000N 程の推力を発生することができる．図と比較すると，流速 0.05m/s と 0.1m/s の計算結果においてロボットは水中 3 次元測定器の抗力への対抗に必要な推力に

対して十分余裕を持っていることがわかる。一方、流速が 0.5m/s になると大きく必要な推力が増加し、表中の推力の大きな機種でも水深 200m ほどで水中 3 次元測定器の抗力への対抗に必要な推力がロボットの発生推力を越えることがわかる。抗力増加は中性浮力とするための浮力材によるリンク外径の増大に起因するため、ROV の行動制限を抑えるには、できるだけリンク及び関節機構を軽量の設計とし、必要な浮力材を抑える事が必要である。また流れによる ROV へ影響を低減する手法として、深海用 ROV では船舶から水中ロボットまでの中間位置までにランチャーと呼ばれる水中重量を持つ機材が設置する方法がある。この方法と同様に、水中 3 次元測定器においても、表層から中層までのリンクに浮力材を付加せず、自重が作用する設定とすることで、ROV に伝わる抗力をリンクの自重で低減する手法が考えられる。

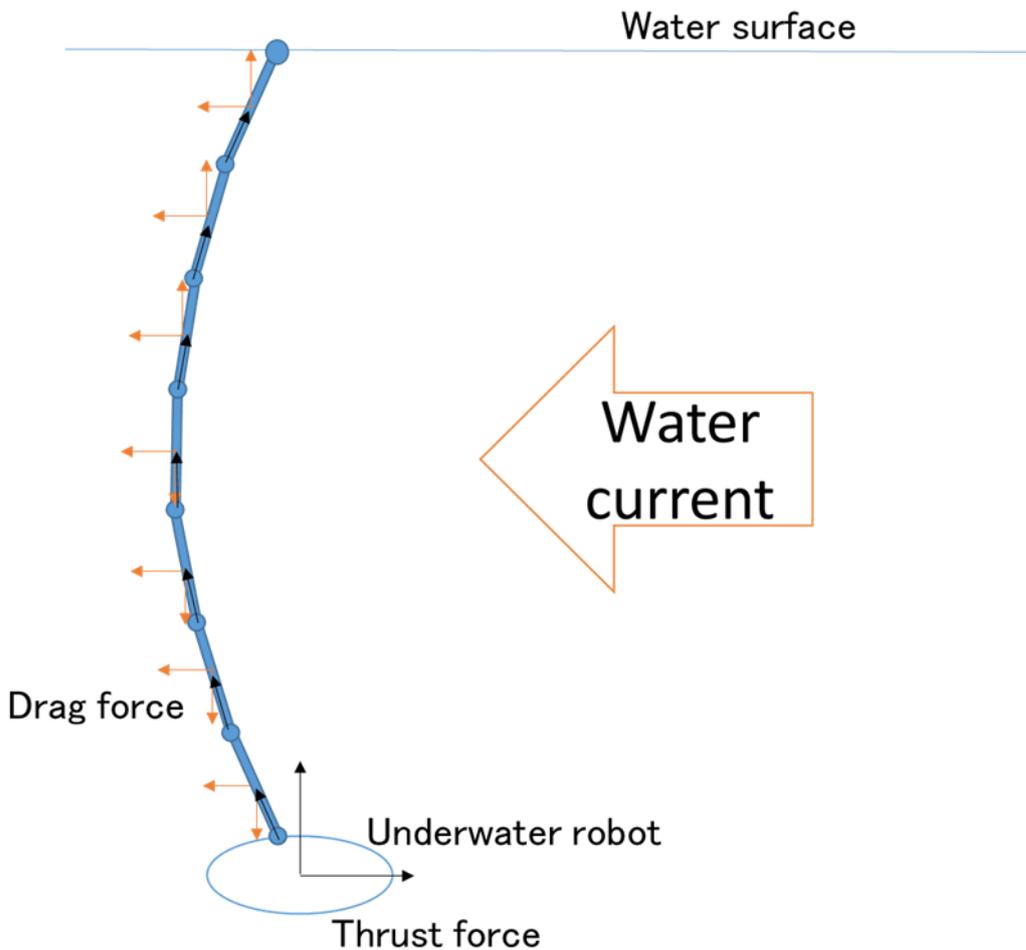


Fig. 5.6 Lumped mass model of underwater cable

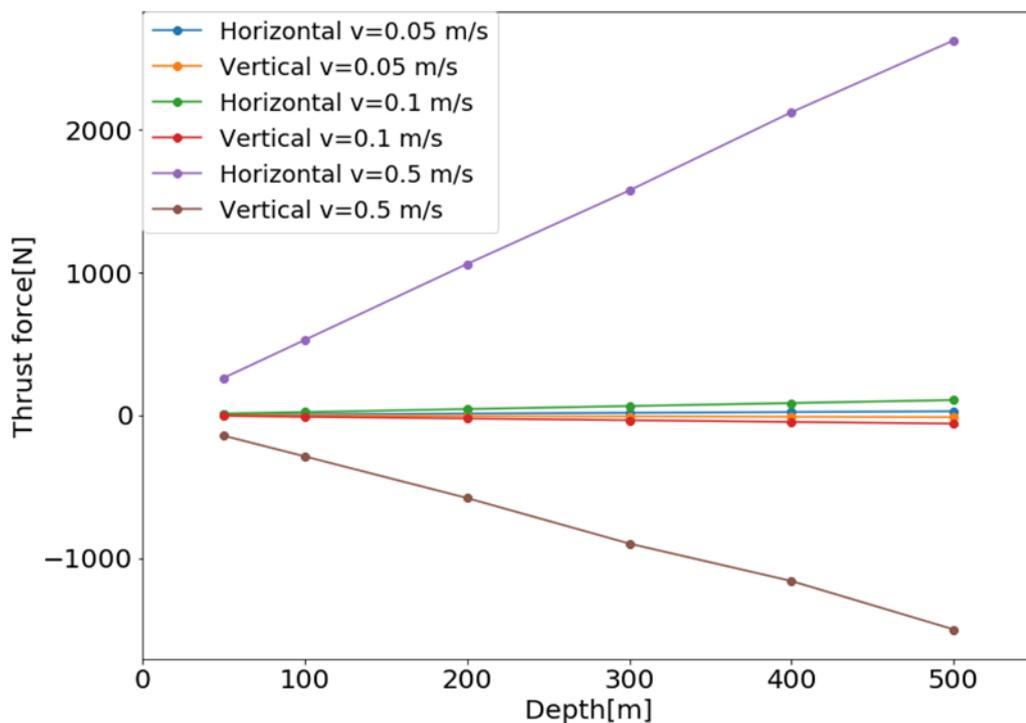


Fig. 5.7 Required thrust force for underwater robot

Table 5.1 Specification of ROV in market

Manufacturer	Model	Depth rating [m]	Weight [kg]	Thrust force Forward [N]
Saab Seaeye Ltd ^[64]	Falcon	300	60	491
Deep Ocean Engineering, Inc. ^[65]	PHANTOM T5	300	39.5	618
VideoRay LLC ^[66]	Defender	400	17.2	262
Rovotics ^[67]	SHARK G2R ROV	500	140	785
Deep Ocean Engineering, Inc. ^[68]	PHANTOM L6	500	97.5	667
Shark Marine Technologies Inc. ^[69]	Sea Wolf 5	600	95	589
TELEDYNE MARINE ^[70]	vLBV950	950	18.1	221
Submersible Systems Inc. ^[71]	TRV-005	1000	250	1022

5.3 まとめ

水中 3 次元測定器を実環境で運用する際には水深に伴う水圧，また海流と潮流による流れから受ける抗力を受ける．これらの影響について考察した．

水圧による影響としては，リンク構造のひずみによる運動学パラメータの変動による誤差が考えられる．リンク材質を Ti-6Al-4V，リンク内径 21mm，外径 26mm とし，リンクを鉛直に下げた姿勢を想定し，各リンクに生じるひずみの積算による手先位置の誤差を求めた．水圧は水深に比例するために，ひずみによる誤差は大深度ほど大きくなるが，500m 付近においても，水深の 0.0017%程度と影響は小さい．

リンクが受ける流れの影響として，リンク機構の関節を能動的に駆動する場合と，受動関節とする場合について考察した．能動関節とする場合には，リンクおよび関節は流れにより生じるモーメントに耐える必要がある．ひずみと同様にリンクを鉛直に下げた姿勢を想定し，流れの中でその姿勢を保つ条件を想定すると，大水深においては大きなモーメントがリンクに生じる．流速 0.05m/s の条件では水深 450m 程度まで，これに相当するトルクを発生するモータの存在を確認できるが，寸法と重量が大型となり現実的ではないと考えられる．

また受動関節とした場合にはリンクに作用する抗力を水中ロボットが受け持つ形になる．ロボットに必要な推力を，各リンクに働く抗力とロボットの推力のつり合い式により求めた．適用水深 1000m までの中型 ROV の推力を調査したところ前進方向の推力は概ね 200～1000N 前後であり，水中 3 次元測定器に接続されるロボットがこの水準の推力を持つとすると，流速 0.05，0.1m/s では推力に余裕があり，流速 0.5m/s では水深 200m 以上で水中 3 次元測定器の抗力への対抗に必要な推力が，ロボットの発生推力を越えるという結果が得られた．

第6章 結言

6.1 各章のまとめと結言

第1章では水中環境の調査・開発で重要となる水中ロボットの用途および種類について解説した。そしてその重要技術の一つである位置把握技術について、現在主流の方法である音響測位装置と慣性航法装置を中心に解説した。慣性航法装置には時間経過に伴う位置ドリフトが避けられないこと、また音響測位装置においては音波が遮られる入り組んだ環境では位置計測ができないという課題に触れた。これを踏まえ新しい位置計測方法として、計測対象である水中ロボットと水面上の基準を多関節リンクで接続し、機構の運動学から基準からの相対座標を得る水中3次元測定器を提案した。本手法では位置ドリフトがなく、また内界センサ情報で計測可能なため入り組んだ場所でも計測の安定性に影響が出ない。また多関節リンク機構による計測装置としては陸上では3次元測定器があり、精密な物体形状計測装置として実用されており、本手法でも高い精度の位置把握が期待できる。

第2章では水中3次元測定器の中心となる多関節リンク機構の構造に関する検討を行った。多関節リンク機構に求められる機能として、リンク構造をとること、関節の駆動と角度計測、計測情報の通信機能、加えて水中の機器であることから耐水圧性、防水性を持つことが必要であることを述べ、水中機器に用いられる要素技術について解説した。そして、水中3次元測定器の運用環境には様々な水深が想定されることから、リンクを1リンクごとに上記の必要機能を備えたユニットを順次接続することとしその基本構造を示した。続いて水中3次元測定器で得られる計測精度を検討するため、エンコーダ分解能に起因する計測誤差を計算し、市場にあるSSBLの精度との比較を行った。水中3次元測定器の計測誤差はリンク全長が長く関節数が増加するにつれて誤差増加の割合が増え、SSBLは計測距離に対して一定の割合の誤差が生じる。このため、水中3次元測定器は水深が浅く関節数が少ないほど、精度面では利点となることがわかった。

第3章では水中3次元測定器の精度に関する実験的な研究のため、2章で示した

基本設計をとる多関節リンク機構の試作機を製作した。試作機は5関節を持ち全長1.9m,重量約3kgほどである。各関節角度はロータリエンコーダで計測され、マイコンを通じてCAN通信で水上の機器に伝送される。

第4章では製作した試作機の精度評価を行った。まずリンク機構による位置計測のためDH記法に基づく運動学を定義し、運動学のDHパラメータのキャリブレーション手法について述べた。続いて試作機を用いて陸上環境、水中環境で実施したキャリブレーションを行った。キャリブレーション後の計測精度としては水中での計測精度が陸上での計測結果に対して良好であった。この要因としてはリンクが水中での浮力を受け自重が低減されたことにより、たわみが減少したことが考えられる。水中での計測における精度は平均誤差で1.5mmが得られた。キャリブレーションの結果より、DHパラメータのキャリブレーションでは補正できないたわみや機構のガタによる誤差の存在が考えられるため、計測精度の向上のため人工ニューラルネットワークを用いた計測誤差の補正を行った。入力層に五つの関節角度を入力し、隠れ層は4層で175個のニューロンを持ち計測誤差の x , y , z 方向を出力するネットワークに運動学の計測誤差を学習させ、運動学の誤差補正を行った。これにより平均で51.0%の誤差低減が行えた。ニューラルネットワークはその構成により性能が変わる。そこで隠れ層の層数およびニューロンの数を変化させ、誤差推定性能の変化を評価した。結果としては1層と2層以上で異なる傾向を示し、1層ではニューロン数が少ない場合に誤差推定性能が2層以上に比べ低く、ニューロン数が275個程度と大きくなると、2層以上のネットワークと同等の誤差推定性能となった。2層以上のネットワークでは、ニューロン数25個程度まではニューロン数につれて性能は増加したが、それ以上では大きな変化はない。また2層以上の層数における推定性能は大きく変わらない結果となった。ニューラルネットワークの学習には訓練データが必要であるが、学習データは実験的に得る必要があり時間を要する。そこで必要なデータ数を把握するため学習に用いるデータ数を変化させ推定性能を評価した。データ数の増加に伴い性能は向上するが、その向上率はデータが多くなるにつれて低下した。データ数としては6×42点以下で性能低下が顕著であるため、本条件においてはこれ以上のデータ数で学習を行うことが望ましいことがわかった。

第5章では水中3次元測定器を実環境で運用する際に想定される水圧、流れの影響について考察した。水圧による影響としては、リンク構造のひずみによる運動学パラメータの変動による誤差が考えられる。リンク材質をTi-6Al-4V、リンク内径21mm、外径26mmとし、リンクを鉛直に下げた姿勢を想定し、各リンクに生じるひずみの積算による手先位置の誤差を求めた。計算結果としては、水深500m付近でのひずみによる誤差は水深の0.0017%程度とその影響は小さい。

流れの影響としては、リンク機構の関節を能動的に駆動する場合と、受動関節とする場合について考察した。能動関節とする場合には、リンクおよび関節は流れにより生じるモーメントに耐える必要がある。ひずみと同様にリンクを鉛直に下げた姿勢を想定し、流れの中でその姿勢を保つ条件を想定すると、大水深においては大きなモーメントがリンクに生じる。流速0.05m/sの条件では水深450m程度まで、これに相当するトルクを発生するモータの存在を確認できるが、寸法と重量が大型となり現実的ではないと考えられる。

また受動関節とした場合にはリンクに作用する抗力を水中ロボットが受け持つ形になる。ロボットに必要な推力を、各リンクに働く抗力とロボットの推力のつり合い式により求めた。適用水深1000mまでの中型ROVの推力を調査したところ前進方向の推力は概ね200~1000N前後であり、水中3次元測定器に接続されるロボットがこの水準の推力を持つとすると、流速0.05、0.1m/sでは推力に余裕があり、流速0.5m/sでは水深200m以上で水中3次元測定器の受ける抗力への対抗に必要な推力が、ロボットの発生推力を越えるという結果が得られた。

以上各章の結果より本研究で提案する水中3次元測定器は、浅い水深ほど精度が良好となる、流れ中での関節の能動駆動には大きなトルクが必要となり現実的でない、また受動駆動とした際には水中ロボットがリンクに働く抗力を受け持つが、中型ROVを想定した場合にはリンク径が59mm、流速0.5m/sでは水深200mほどでリンク機構の受ける抗力がロボットの発生推力を越える事がわかった。この結果より、水中3次元測定器は比較的水深が浅く、流れの緩やかもしくは存在しない環境での運用が適しているといえる。このような条件としては、港湾をはじめとする沿岸の人工構造物やダム、貯水槽が考えられる。このような人工構造物には入り組んだ構造や周囲が構造物で囲まれている等、音響測位装置では音波の遮

断やマルチパスにより計測が難しくなることが想定されるが，水中 3 次元測定器は内界センサのみでロボットの位置計測を行うためこうした環境化でも安定した計測が行えるため，既存手法に対して利点がある．

6.2 今後の展望

水中 3 次元測定器に関する基礎研究により，多関節リンク機の構成，試作機を用いた計測精度の評価，及び水中環境で装置が受ける影響についての知見を得た．今後の展望としては，実運用を見据えた際の課題解決が挙げられる．

実環境での計測では多関節リンク機構は試作機よりも大きな関節数とリンク全長を持つことになる．このときのキャリブレーションの実施が課題となる．実環境と同等の水深を持つプールを用意することは困難であるため，適当な長さで分割したリンク機構を別々にキャリブレーションする手法が考えられる．一方で，キャリブレーションのための計測作業が増大してしまう．このため，運用の容易さを考えると，リンク機構を運用現場で事前にキャリブレーションできることが望ましい．

計測誤差の補正にニューラルネットワークを用いたが，このネットワーク構成も対象のリンク機構の関節数によって最適な設計があると思われ，関節数の変化と最適なネットワーク構造の関係に関する研究が必要である．

実運用に際しては，水面上の支援装置の検討も必要である．計測中のリンク機構は余分な長さを水中に挿入すると，流れの影響，関節の誤差による測定精度の劣化が生じる．このため水面から適切な長さを送り出すよう調節する必要がある．リンクの根元は既知座標に固定する必要があることから，リンクの送り出し量に応じて，都度根元となるリンクを固定しなおす機構が必要である．また，水面上に準備したリンクは嵩張らないように収納する必要がある．

参考文献

第1章

- [1] 内閣府，次世代海洋資源調査技術 研究開発計画，
内閣府ホームページ，
http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/5_kaiyou.pdf.
(参照日 2018 年 11 月 23 日)
- [2] 熊谷道夫，石川可奈子，焦春萌，ロス・ウオーカー，“自律型潜水ロボット「淡探」を用いた琵琶湖研究の高度化と展望”，日本造船学会誌，Vol. 883 (2005)，pp. 52-56.
- [3] 野上建紀，“水中文化遺産の公開と活用について”，金沢大学考古学紀要，Vol. 29 (2008)，pp. 42-53.
- [4] D. Hiranandani, C. White, C. Clark, T. Gambin, K. Buhagiar, “Underwater robots with sonar and smart tether for underground cistern mapping and exploration”, *The 10th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST (2009)*, http://www.hmc.edu/lair/publications/2009/hiranandani_VAST_2009.pdf.
(参照日 2018 年 11 月 23 日)
- [5] 国土交通省，平成 25 年度国土交通白書 (2014)，p. 34，日経印刷.
- [6] 角哲也，“次世代社会インフラ用ロボット開発・導入の推進—水中維持管理部会における現場検証の紹介—”，日本ロボット学会誌，Vol. 34, No. 8 (2016)，pp. 497-502.
- [7] 浦環，高川真一，海中ロボット総覧，初版 (1994)，pp. 1-6，成山堂書店.
- [8] 青木太郎，“深海巡行探査機の研究開発”，電気通信大学紀要，Vol. 19, No. 1-2 (2006)，pp. 7-17.
- [9] 中谷武志，浦環，坂巻隆，“自律型海中ロボット「TUNA-SAND」”，日本マリンエンジニアリング学会誌，Vol. 43, No. 4 (2008)，pp. 69-72.
- [10] 笠谷貴史，月岡哲，山本富士夫，百留忠洋，澤隆雄，吉田弘，石橋正二郎，田原淳一郎，木下正高，青木太郎，“深海巡航 AUV「うらしま」によって得られた相模湾初島沖の海底地すべり音響イメージ”，海洋調査技術，Vol. 19, No. 2 (2007)，pp. 11-17.
- [11] 巻俊宏，松田匠未，久米絢佳，佐藤芳紀，坂巻隆，浦環，“複雑な海底環境の画像観測用 AUV「Tri-TON」の開発”，第 23 回海洋工学シンポジウム (2012)，OES23-047.

- [12] 卷俊宏, 近藤逸人, 浦環, 能勢義昭, 坂巻隆, “自律型水中ロボットによる人工構造物の観測”, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 1 (2005), pp. 17-26.
- [13] 白崎勇一, “AUV (自律航行型潜水ロボット) の運用技術”, 日本航海学会誌 NAVIGATION, Vol. 158 (2003), pp.66-75.
- [14] 卷俊宏, “水中ドローン～ローコスト AUV は使い物になるか～”, 沖シーテック ニュースレター「海」, No.33 (2017) , pp. 14-18.
- [15] 海洋研究開発機構, “新型無人探査機機体名称の決定について”, 海洋研究開発機構ホームページ,
https://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20131129/. (参照日 2018年 11月 23日)
- [16] VideoRay LLC, “VideoRay Aquaculture Images”, VideoRay LLC Home page, http://www.videoray.com/aquaculture-photo-gallery.html#!AQUA_SKAUGE1. (参照日 2018年 11月 23日)
- [17] 海洋研究開発機構, “JAMSTEC 画像ギャラリー うらしま-01”, 海洋研究開発機構ホームページ,
<http://www.jamstec.go.jp/gallery/j/ship/urism/001.html>. (参照日 2018年 11月 23日)
- [18] Nishida, Y., Tamaki, U., Nakatani, T., Sakamaki, T., Kojima, J., Itoh, Y., Kim, K., “Autonomous Underwater Vehicle “Tuna-Sand” for Image Observation of the Seafloor at a Low Altitude”, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 26, No. 4 (2014), pp. 519-521.
- [19] 海洋音響学会, 海中音響の基礎と応用, (2009) , pp. 236-245, 成山堂書店.
- [20] EvoLogics GmbH, “Underwater Acoustic LBL Positioning Systems”, EvoLogics GmbH Home page,
<https://www.evologics.de/en/products/LBL/index.html>. (参照日 2018年 11月 23日)
- [21] LinkQuest, Inc., “TrackLink 1500”, LinkQuest, Inc. Home page,
http://www.link-quest.com/html/tl1500_hr.pdf. (参照日 2018年 11月 23日)
- [22] 海洋研究開発機構, “高性能小型慣性航法装置の開発に成功～国産技術の粋を結集した世界最高水準の高性能・小型軽量化～”, 海洋研究開発機構ホームページ,
https://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20111111_3/. (参照日 2018年 11月 23日)

- [23] 田中敏成, 加藤絵万, 野上周嗣, 平林丈嗣, “棧橋上部工点検用 ROV の提案と現場実証試験によるその運用支援機能の検証”, 港湾空港技術研究所資料, No. 1303 (2015) .
- [24] J.E. Frank, R. Geiger, D.R. Kraige, A. Murali, SMART TETHER SYSTEM FOR UNDERWATER NAVIGATION AND CABLE SHAPE MEASUREMENT, United States Patent No. US8,437,979 B2 (2013).
- [25] KCF Technologies, Inc., “SmartTether”, KCF Technologies, Inc. Home page, <https://www.kcftech.com/smartertether/>. (参照日 2019 年 3 月 17 日)
- [26] M. Rees, “KCF Technologies Celebrates ROV Smart Tether Milestone”, Unmanned Systems News
<https://www.unmannedsystemstechnology.com/2012/07/kcf-technologies-celebrates-rov-smart-tether-milestone/>. (参照日 2018 年 11 月 23 日)
- [27] FARO Technologies, Inc., “FaroArm”, FARO Technologies, Inc. Home page, <https://www.faro.com/ja-jp/products/3d-factory/faroarm/>. (参照日 2018 年 11 月 23 日)

第 2 章

- [28] 浦環, 高川真一, 海中ロボット総覧, (1994), p. 151, 成山堂書店.
- [29] 浦環, 高川真一, 海中ロボット総覧, (1994), pp. 152-154, 成山堂書店.
- [30] 浦環, 高川真一, 海中ロボット総覧, (1994), pp. 168-171, 成山堂書店.
- [31] 浦環, 高川真一, 海中ロボット総覧, (1994), p. 396, 成山堂書店.
- [32] 浦環, 高川真一, 海中ロボット総覧, (1994), pp. 156-157, 成山堂書店.
- [33] 浦環, 高川真一, 海中ロボット総覧, (1994), pp. 262-264, 成山堂書店.
- [34] iXblue, “Gaps”, iXblue Home page, https://www.ixblue.com/sites/default/files/datasheet_file/gaps_2018-08-29-final.pdf. (参照日 2019 年 3 月 20 日)
- [35] 浦環, 高川真一, 海中ロボット総覧, (1994), p. 136, 成山堂書店.
- [36] VideoRay LLC, “Product Data Sheet Mission Specialist PRO 4 Standard BASE”, VideoRay LLC Home page, http://www.videoray.com/images/specsheets/2018/2018_PRO_4_STANDARD_BASE.pdf.

(参照日 2019 年 3 月 21 日)

- [37] TELEDYNE MARINE “vLBV & vLBC”, TELEDYNE MARINE Homepage,
http://www.teledynemarine.com/Lists/Downloads/SeaBotix_vLBV300_vLBV950_Data_Sheet_2015-032715.pdf. (参照日 2019 年 3 月 21 日)

第 3 章

- [38] マイクロテックラボラトリー, “製品カタログ MAS-14-262144N1”, マイクロテックラボラトリーホームページ,
https://www.mtl.co.jp/dcms_media/other/MA14%E3%82%AB%E3%82%BF%E3%83%AD%E3%82%B0.pdf. (参照日 2018 年 11 月 23 日)
- [39] Pololu Corporation, “73:1 Metal Gearmotor 20Dx42L mm (Short Output Shaft)”, Pololu Corporation Home page,
<https://store.shopping.yahoo.co.jp/suzakulab/pololu-1163.html>. (参照日 2018 年 11 月 23 日)
- [40] ベクター・ジャパン株式会社, “はじめての CAN/CAN FD”, Vector Informatik GmbH Homepage,
https://assets.vector.com/cms/content/know-how/VJ/PDF/For_Beginners_CAN_CANFD.pdf. (参照日 2018 年 11 月 23 日)

第 4 章

- [41] 増田良介, 小金澤鋼一, 甲斐義弘, 新しいロボット工学, 初版 (2006), pp. 31-40, 昭晃堂.
- [42] 遠山茂樹, ロボット工学, (2009), pp. 22-37, コロナ社.
- [43] 日本ロボット学会, ロボット工学ハンドブック, (2005), pp. 645-648, コロナ社.
- [44] B.W., Mooring, Z.S., Roth, M.R., Driels, *Fundamentals of Manipulator Calibration*, (1991), pp. 1-18, John Wiley & Sons, Inc.
- [45] A.Y., Elatta, Li, P.G., Fan, L.Z., Yu, D., Luo, F., “An overview of Robot Calibration”, *Information Technology Journal*, Vol. 3, No. 1 (2004), pp.74-78.
- [46] Chunhe Gong, Jingxia Yuan Jun Ni, “Nongeometric error identification and compensation for robotic system by inverse calibration”, *International*

- Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 40, No. 14 (2000), pp. 2119-2137.
- [47] B.W., Mooring, Z.S., Roth, M.R., Driels, *Fundamentals of Manipulator Calibration*, (1991), p. 18, John Wiley & Sons, Inc.
- [48] B., Karlik., S., Aydin, “An improved approach to the solution of inverse kinematics problems for robot manipulators”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 13, No. 2 (2000), pp. 159-164.
- [49] X., Zhong, J., Lewis, Francis L.N.N., “Inverse robot calibration using artificial neural networks”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 9, No. 1 (1996), pp. 83-93.
- [50] Z., Bingul., H.M., Ertunc., C., Oysu, “Comparison of inverse kinematics solutions using neural network for 6R robot manipulator with offset”, *2005 ICSC Congress on Computational Intelligence Methods and Applications* (2005).
- [51] H.N., Nguyen, J., Zhou, H.J., Kang, “A calibration method for enhancing robot accuracy through integration of an extended Kalman filter algorithm and an artificial neural network”, *Neurocomputing*, Vol. 151, No. 3 (2015), pp. 996-1005.
- [52] A., Krizhevsky, I., Sutskever, G.E., Hinton, “ImageNet classification with deep convolutional neural networks”, *NIPS'12 Proceedings of the 25th International Conference on Neural Information Processing Systems*, Vol. 1 (2012), pp.1097-1105.
- [53] X., Glorot, A., Bordes, Y., Bengio, “Deep sparse rectifier neural networks”, *Proceedings of Machine Learning Research*, Vol. 15 (2011), pp.315-323.
- [54] D.P., Kingma, J.L., Ba, “Adam: A Method for Stochastic Optimization”, *3rd International Conference on Learning Representations* (2015).

第5章

- [55] 黒木剛司朗, 材料力学, (2006), p. 93, 森北出版
- [56] 吉田宏一郎, 海洋構造力学の基礎, (2010), pp. 45-46, 成山堂書店.
- [57] 道田豊, “ADCP データからみた黒潮の流速構造”, 水路部研究報告, Vol. 31 (1995), pp. 45-56.
- [58] 梶浦欣二郎, 海洋の動態, (1985), pp. 97-101, 恒星社厚生閣.

- [59] 浦環, 高川真一, 海中ロボット総覧, (1994), pp. 332-340, 成山堂書店.
- [60] 山中泰喜, 改訂版 流体の力学, (2006), pp. 138, 養賢堂.
- [61] CKD 日機電装株式会社, “ τ iD roll iD Series 大トルク・シリンダ型ダイレクトドライブモータ”, CKD 日機電装株式会社ホームページ, http://www.nikkidenso.co.jp/catalog/dl/tau_id_roll_201509_rev1.pdf. (参照日 2018 年 11 月 23 日)
- [62] 安川電機, “AC サーボドライブ 大容量 Σ -V シリーズ”, e-メカサイト, p. 8, http://www.e-mechatronics.com/download/datas/catalog/kajps80000086/kajps80000086g_8_0.pdf. (参照日 2018 年 11 月 23 日)
- [63] 山北和之, “没水型曳航体の曳航特性に関する研究 (第 1 報)”, 日本造船学会論文集, Vol. 1984, No. 156 (1984), pp. 207-215.
- [64] Saab Seaeeye Ltd, “SEAEYE FALCON & FALCON DR”, Saab Seaeeye Ltd Home page, https://www.saabseaeeye.com/uploads/seaeeye_falcon.pdf. (参照日 2019 年 1 月 25 日)
- [65] Deep Ocean Engineering, Inc., “PHANTOM® T SERIES”, Deep Ocean Engineering, Inc. Home page, <https://www.deepocean.com/pdf/t5.pdf> (参照日 2019 年 1 月 25 日)
- [66] VideoRay LLC, “Product Data Sheet Mission Specialist DEFENDER”, VideoRay LLC Home page, http://www.videoray.com/images/specsheets/2018/2018_MSS_DEFENDER_SPEC_SHEET.pdf (参照日 2019 年 1 月 25 日)
- [67] Rovotics, “SHARK G2R ROV”, Rovotics Home page, <http://www.rovotics.ae/shark-g2r-rov/> (参照日 2019 年 1 月 25 日)
- [68] Deep Ocean Engineering, Inc., “PHANTOM® L SERIES”, Deep Ocean Engineering, Inc. Home page, <https://www.deepocean.com/pdf/l6.pdf> (参照日 2019 年 1 月 25 日)
- [69] Shark Marine Technologies Inc., “Sea-Wolf 5: ROV”, Shark Marine Technologies Inc. Home page, <http://www.sharkmarine.com/products/rovs/sea-wolf-5/> (参照日 2019 年 1 月 25 日)
- [70] TELEDYNE MARINE “VLBV950”, TELEDYNE MARINE Homepage, <http://www.teledynemarine.com/vlbv950/?BrandID=19>. (参照日 2019 年 1 月 24 日)
- [71] Submersible Systems Inc., “TRV-005”, Submersible Systems Inc. Home page, <http://ssirovs.com/wp-content/uploads/2018/02/SSIROVsalesbrochure.pdf>. (参照日 2019 年 1 月 25 日)

謝辞

本研究をまとめるにあたり，東京農工大学大学院工学府機械システム工学専攻 遠山茂樹教授には，終始懇切丁寧なご指導，ご助言を賜りましたことを心から感謝申し上げます。

東京農工大学大学院工学府機械システム工学専攻 田川泰敬教授，鎌田崇義教授，和田正義准教授，水内郁夫准教授には本研究に対し有益なご助言をいただきましたこと厚くお礼を申し上げます。

東京農工大学大学院工学府機械システム工学専攻 西澤宇一産学連携研究員には，研究活動に関する様々なご指導をいただきましたことを感謝いたします。東京農工大学大学院工学府機械システム工学専攻 大下賢一助教には研究に際してご助言をいただきましたことお礼申し上げます。研究活動にかかわる様々なご支援をいただきました。遠山研究室 中山啓子秘書に厚く御礼申し上げます。

遠山研究室 OB の大橋太郎氏，伊藤万春氏，奥野真成氏，遠山研究室の博士課程 新家寿健氏，王富林氏，修士課程 2 年の萩野裕貴氏，学部四年の柳澤岳人氏には大変お世話になりました。心から感謝いたします。いろいろとご指導をいただいたすべての遠山研究室のみなさまに心から感謝します。

本研究活動の貴重な機会をいただく共に，様々なご配慮をいただきました株式会社キュー・アイのみなさまに，心から感謝いたします。