

水中ヴィークル・マニピュレータシステムの
外乱補償分解加速度制御に関する研究

平成21年12月

矢藤 孝

目次

第1章	緒論	1
1.1	本研究の背景	1
1.1.1	水中ロボットの必要性	1
1.1.2	水中ロボットの現状	2
1.1.3	本研究の目的	4
1.2	本研究の概要	6
第2章	UVMSの計算トルク法と分解加速度制御法	8
2.1	モデリング	9
2.1.1	運動学関係式および運動量方程式	12
2.1.2	運動方程式	16
2.1.3	2次元数学モデル	17
2.2	制御法	18
2.2.1	計算トルク法	19
2.2.2	分解加速度制御法	20
2.3	実験	21
2.3.1	実験システムの構成	21
2.3.2	実験結果	23
2.4	まとめ	29
第3章	ヴィークル外乱補償を付加したUVMSの離散時間分解加速度制御	30
3.1	離散時間分解加速度制御法	30
3.1.1	離散時間分解加速度制御	30
3.1.2	マニピュレータ特異姿勢回避	32
3.2	ベース外乱補償	32
3.3	実験	35
3.3.1	トルク型関節サーボ機構を有するロボット	35
3.3.2	速度型関節サーボ機構を有するロボット	36

3.4	まとめ	41
第4章	物体操作のためのUVMSの離散時間外乱補償分解加速度制御	42
4.1	ハンドを装備した2リンク水中ロボット	42
4.2	UVMSの外乱補償	44
4.3	実験	47
4.4	まとめ	51
第5章	結論	52
	謝辞	54
	参考文献	55

第1章 緒論

1.1 本研究の背景

1.1.1 水中ロボットの必要性

人類が極限環境である地球圏外へ足を踏み出してからまだ50年程であるが、近年、国際宇宙ステーションの建設・運用が始まるなど、宇宙開発は着々と進められている。一方、宇宙と同様に極限環境である海洋も、人類にとって身近にありながら、未だに謎の多い存在である。人類が生活の拠点としている陸地は地球表面の30%しかなく、また、平均標高は約800[m]であるが、海洋は地球表面の70%を占めており、平均水深は約3,800[m]もある。そこで、生産素材やエネルギーとしての鉱物資源や漁業を中心とした水産資源の確保、空港に代表される海洋構造物の建設といった空間利用など、海洋はさまざまな局面で利用されている。また、地震メカニズムの解明や地球温暖化現象などの地球環境変動の解明のための調査など、学問的見地から科学の発展に対する期待も大きい。しかしながら、高水圧、浮力に伴う重量の減少、非一様な複雑な流れ（海面付近の波、潮流など）、金属の腐食、電子機器の防水、有線または音波以外の電波不透過といった環境が、人類のさらなる海洋利用を阻んでいる。人間が直接水中で作業を行えるのは、海洋の平均水深3,800[m]に対してせいぜい水深数十m程度であるが、安全や作業効率の観点から人間に代わり水中で作業を行う水中ロボットの開発および運用が期待されている。水中ロボットの活躍が期待される場として、海や河川、湖などにおける産業的見地における開発や生態・環境調査などが挙げられるが、身近なところでは、水族館やプールなどの保守点検における利用も期待できる。また、原子力発電プラントのように放射線の危険がある環境や下水配水管といった非衛生的な環境の利用も挙げられる。

ところで、水中作業用ロボットと言っても、単にカメラやセンサを用いて調査、検査を行うものから、人間のように作業用アームを使用して複雑な作業を行うものまで、形態はさまざまである。特に、近年ではロボットに自律機能を持たせることに注力がなされており、実用化の段階にあるものもあるが、環境の特殊性から、高度な制御を行うことは容易ではない。マニピュレータを用いる作業はオペレータによ

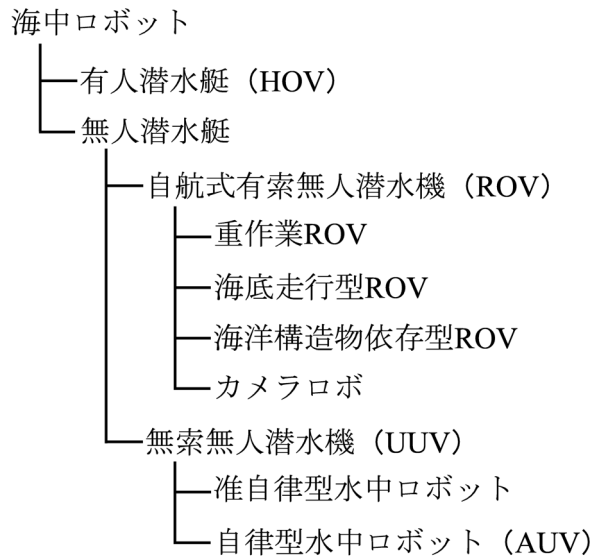


Fig. 1.1: Classification of underwater robot

る遠隔操縦が主流であるが，このような操作も，ロボットの自律化，自動化によって人間の負担を軽減することができるであろう。

ロボット技術は人類が培ってきた英知の結集の一つであると考えられる．本来，ロボットは人間の支援・代替を行うために開発されているものであるが，人間の生命にかかわる危険な環境でこそ，ロボット利用の価値を最大限に見出せるといっても過言ではない．また，安全性だけでなく開発を効率よく進めるためにも，水中ロボットの利用が必要不可欠であると考えられる．

1.1.2 水中ロボットの現状

海洋の観測や調査のために水中ロボットはなくてはならないものであり，特に，水中ロボットのニーズが高い海洋用としてさまざまな海中ロボットが開発されている．

海中ロボットの形態はさまざまであるが，Fig. 1.1 に示すように有人潜水艇と無人潜水艇に大別できる [1,2]．有人潜水艇 (HOV: Human Occupied Vehicle) は，オペレータが実際に乗り込んで潜行を行うものであり，「しんかい 6500」等，一般に大型のものが多く．一方，無人潜水艇 ROV (Remotely Operated Vehicle) は比較的小型であり，オペレータを危険にさらさないように遠隔操縦を行うものである．その中でも，無索で自律して行動を行う AUV (Autonomous Underwater Vehicle) や必要最小限の機能を搭載して人間が簡単に持ち運べる小型の LCROV (Low Cost Remotely Operated Vehicle) などが存在する．HOV はオペレータが直接現場に行くことがで

きるため、海洋研究・調査などにおいて利点がある。しかしながら、欠点としてオペレータの生命維持のための設備を搭載する必要があり、システムの大型化に伴う建造費や運行費用が問題となる。一方、ROVは建造費、運用費ともにHOVと比較して低コストであり、外部からの遠隔操縦であるため、長時間のオペレーションが可能という利点がある。また、大型化の原因の一つに挙げられる電源装置などを陸上のオペレータ側に設置できるため、潜行深度などの条件によっては、大幅な小型化が可能であり、近年では、有人潜水艇よりも、無人で自律機能を持ったロボットに関する研究や開発が行われている。

また、海中ロボットは構造的に母船と索(テザーケーブル)で接続されているかによって、有索機と無索機の二つに大別される [3]。有索機は、1960年初頭から米国により開発が行われ始めた。特に、オイルショックによる原油価格の高騰をきっかけに、1970年代から1980年の初めにかけての海底石油開発に対する大規模投資により、重作業用有索機(HD-ROV: Heavy Duty Remotely Operated Vehicle)の開発が米国や英国で盛んに行われた。なお、1986年の油価の暴落までに重作業ROVの原型は出来上がっている。その後、TV撮影のみを目的とした単機能のカメラロボが開発され、ROVの種類が増えた。また、光通信技術の開発により海底ケーブルの需要が増え、ケーブルを海底に埋設するための有索機の開発が行われるようになってきている。港湾建設や浚渫工事など、特殊用途に対するクローラ型の遠隔操縦機も作られ利用されているが、現状では搭載カメラによる作業となり作業海域の透明度の影響を大きく受ける [4] などの問題があり、例は少ない。

一方、無索機(UUV: Unmanned Untethered Vehicle)は、エネルギー技術と自動航行技術にボトルネックがあるが、電池技術とコンピュータ技術の発展に伴い1990年代に実用化への途をたどっている [5]。UUVは、音響通信を通じて必要最小限のデータを支援船間でやり取りしつつ重要な判断をオペレータに任せるシステムと、潜航開始から浮上終了までのすべての動作を支援母船上のオペレータに頼らずに行う、自律海中ロボット(AUV: Autonomous Underwater Vehicle)との二つに分けられる。海中においては、支援母船の利用に莫大な費用がかかるために、支援母船を拘束しない各種AUVの開発が行われており、海底近くや海の中層を長時間にわたって2~3ノットで航行して観測するAUVシステムが実用化され、観測や調査に利用されている。

さらに、海中ロボットを機能の面から大別すると、海洋を航行し、搭載されたカメラやセンサ等で海底調査および建造物の検査を行うものと、マニピュレータを搭載して一定の場所に留まり作業を行うものがある。海底調査および建造物の検査と

しては、従来のロボットによる画像観測はきわめて局所的であるため、現在、収録したカメラ画像から抽出した複数の静止画像を貼り合わせる画像マッピングの研究開発が活発に行われている [6].

一方、マニピュレータを搭載したロボットは、人間にとって危険な場所で代わりに作業を行うことが要求され、おもにロボットに搭載されたカメラ等からの情報をもとに、オペレータが支援母船上等の外部から遠隔操縦することによって作業が行われる。現状では、前述の特殊用途に対するクローラ型の遠隔操縦機と同様に作業海域の透明度の問題も存在し、また、操縦が容易ではないロボットを長時間操作することはオペレータにとってかなりの負担となる。ロボットが自律的に作業を行うことができれば、オペレータの負担を軽減することができると考えられる。地上用ロボットと同様に、完全自律化は現状では実現までの道のりはかなり遠いと考えられるが、作業の一部を自動化することができれば、オペレータ 1 人でも容易に作業できる可能性がある。

なお、国内では、通産省により 1983 年から 1990 年の 8 年間に渡って「極限作業ロボットプロジェクト」 [7] が推進され、そのプロジェクトの一つとして海洋ロボットの開発が行われた。ロボットのトータルシステムを構成する主要サブシステムとして、移動システム、マニピュレーションシステム、視覚システム等の研究開発が行われ、初期の目標に対して比較的良好な成果が得られているが実用面では未完成のままである。

1.1.3 本研究の目的

マニピュレータを搭載した水中ロボットの制御系開発の問題点は、流体中での浮遊環境下においてロボットを動作させると周囲の流体の影響を受けたり、マニピュレータを動かすとその反力、または重力・浮力のバランスによってもロボット本体が変動することである。特に、作業性能を向上させるためにマニピュレータを大きくすると、マニピュレータの反力が本体に及ぼす影響も大きくなる。したがって、作業のおもな動作であると考えられる手先の移動動作を行わせるにしても、以上のことを考慮した制御系を構成する必要がある [8, 9].

これまで、浮遊ロボットのマニピュレータの運動制御および本体の位置・姿勢制御に関する研究が数多く行われてきた。国内では、先駆的研究として、五百井ら [10, 11] による水中多関節マニピュレータのモデリングとその動的シミュレーションに関する報告がある。また、福田ら [12] の非線形流体力の適応補償制御をはじめ、小菅ら [13] の水面上に浮遊するヴィークル・マニピュレータシステムの研究、田口ら [14]

の冗長自由度を利用した水中浮遊マニピュレータの研究, 川島ら [15] の浮遊式平面 1 リンクアームの位置決め制御の研究, 足達ら [16] のモデル化および計算が複雑な流体力等の外乱補償制御の研究など, マニピュレータのベースが浮遊状態にある場合の運動制御法の提案がなされている. さらに, 著者らの研究グループも連続時間と離散時間の分解加速度制御法の提案と実験を行っている [17-27].

また, マニピュレータの性能の評価する基準として, 地上に固定されたマニピュレータの「作業領域」, 「可操作性」および「動的可操作性」という概念 [28] がある. 浮遊型水中用マニピュレータに対しては, 足達ら [29] が重力・浮力が作用しない環境下における作業領域や動的可操作性等の操作能力の評価に関する報告をしている.

ところで, 国外における研究状況へ目を転じると, 海洋調査などを目的とした水中ヴィークルのモデリングおよび制御法についての報告がある [30]. さらに, 1990 年代初頭の Maheshi ら [31] の先駆的な研究以来, 作業可能なマニピュレータを搭載した自律型水中ロボットシステム (UVMS: Underwater Vehicle-Manipulator System) のモデリングと制御に関する研究も行われている. UVMS のモデリングにはマニピュレータに作用する流体力のモデル化が必要不可欠であり, Lévesque ら [32] はマニピュレータに作用する, 移動速度の 2 乗に比例する流体抗力モデルを提案している. また, McLain ら [33,34] は水中ヴィークル OTTER に 1 リンクアームを搭載した実験的研究を行い, アームの運動によるヴィークルの変動を示すとともに, アームに作用する流体力として流体抗力に加えて加速度に比例する慣性力も考慮したモデルを提案し, そのモデルを用いた PID 制御実験を行っている.

UVMS のシミュレーションを目的とした動的モデリングの研究も行われており, McMillan ら [35] がニュートン・オイラー法による動的シミュレーションアルゴリズムを提案している. また, Tarn ら [36] は, スペースクラフトに対する動的モデリングの方法である Kane の方法 [37] を用いた UVMS の動的モデルを提案しているが, このモデルには加速度に依存する流体力は考慮されていない. なお, これらの動的モデリングはシミュレーションには有効であるが, 現在まで制御系設計に適用した例はない.

一方, UVMS の制御法は, 流体力を含む運動方程式を用いた計算トルク法が基本である. すなわち, 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, 運動方程式を用いてベースおよび関節の制御入力を決める. この計算トルク法を用いた制御法としては, マニピュレータ手先のインピーダンス制御法 [38], 適応制御法 [39-41] などが提案されている, また, マ

ニピュレータに作用する流体速度を推定する方法 [42], マニピュレータが受ける流体力を最適化する方法 [43], ベースに作用する力に基づいた方法 [44] なども提案されている。しかしながら, UVMS のモデリングおよび制御に関する実験的研究は McLain ら [33, 34] の 1 リンクアームを用いた研究以外見当たらない。

ここで, 浮遊環境としては水中の他に宇宙環境が挙げられる。これまで宇宙開発は海洋開発よりも大きな発展を遂げ, それによる宇宙ロボットの制御に関する研究も数多くなされてきた。先駆的な研究として, Vafa ら [45] は外力が作用しない系の質量中心が不変であることを利用した Virtual Manipulator という概念を提案している。梅谷と吉田 [46, 47] は運動量・角運動量保存則を用いてマニピュレータ先端のハンドのタスク空間とマニピュレータの関節空間の微分関係を記述する一般化ヤコビ行列を提唱し, それを用いて分解速度制御法を提案している。また, この一般化ヤコビ行列を用いて動力学を考慮した分解加速度制御法に関する報告 [48, 49] もある。一般化ヤコビ行列は, 浮遊剛体リンク系の基礎式として外力作用の有無にかかわらず, 重要な概念である [50]。そこで, 足達ら [51, 52] は, 流体力を考慮した動的な一般化ヤコビ行列を提案するとともに, UVMS の制御法を提案している。しかしながら, この動的な一般化ヤコビ行列は本来非線形系である UVMS の流体抗力などを線形近似して得られたものであり, また, その妥当性の検証はシミュレーションでしか行われていない。

1.2 本研究の概要

著者らの研究グループでは, 将来の実環境 (海洋, 湖沼など) 下で運用可能な水中作業用ロボットの開発を目指し, 実験装置を用いた UVMS の連続時間・離散時間分解加速度制御法の研究を行っている。本研究の目的は, UVMS に対する分解加速度制御法の有用性の検証ならびに, さらに良好な制御性能を得るための外乱補償を付加した分解加速度制御法の開発である。本論文で対象とする分解加速度制御法は, UVMS の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マニピュレータ関節の加速度制御入力を直接決定する方法である。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いるが, 本論文で取り扱う分解加速度制御法は, 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ている点に特徴がある。本論文では, まず, UVMS の基本制御法として提案されている計算トルク法の問題点を, 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明らかにするとともに, 分解加速度制御法の優

位性を示す，つぎに，分解加速度制御法さらに良好な制御性能を得るための外乱補償を付加した分解加速度制御法を提案するとともに，実験により提案制御法の有用性を示す．

本論文の概要を以下に述べる．

第2章では，これまで UVMS の基本制御法として提案されているが，実験による有用性が示されていない計算トルク法の問題点を，推進機構であるスラスタをロボットベースに実装して鉛直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を用いた実験により明らかにする．まず，シミュレーションでは，計算トルク法と分解加速度制御法は同程度の良好な制御性能を有することを示す．つぎに，2つの制御法を適用した実験により，計算トルク法ではマニピュレータ手先の制御性能はロボットベースの制御性能に依存するため，ベースの変動に対してロバストでないが，分解加速度制御法はベース変動の影響を十分抑制し，良好な手先制御性能を有することを示す [53]．

第3章では，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，外乱補償を付加した離散時間分解加速度制御法を提案する．まず，離散時間分解加速度制御法の構成を示すとともに，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，離散時間外乱オブザーバを提案する．つぎに，第2章で用いた水中ロボットのマニピュレータ関節がトルク型サーボ機構で駆動される場合と速度型サーボ機構で駆動される場合の実験をそれぞれ行い，ベース外乱補償を付加した離散時間分解加速度制御法の有用性を示す [54, 55]．

第4章では，トルク型関節サーボ機構を有する UVMS が物体を操作する場合のマニピュレータに作用する外力を考慮し，流体力も含めた UVMS 全体に作用する外力のモデル化誤差を外乱として取り扱う，外乱補償を付加した離散時間分解加速度制御法を提案する．まず，UVMS 全体に対する外力のモデル化誤差を外乱として取り扱う，離散時間外乱オブザーバを提案する．つぎに，マニピュレータ関節がトルク型サーボ機構で駆動される，物体捕獲用ハンドを装備した2リンク水中ロボットの物体捕獲実験を，外乱補償なしの場合と外乱補償ありの場合の両方行い，UVMS 全体に対する外乱補償を付加した離散時間分解加速度制御法の有用性を示す [56]．

最後に第5章では，本研究によって得られた成果をまとめる．

第2章 UVMSの計算トルク法と分解 加速度制御法

これまでUVMSに対して提案されている多くの制御法は、計算トルク法に基づいている。計算トルク法は、ロボットベースが地上などに固定されたロボットマニピュレータ関節の制御に広く用いられており、関節目標値に追従するための制御入力(関節トルク)を、関節位置と関節速度のフィードバックを付加した運動方程式より決定する方法である。したがって、計算トルク法は関節空間における制御法である。また、マニピュレータ手先の目標値が与えられる場合は、手先(作業空間)と関節(関節空間)の幾何学的関係(運動学)より、手先の目標位置・速度・加速度から関節の目標値を求めることにより、手先制御が間接的に実現される。したがって、作業空間と関節空間との幾何学的関係に計測誤差に基づく不確かさが存在する場合や、運動方程式にモデル化誤差が存在する場合、手先の制御性能は劣化する。水中ヴィークルがベースとなるUVMSに対して計算トルク法を適用した場合、マニピュレータ手先の制御性能は、計測誤差に基づく幾何学的関係の不確かさと流体力に関するモデル化誤差の影響を受けるとともに、ヴィークルの制御性能にも大きく依存する。しかしながら、実験による計算トルク法の有用性検証はこれまで示されていない。

UVMSの作業空間の誤差に基づく制御法として、著者らは分解加速度制御法を提案している。これは、作業空間におけるベースおよび手先の位置と速度のフィードバックを付加した目標加速度を、運動学関係式および運動量方程式に基づいて変換し、運動方程式より制御入力を決定する方法である。

ここでは、これまで実験による有用性検証が示されていなかったUVMSに対する計算トルク法と、著者らが提案している分解加速度制御法の制御性能の比較を、2リンク水中ロボットを用いた実験により行い、分解加速度制御法の有用性を示す。

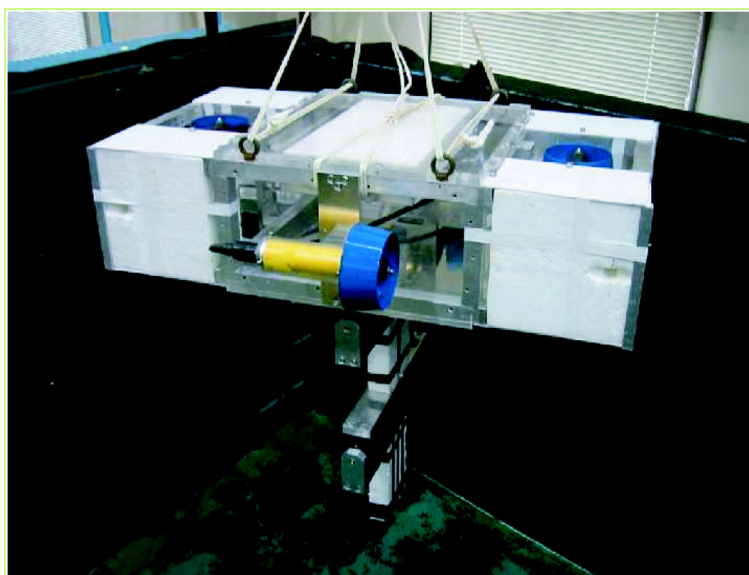


Fig. 2.1: Underwater robot

2.1 モデリング

この節では、2リンク回転関節マニピュレータを搭載して垂直2次元平面内で運動する Fig. 2.1 に示す水中ロボットに対して、Fig. 2.2 のモデルを設定するとともに、その数学モデルを示す。

なお、水中における物体の運動には、付加質量および付加慣性モーメントが作用する。付加質量および付加慣性モーメントは物体の運動方向に対する形状に依存するため、テンソルとしての取り扱いが必要となる [16]。したがって、Fig. 2.2 の数学モデルは、3次元空間での運動表現の低次元化により得られる。

本章で使用する仮定と記号は以下のとおりである。

【仮定】

- A1. 各リンクはすべて剛体とする。
- A2. ロボットの運動は2次元平面内に限定する。
- A3. 周囲の流体は静止しているものとする。
- A4. 重力と浮力は各リンク単体ではつり合っていないが、系全体ではつり合っているものとする。

【記号】

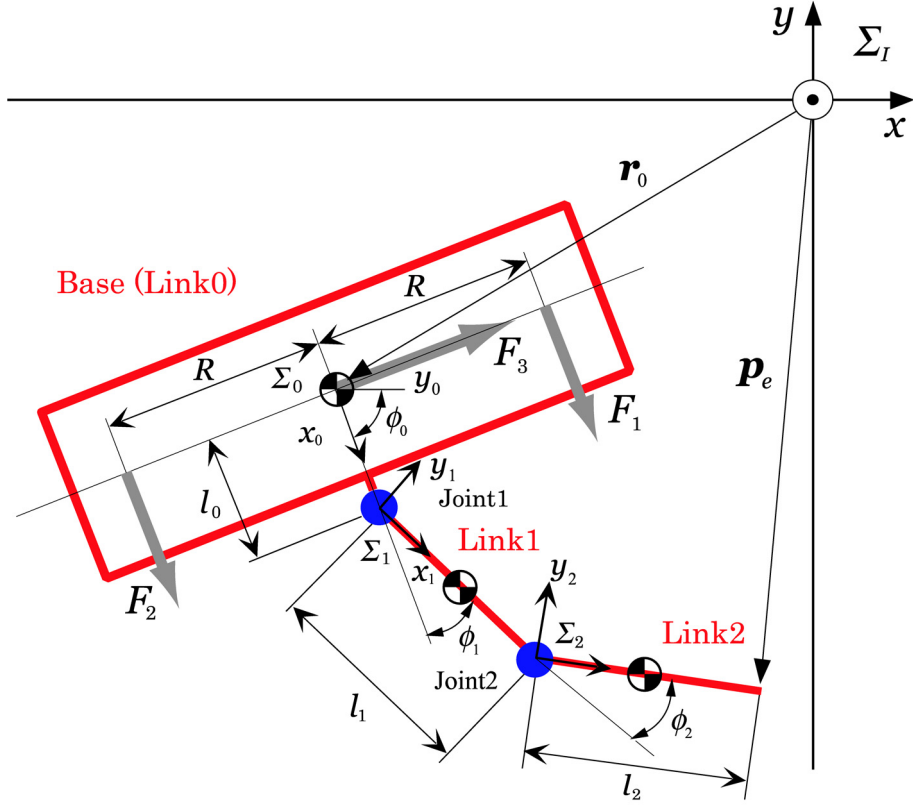


Fig. 2.2: 2-link underwater robot model

Σ_I : 地上などに固定した基準座標系

Σ_0 : リンク 0(ベース) の質量中心を原点とし, ベースに固定した座標系

Σ_i : 関節 i を原点とし, リンク i に固定した座標系 ($i = 1, 2$)

${}^i\mathbf{R}_j$: Σ_j から Σ_i への回転変換行列 ($\in \mathcal{R}^{3 \times 3}$)

\mathbf{p}_e : Σ_I に関するマニピュレータ手先位置ベクトル ($= [p_{e_x}, p_{e_y}, 0]^T$)

\mathbf{p}_i : Σ_I に関する関節 i ($i = 1, 2$) の位置ベクトル ($\in \mathcal{R}^{3 \times 1}$)

\mathbf{r}_i : Σ_I に関するリンク i ($i = 0, 1, 2$) の質量中心位置ベクトル ($= [r_{i_x}, r_{i_y}, 0]^T$)

ϕ_i : 相対関節角度 ($i = 0, 1, 2$)

ϕ : マニピュレータ関節角度ベクトル ($= [\phi_1, \phi_2]^T$)

ψ_0 : Σ_I に関する Σ_0 の角度ベクトル ($= [0, 0, \phi_0]^T$)

ω_0 : Σ_I に関する Σ_0 の角速度ベクトル ($= [0, 0, \dot{\phi}_0]^T$)

ω_e : Σ_I に関するマニピュレータ手先の角速度ベクトル ($\in \mathcal{R}^{3 \times 1}$)

$\boldsymbol{\nu}_0$: ベース速度変数ベクトル ($= [\dot{\boldsymbol{r}}_0^T, \boldsymbol{\omega}_0^T]^T$)

$\boldsymbol{\nu}_e$: マニピュレータ手先速度変数ベクトル ($= [\dot{\boldsymbol{p}}_e^T, \boldsymbol{\omega}_e^T]^T$)

${}^i\boldsymbol{k}_i$: Σ_i に関する関節 i の回転軸方向を示す単位ベクトル ($= [0, 0, 1]^T$)

m_i : リンク i の質量

${}^i\boldsymbol{M}_{a_i}$: Σ_i に関するリンク i の付加質量テンソル ($\in \mathcal{R}^{3 \times 3}$)

${}^i\boldsymbol{I}_i$: Σ_i に関するリンク i の慣性テンソル ($\in \mathcal{R}^{3 \times 3}$)

${}^i\boldsymbol{I}_{a_i}$: Σ_i に関するリンク i の付加慣性テンソル ($\in \mathcal{R}^{3 \times 3}$)

${}^i\boldsymbol{a}_{g_i}$: Σ_i に関するリンク i の質量中心位置ベクトル ($= [a_{g_i}, 0, 0]^T$)

${}^i\boldsymbol{a}_{b_i}$: Σ_i に関するリンク i の浮心位置ベクトル ($= [a_{b_i}, 0, 0]^T$)

l_i : リンク i の長さ

V_i : リンク i の体積

\boldsymbol{E}_j : j 次元の単位行列

ρ : 流体密度

C_{D_i} : リンク i の流体抗力係数

F_j : スラスタ j の推力 ($j = 1, 2, 3$)

R : Σ_0 原点からスラスタまでの距離

なお、ベクトルおよびテンソルは、 ${}^i\boldsymbol{a}$ のように左肩に参照座標系 Σ_i を明記しているが、慣性座標系 Σ_I の場合は省略している。

さらに、ベクトル $\boldsymbol{a} = [x, y, z]^T$ に対して、 $\tilde{\boldsymbol{a}}$ を

$$\tilde{\boldsymbol{a}} = \begin{bmatrix} 0 & -z & y \\ z & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{bmatrix}$$

で定義する。なお、 $\{\sim\}$ は、2つのベクトル \boldsymbol{a} と \boldsymbol{b} の外積演算を $\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b} = \tilde{\boldsymbol{a}}\boldsymbol{b}$ と表現するための演算子である。

さて、物体が流体中で運動する場合、周囲の流体による反力、すなわち流体力が物体に作用する。水中ロボットの分野では、おもな流体力として、流体と物体の相対加速度に比例する慣性力と相対速度の二乗に比例する流体抗力が取り扱われている [34]。流体に関する慣性力は、並進加速度および角加速度の比例定数である、付加

質量および付加慣性モーメントを用いて表現される。厳密には付加質量および付加慣性モーメントはレイノルズ数の関数であり，海洋工学の分野では速度ポテンシャル法を用いて理想流体中の物体の質量中心もしくは回転中心に対して求めることが多い [57,58]。しかし，一般的には簡易的な形状の付加質量を初期値として実験的に付加質量を同定したり，簡易形状の近似値をそのまま用いている。水中ロボット制御の分野でも付加質量・付加慣性モーメントと流体抗力係数は，ロボットの構成要素の形状に依存した一定値として取り扱われる [59] ので，本論文でも形状に依存した一定値として取り扱う。

以下では，流体に関する慣性力および流体抗力を考慮した水中ロボットの数式モデルを導出する。

2.1.1 運動学関係式および運動量方程式

まず，マニピュレータを搭載した宇宙ロボットのモデリング [46–48] と同様に，運動学関係式と運動量方程式の導出に必要な，ロボットを構成するベースおよびリンクの質量中心と角関節の速度を求める。

はじめに，関節 i ($i = 1, 2$) の位置 \mathbf{p}_i およびリンク i の質量中心位置 \mathbf{r}_i は，それぞれ

$$\mathbf{p}_i = \mathbf{p}_{i-1} + {}^I\mathbf{R}_i {}^i\mathbf{l}_i \quad (2.1)$$

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{p}_{i-1} + {}^I\mathbf{R}_i {}^i\mathbf{a}_i \quad (2.2)$$

で求められる。ただし， $\mathbf{p}_0 = \mathbf{r}_0$ である。また，マニピュレータ手先位置 \mathbf{p}_e は

$$\mathbf{p}_e = \mathbf{p}_2 + {}^I\mathbf{R}_2 {}^2\mathbf{l}_2 \quad (2.3)$$

となる。

つぎに，関節 i の並進速度および角速度は，それぞれ

$$\dot{\mathbf{p}}_i = \dot{\mathbf{p}}_{i-1} + \boldsymbol{\omega}_{i-1} \times ({}^I\mathbf{R}_{i-1} {}^{i-1}\mathbf{l}_{i-1}) \quad (2.4)$$

$$\boldsymbol{\omega}_i = \boldsymbol{\omega}_{i-1} + {}^I\mathbf{R}_i {}^i\mathbf{k}_i \dot{\phi}_i \quad (2.5)$$

となり，リンク i の質量中心の並進速度は

$$\dot{\mathbf{r}}_i = \dot{\mathbf{p}}_{i-1} + \boldsymbol{\omega}_{i-1} \times ({}^I\mathbf{R}_{i-1} {}^{i-1}\mathbf{a}_{i-1}) \quad (2.6)$$

となる。また、手先速度は

$$\dot{\boldsymbol{p}}_e = \dot{\boldsymbol{p}}_2 + \boldsymbol{\omega}_2 \times ({}^I\boldsymbol{R}_2 {}^2\boldsymbol{l}_2) \quad (2.7)$$

となる。

ここで、 ${}^i\boldsymbol{l}_i = [l_i, 0, 0]^T$ および ${}^i\boldsymbol{a}_{g_i} = [a_i, 0, 0]^T$ は Σ_i に関する表現で、

$${}^I\boldsymbol{R}_{i-1} {}^{i-1}\boldsymbol{l}_{i-1} = \boldsymbol{p}_i - \boldsymbol{p}_{i-1}$$

$${}^I\boldsymbol{R}_i {}^i\boldsymbol{a}_{g_i} = \boldsymbol{r}_i - \boldsymbol{p}_i$$

であることに注意し、また、

$$\boldsymbol{k}_i = {}^I\boldsymbol{R}_i {}^i\boldsymbol{k}_i$$

とすると、関節 i の並進速度および角度速度である式 (2.4) および (2.5) は、それぞれ

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{p}}_i &= \dot{\boldsymbol{p}}_{i-1} + \tilde{\boldsymbol{\omega}}_{i-1} (\boldsymbol{p}_i - \boldsymbol{p}_{i-1}) \\ &= \dot{\boldsymbol{r}}_0 - (\tilde{\boldsymbol{p}}_i - \tilde{\boldsymbol{r}}_0) \boldsymbol{\omega}_0 + \sum_{j=1}^{i-1} \tilde{\boldsymbol{k}}_j (\boldsymbol{p}_i - \boldsymbol{p}_j) \dot{\phi}_j \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\boldsymbol{\omega}_i = \boldsymbol{\omega}_0 + \sum_{j=1}^i \boldsymbol{k}_j \dot{\phi}_j \quad (2.9)$$

となり、また、式 (2.7) の手先速度と手先角速度は、それぞれ

$$\dot{\boldsymbol{p}}_e = \dot{\boldsymbol{r}}_0 - (\tilde{\boldsymbol{p}}_e - \tilde{\boldsymbol{r}}_0) \boldsymbol{\omega}_0 + \sum_{j=1}^2 \tilde{\boldsymbol{k}}_j (\boldsymbol{p}_e - \boldsymbol{p}_j) \dot{\phi}_j \quad (2.10)$$

$$\boldsymbol{\omega}_e = \boldsymbol{\omega}_0 + \sum_{j=1}^2 \boldsymbol{k}_j \dot{\phi}_j \quad (2.11)$$

となり、さらに、式 (2.6) のリンク i の質量中心の並進速度は

$$\dot{\boldsymbol{r}}_i = \dot{\boldsymbol{r}}_0 - (\tilde{\boldsymbol{r}}_i - \tilde{\boldsymbol{r}}_0) \boldsymbol{\omega}_0 + \sum_{j=1}^i \tilde{\boldsymbol{k}}_j (\boldsymbol{r}_i - \boldsymbol{p}_j) \dot{\phi}_j \quad (2.12)$$

となる。

以上の準備のもとに、運動学関係式および運動量方程式を求める。

まず、式 (2.10) と (2.11) より、手先速度変数ベクトル $\boldsymbol{\nu}_e = [\dot{\boldsymbol{p}}_e^T, \boldsymbol{\omega}_e^T]^T$ とベース速度変数ベクトル $\boldsymbol{\nu}_0 = [\dot{\boldsymbol{r}}_0^T, \boldsymbol{\omega}_0^T]^T$ およびマニピュレータ関節角速度ベクトル $\dot{\boldsymbol{\phi}} = [\dot{\phi}_1, \dot{\phi}_2]^T$ の関係は次式となる。

$$\boldsymbol{\nu}_e = \boldsymbol{A}\boldsymbol{\nu}_0 + \boldsymbol{B}\dot{\boldsymbol{\phi}} \quad (2.13)$$

ただし,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_3 & -(\tilde{\mathbf{p}}_e - \tilde{\mathbf{r}}_0) \\ \mathbf{0} & \mathbf{E}_3 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{k}}_1 (\mathbf{p}_e - \mathbf{p}_1) & \tilde{\mathbf{k}}_2 (\mathbf{p}_e - \mathbf{p}_2) \\ \mathbf{k}_1 & \mathbf{k}_2 \end{bmatrix}$$

である.

つぎに, 流体中で生じる付加質量 ${}^i\mathbf{M}_{a_i}$ と付加慣性モーメント ${}^i\mathbf{I}_{a_i}$ を含んだ, ロボット全体の並進運動量 $\boldsymbol{\eta}$ およびベース質量中心まわりの角運動量 $\boldsymbol{\mu}$ を求める.

まず, 並進運動量 $\boldsymbol{\eta}$ は式 (2.12) を用いると

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\eta} &= \sum_{i=0}^2 \mathbf{M}_{T_i} \dot{\mathbf{r}}_i \\ &= \mathbf{M}_{T_0} \dot{\mathbf{r}}_0 + \mathbf{M}_{T_1} \left\{ \dot{\mathbf{r}}_0 - (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_0) \times \boldsymbol{\omega}_0 + (\mathbf{r}_1 - \mathbf{p}_1) \times \mathbf{k}_1 \dot{\phi}_1 \right\} \\ &\quad + \mathbf{M}_{T_2} \left\{ \dot{\mathbf{r}}_0 - (\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_0) \times \boldsymbol{\omega}_0 - (\mathbf{r}_2 - \mathbf{p}_1) \times \mathbf{k}_1 \dot{\phi}_1 - (\mathbf{r}_2 - \mathbf{p}_2) \times \mathbf{k}_2 \dot{\phi}_2 \right\} \\ &= \sum_{i=0}^2 \mathbf{M}_{T_i} \dot{\mathbf{r}}_0 - \sum_{i=0}^2 \mathbf{M}_{T_i} (\tilde{\mathbf{r}}_i - \tilde{\mathbf{r}}_0) \boldsymbol{\omega}_0 - \sum_{i=1}^2 \left\{ \sum_{j=1}^2 \mathbf{M}_{T_i} \tilde{\mathbf{k}}_i (\mathbf{r}_j - \mathbf{p}_i) \right\} \dot{\phi}_i \quad (2.14) \end{aligned}$$

となる. ただし,

$$\mathbf{M}_{T_i} = m_i \mathbf{E}_3 + {}^I\mathbf{R}_i {}^i\mathbf{M}_{a_i} {}^i\mathbf{R}_I$$

である.

つぎに, ベースの質量中心まわりの角運動量 $\boldsymbol{\mu}$ を求めるために, Σ_I 原点まわりの角運動量 $\boldsymbol{\mu}_I$ を求めると,

$$\boldsymbol{\mu}_I = \sum_{i=0}^2 (\mathbf{I}_{T_i} \boldsymbol{\omega}_i + \mathbf{r}_i \times \mathbf{M}_{T_i} \dot{\mathbf{r}}_i) \quad (2.15)$$

となる. ただし,

$$\mathbf{I}_{T_i} = {}^I\mathbf{R}_i ({}^i\mathbf{I}_i + {}^i\mathbf{I}_{a_i}) {}^i\mathbf{R}_I$$

である.

ここで, ベース質量中心まわりの角運動量 $\boldsymbol{\mu}$ と Σ_I 原点まわりの角運動量 $\boldsymbol{\mu}_I$ は

$$\boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{\mu}_I - \mathbf{r}_0 \times \boldsymbol{\eta} \quad (2.16)$$

の関係があるので、式 (2.15) を式 (2.16) に代入し、さらに、式 (2.12) を用いると、ベース質量中心まわりの角運動量 $\boldsymbol{\mu}$ は

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{\mu} &= \boldsymbol{\mu}_I - \mathbf{r}_0 \times \boldsymbol{\eta} \\
&= \sum_{i=0}^2 (\mathbf{I}_{T_i} \boldsymbol{\omega}_i + \mathbf{r}_i \times M_{T_i} \dot{\mathbf{r}}_i) - \mathbf{r}_0 \times \sum_{i=0}^2 M_{T_i} \dot{\mathbf{r}}_i \\
&= \sum_{i=0}^2 \{ \mathbf{I}_{T_i} \boldsymbol{\omega}_i + (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0) \times M_{T_i} \dot{\mathbf{r}}_i \} \\
&= \sum_{i=0}^2 (\tilde{\mathbf{r}}_i - \tilde{\mathbf{r}}_0) M_{T_i} \dot{\mathbf{r}}_0 + \sum_{i=1}^2 \{ \mathbf{I}_{T_i} - (\tilde{\mathbf{r}}_i - \tilde{\mathbf{r}}_0) M_{T_i} (\tilde{\mathbf{r}}_i - \tilde{\mathbf{r}}_0) \} \boldsymbol{\omega}_0 \\
&\quad + \sum_{i=1}^2 \left\{ \sum_{j=1}^2 \{ \mathbf{I}_{T_j} - (\tilde{\mathbf{r}}_j - \tilde{\mathbf{r}}_0) M_{T_j} (\tilde{\mathbf{r}}_j - \tilde{\mathbf{p}}_i) \} \right\} \mathbf{k}_i \dot{\phi}_i
\end{aligned} \tag{2.17}$$

となる。

したがって、式 (2.14) と (2.17) より、次の運動量方程式を得る。

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\eta} \\ \boldsymbol{\mu} \end{bmatrix} = \mathbf{C} \boldsymbol{\nu}_0 + \mathbf{D} \dot{\boldsymbol{\phi}} \tag{2.18}$$

ただし、

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^2 M_{T_i} & -\sum_{i=1}^2 M_{T_i} (\tilde{\mathbf{r}}_i - \tilde{\mathbf{r}}_0) \\ \sum_{i=1}^2 (\tilde{\mathbf{r}}_i - \tilde{\mathbf{r}}_0) M_{T_i} & \sum_{i=0}^2 \{ \mathbf{I}_{T_i} - (\tilde{\mathbf{r}}_i - \tilde{\mathbf{r}}_0) M_{T_i} (\tilde{\mathbf{r}}_i - \tilde{\mathbf{r}}_0) \} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_{11} & \mathbf{d}_{12} \\ \mathbf{d}_{21} & \mathbf{d}_{22} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{d}_{1i} = \sum_{j=i}^2 M_{T_j} \tilde{\mathbf{k}}_i (\mathbf{r}_j - \mathbf{p}_i)$$

$$\mathbf{d}_{2i} = \sum_{j=i}^2 \left\{ \mathbf{I}_{T_j} \mathbf{k}_i + (\tilde{\mathbf{r}}_j - \tilde{\mathbf{r}}_0) M_{T_j} \tilde{\mathbf{k}}_i (\mathbf{r}_j - \mathbf{p}_i) \right\}$$

である。

2.1.2 運動方程式

水中ロボットの運動方程式の導出には、付加質量・付加慣性モーメントに加えて、流体抗力・抗力モーメントおよび浮力が必要である。関節 i に作用する流体抗力 \mathbf{f}_{d_i} と抗力モーメント \mathbf{n}_{d_i} は、それぞれ次式で表現される [32].

$$\mathbf{f}_{d_i} = \frac{\rho}{2} C_{D_i} D_i^I \mathbf{R}_i \int_0^{l_i} \|\mathbf{w}_i\| \mathbf{w}_i dx_i \quad (2.19)$$

$$\mathbf{n}_{d_i} = \frac{\rho}{2} C_{D_i} D_i^I \mathbf{R}_i \int_0^{l_i} \hat{\mathbf{x}}_i \times \|\mathbf{w}_i\| \mathbf{w}_i dx_i \quad (2.20)$$

ただし,

$$\mathbf{w}_i = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{E}_2 \end{bmatrix} {}^i \mathbf{R}_I (\dot{\mathbf{r}}_i + \tilde{\boldsymbol{\omega}}_i \hat{\mathbf{x}}_i)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_i = \begin{bmatrix} x_i & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

である.

また、リンク i に作用する重力と浮力によって関節 i に加わる力およびトルクは、それぞれ

$$\mathbf{f}_{g_i} = (\rho V_i - m_i) \mathbf{g} \quad (2.21)$$

$$\mathbf{n}_{g_i} = (\rho V_i \tilde{\mathbf{a}}_{b_i} - m_i \tilde{\mathbf{a}}_{g_i}) \mathbf{g} \quad (2.22)$$

となる.

さて、流体力を考慮した水中ロボットの運動方程式を、漸化的ニュートン・オイラー法 [60] を用いて求める.

まず、境界条件を ${}^0 \boldsymbol{\omega}_0 = {}^0 \mathbf{k}_0 \dot{\phi}_0$, ${}^0 \dot{\boldsymbol{\omega}}_0 = {}^0 \mathbf{k}_0 \ddot{\phi}_0$, ${}^0 \dot{\mathbf{p}}_0 = {}^0 \dot{\mathbf{r}}_0 = {}^0 \mathbf{R}_I \ddot{\mathbf{r}}_0$ として,

$$\left. \begin{aligned} {}^i \boldsymbol{\omega}_i &= {}^i \mathbf{R}_{i-1} {}^{i-1} \boldsymbol{\omega}_{i-1} + {}^i \mathbf{k}_i \dot{\phi}_i \\ {}^i \dot{\boldsymbol{\omega}}_i &= {}^i \mathbf{R}_{i-1} {}^{i-1} \dot{\boldsymbol{\omega}}_{i-1} + {}^i \mathbf{k}_i \ddot{\phi}_i + {}^i \boldsymbol{\omega}_i \times {}^i \mathbf{k}_i \dot{\phi}_i \\ {}^i \dot{\mathbf{p}}_i &= {}^i \mathbf{R}_{i-1} \{ {}^{i-1} \dot{\mathbf{p}}_{i-1} + {}^{i-1} \boldsymbol{\omega}_{i-1} \times {}^{i-1} \mathbf{l}_{i-1} + {}^{i-1} \boldsymbol{\omega}_{i-1} \times ({}^{i-1} \boldsymbol{\omega}_{i-1} {}^{i-1} \mathbf{l}_{i-1}) \} \\ {}^i \dot{\mathbf{r}}_i &= {}^i \dot{\mathbf{p}}_i + {}^i \boldsymbol{\omega}_i \times {}^i \mathbf{r}_i + {}^i \boldsymbol{\omega}_i \times ({}^i \boldsymbol{\omega}_i \times {}^i \mathbf{r}_i) \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

を $i = 1, 2$ で逐次計算し、つぎに、リンク i の質量中心に作用する力 ${}^i \hat{\mathbf{f}}_i$ とモーメント ${}^i \hat{\mathbf{n}}_i$, および関節 i に作用する力 ${}^i \mathbf{f}_i$ とモーメント ${}^i \mathbf{n}_i$, すなわち

$$\left. \begin{aligned}
{}^i\hat{\mathbf{f}}_i &= (m_i \mathbf{E}_3 + {}^i\mathbf{M}_{a_i}) {}^i\ddot{\mathbf{r}}_i \\
{}^i\hat{\mathbf{n}}_i &= ({}^i\mathbf{I}_I + {}^i\mathbf{I}_{a_i}) {}^i\dot{\boldsymbol{\omega}}_i + {}^i\dot{\boldsymbol{\omega}}_i \times \{({}^i\mathbf{I}_I + {}^i\mathbf{I}_{a_i}) {}^i\boldsymbol{\omega}_i\} \\
{}^i\mathbf{f}_i &= {}^i\mathbf{R}_{i+1} {}^{i+1}\mathbf{f}_{i+1} + {}^i\hat{\mathbf{f}}_i + {}^i\mathbf{f}_{d_i} + {}^i\mathbf{f}_{g_i} \\
{}^i\mathbf{n}_i &= {}^i\mathbf{R}_{i+1} {}^{i+1}\mathbf{n}_{i+1} + {}^i\hat{\mathbf{n}}_i + {}^i\mathbf{l}_i \times ({}^i\mathbf{R}_{i+1} {}^{i+1}\mathbf{f}_{i+1}) + {}^i\mathbf{r}_i \times {}^i\hat{\mathbf{f}}_i + {}^i\mathbf{n}_{d_i} + {}^i\mathbf{n}_{g_i}
\end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

を、境界条件を ${}^2\mathbf{R}_3 = 0$, ${}^3\mathbf{f}_3 = 0$, ${}^3\mathbf{n}_3 = 0$ として $i = 2$ から 0 まで順々に求めると、

$$\left. \begin{aligned}
\mathbf{f}_0 &= \begin{bmatrix} f_{0_x} & f_{0_y} & f_{0_z} \end{bmatrix}^T = {}^I\mathbf{R}_0 {}^0\mathbf{f}_0 \\
\mathbf{n}_0 &= \begin{bmatrix} n_{0_x} & n_{0_y} & n_{0_z} \end{bmatrix}^T = {}^I\mathbf{R}_0 {}^0\mathbf{n}_0
\end{aligned} \right\} \quad (2.25)$$

より Σ_I に関するベースの力とトルク、また、

$$\tau_i = ({}^i\mathbf{k}_i)^T {}^i\mathbf{n}_i \quad (i = 1, 2) \quad (2.26)$$

より、マニピュレータ関節トルクが得られる。なお、式 (2.23)～(2.26) におけるベクトルの左肩の添字 i は、ベクトルの Σ_i 座標系に関する成分表示を意味する。

上記漸化的ニュートン・オイラー法より、次の運動方程式が得られる。

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\dot{\boldsymbol{\zeta}} + \mathbf{N}(\mathbf{q}, \boldsymbol{\zeta})\boldsymbol{\zeta} + \mathbf{f} = \mathbf{u} \quad (2.27)$$

ただし、 $\mathbf{q} = [\mathbf{r}_0^T, \boldsymbol{\psi}_0^T, \boldsymbol{\phi}^T]^T$, $\boldsymbol{\zeta} = [\boldsymbol{\nu}_0^T, \dot{\boldsymbol{\phi}}^T]^T$ であり、 $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ は付加質量と付加慣性モーメントを含んだ慣性行列、 $\mathbf{N}(\mathbf{q}, \boldsymbol{\zeta})\boldsymbol{\zeta}$ は遠心力・コリオリ力項、 \mathbf{f} は流体抗力・重力・浮力項、また、 $\mathbf{u} = [\mathbf{f}_0^T, \mathbf{n}_0^T, \tau_1, \tau_2]^T$ である。

2.1.3 2次元数学モデル

さて、Fig. 2.2 のロボットの運動は $x - y$ 平面内に限定されるので、並進に関するベクトルの第3要素と回転に関するベクトルの第1, 2要素はいずれも 0 となる。そこで、運動学関係式 (2.13), 運動量方程式 (2.18) および運動方程式 (2.27) は、それぞれ

$$\dot{\mathbf{x}}_e = \mathbf{A}_s \dot{\mathbf{x}}_0 + \mathbf{B}_s \dot{\boldsymbol{\phi}} \quad (2.28)$$

$$\mathbf{s}_s = \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{x}}_0 + \mathbf{D}_s \dot{\boldsymbol{\phi}} \quad (2.29)$$

$$\mathbf{M}_s(\mathbf{q}_s)\ddot{\mathbf{q}}_s + \mathbf{N}_s(\mathbf{q}_s, \dot{\mathbf{q}}_s)\dot{\mathbf{q}}_s + \mathbf{f}_s = \mathbf{u}_s \quad (2.30)$$

と低次元化できる. ただし, $\mathbf{x}_e = [p_{e_x}, p_{e_y}]^T$, $\mathbf{x}_0 = [r_{0_x}, r_{0_y}, \phi_0]^T$, $\mathbf{s}_s = [\eta_x, \eta_y, \mu_z]^T$, $\mathbf{q}_s = [\mathbf{x}_0^T, \phi^T]^T$, $\mathbf{u}_s = [f_{0_x}, f_{0_y}, n_{0_z}, \tau_1, \tau_2]^T$ である. また, $\mathbf{A}_s \in R^{2 \times 3}$, $\mathbf{B}_s \in R^{2 \times 2}$, $\mathbf{C}_s \in R^{3 \times 3}$, $\mathbf{D}_s \in R^{3 \times 2}$, $\mathbf{M}_s \in R^{5 \times 5}$, $\mathbf{N}_s \in R^{5 \times 5}$ と $\mathbf{f}_s \in R^{5 \times 1}$ は, それぞれ \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} , \mathbf{D} , \mathbf{M} , \mathbf{N} と \mathbf{f} から適切な行や列を除いてできる行列およびベクトルである.

さらに, ベース入力 $\mathbf{u}_B = [f_{0_x}, f_{0_y}, n_{0_z}]^T$ と関節入力 $\mathbf{u}_M = [\tau_1, \tau_2]^T$ に関して, 運動方程式 (2.30) の係数行列とベクトルをブロック行列

$$\mathbf{M}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{BB} & \mathbf{M}_{BM} \\ \mathbf{M}_{MB} & \mathbf{M}_{MM} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{N}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{N}_{BB} & \mathbf{N}_{BM} \\ \mathbf{N}_{MB} & \mathbf{N}_{MM} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{f}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_B \\ \mathbf{f}_M \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_B \\ \mathbf{u}_M \end{bmatrix}$$

で表現すると, 次式のベースの運動方程式を得る.

$$\mathbf{M}_{BB}\ddot{\mathbf{x}}_0 + \mathbf{M}_{BM}\ddot{\phi} + \mathbf{N}_{BB}\dot{\mathbf{x}}_0 + \mathbf{N}_{BM}\dot{\phi} + \mathbf{f}_B = \mathbf{u}_B \quad (2.31)$$

なお, 式 (2.29) の時間微分は

$$\dot{\mathbf{s}}_s = \mathbf{C}_s\ddot{\mathbf{x}}_0 + \mathbf{D}_s\ddot{\phi} + \dot{\mathbf{C}}_s\dot{\mathbf{x}}_0 + \dot{\mathbf{D}}_s\dot{\phi} \quad (2.32)$$

となるので, 式 (2.31) と (2.32) より

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{C}_s &= \mathbf{M}_{BB} \\ \mathbf{D}_s &= \mathbf{M}_{BM} \\ \dot{\mathbf{C}}_s &= \mathbf{N}_{BB} \\ \dot{\mathbf{D}}_s &= \mathbf{N}_{BM} \\ \dot{\mathbf{s}}_s &= \mathbf{u}_B - \mathbf{f}_B \end{aligned} \right\} \quad (2.33)$$

の関係がある.

2.2 制御法

ここでは, UVMS の計算トルク法と分解加速度制御法について, Fig. 2.2 のロボットを対象として説明する.

なお, 作業空間と関節空間における変数を, それぞれ $\mathbf{x}_s = [\mathbf{x}_0^T, \mathbf{x}_e^T]^T$ と $\mathbf{q}_s = [\mathbf{x}_0^T, \phi^T]^T$ とし, また, \mathbf{x}_s の目標値を $\mathbf{x}_s^{\text{des}}$ とする.

2.2.1 計算トルク法

UVMS の計算トルク法は，マニピュレータ手先目標値に対応したマニピュレータ関節目標値とベース目標値を用いて UVMS を制御する方法であり，マニピュレータに関しては，関節空間における位置と速度のフィードバックにより作業空間の手先制御が間接的に実現される．

まず，式 (2.28) より，作業空間速度 $\dot{\boldsymbol{x}}_s$ と関節空間速度 $\dot{\boldsymbol{q}}_s$ を関係付ける，次式の順運動学関係式を得る．

$$\dot{\boldsymbol{x}}_s = \boldsymbol{J}_s(\boldsymbol{q}_s)\dot{\boldsymbol{q}}_s \quad (2.34)$$

ただし，

$$\boldsymbol{J}_s(\boldsymbol{q}_s) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{E}_3 & \mathbf{0} \\ \boldsymbol{A}_s & \boldsymbol{B}_s \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^{5 \times 5} \quad (2.35)$$

である．

つぎに，式 (2.34) に対応する逆運動学関係式は

$$\dot{\boldsymbol{q}}_s = \boldsymbol{J}_s^{-1}\dot{\boldsymbol{x}}_s \quad (2.36)$$

となり．また，式 (2.34) を時間微分した式

$$\ddot{\boldsymbol{x}}_s = \boldsymbol{J}_s\ddot{\boldsymbol{q}}_s + \dot{\boldsymbol{J}}_s\dot{\boldsymbol{q}}_s \quad (2.37)$$

より

$$\ddot{\boldsymbol{q}}_s = \boldsymbol{J}_s^{-1} \left(\ddot{\boldsymbol{x}}_s - \dot{\boldsymbol{J}}_s\dot{\boldsymbol{q}}_s \right) \quad (2.38)$$

を得る．

式 (2.36) と (2.38) に基づき，作業空間における目標値 $\boldsymbol{x}_s^{\text{def}}$ に対応する関節空間における目標速度，目標加速度および目標値を，それぞれ

$$\dot{\boldsymbol{q}}_{s_c}^{\text{des}} = \boldsymbol{J}_s^{-1}\dot{\boldsymbol{x}}_s^{\text{def}} \quad (2.39)$$

$$\ddot{\boldsymbol{q}}_{s_c}^{\text{des}} = \boldsymbol{J}_s^{-1} \left(\ddot{\boldsymbol{x}}_s^{\text{def}} - \dot{\boldsymbol{J}}_s\dot{\boldsymbol{q}}_{s_c}^{\text{des}} \right) \quad (2.40)$$

$$\boldsymbol{q}_{s_c}^{\text{des}} = \int \dot{\boldsymbol{q}}_{s_c}^{\text{des}} dt \quad (2.41)$$

で決定する．さらに，制御入力である関節駆動トルク \boldsymbol{u}_s を，運動方程式 (2.30) に対応して次式で求める．

$$\boldsymbol{u}_s = \bar{\boldsymbol{M}}_s\ddot{\boldsymbol{q}}_{s_c}^{\text{ref}} + \bar{\boldsymbol{N}}_s\dot{\boldsymbol{q}}_s + \bar{\boldsymbol{f}}_s \quad (2.42)$$

ただし,

$$\ddot{\mathbf{q}}_{s_c}^{\text{ref}} = \ddot{\mathbf{q}}_{s_c}^{\text{des}} + \mathbf{K}_{V_c} (\dot{\mathbf{q}}_{s_c}^{\text{des}} - \dot{\mathbf{q}}_s) + \mathbf{K}_{P_c} (\mathbf{q}_{s_c}^{\text{des}} - \mathbf{q}_s) \quad (2.43)$$

は修正目標値であり, $\bar{\mathbf{M}}_s$, $\bar{\mathbf{N}}_s$ および $\bar{\mathbf{f}}_s$ は運動方程式において付加質量, 付加慣性モーメントおよび流体抗力係数を一定値とした要素である. また, $\mathbf{K}_{P_c} = \text{diag}\{k_{P_{c_i}}\}$ と $\mathbf{K}_{V_c} = \text{diag}\{k_{V_{c_i}}\}$ ($i = 1, \dots, 5$) はフィードバックゲイン行列で, その要素は $k_{P_{c_i}} > 0$ と $k_{V_{c_i}} > 0$ に選定する.

ここで, 制御偏差を $\mathbf{e}_q = \mathbf{q}_{s_c}^{\text{des}} - \mathbf{q}_s$ とすると, $\bar{\mathbf{M}}_s$, $\bar{\mathbf{N}}_s$ および $\bar{\mathbf{f}}_s$ が, それぞれの真値 \mathbf{M}_s , \mathbf{N}_s および \mathbf{f}_s に等しい場合, 式(2.30)と式(2.42)より

$$\bar{\mathbf{M}}_s (\ddot{\mathbf{e}}_q + \mathbf{K}_{V_c} \dot{\mathbf{e}}_q + \mathbf{K}_{P_c} \mathbf{e}_q) = \mathbf{0} \quad (2.44)$$

が得られ, $k_{P_{c_i}} > 0$ と $k_{V_{c_i}} > 0$ であるので, 制御偏差は $\mathbf{0}$ に収束する.

2.2.2 分解加速度制御法

分解加速度制御法は, 作業空間におけるベースとマニピュレータ手先の目標加速度および, 位置と速度のフィードバックに基づいて, 制御入力である関節駆動トルクを決定する方法である.

まず, 式(2.28)と(2.29)を時間微分して整理すると次式を得る.

$$\mathbf{W}_s \ddot{\mathbf{q}}_s = \ddot{\mathbf{x}}_s + \boldsymbol{\gamma}_s - \dot{\mathbf{W}}_s \dot{\mathbf{q}}_s \quad (2.45)$$

ただし,

$$\mathbf{W}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_s + \mathbf{E}_3 & \mathbf{D}_s \\ \mathbf{A}_s & \mathbf{B}_s \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\gamma}_s = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{s}}_s \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

である.

式(2.45)に基づき, 作業空間における目標値 $\mathbf{x}_s^{\text{des}}$ に対して, 次式の分解加速度制御則により, 関節空間の目標加速度 $\ddot{\mathbf{q}}_{s_r}^{\text{ref}}$ を決定する.

$$\ddot{\mathbf{q}}_{s_r}^{\text{ref}} = \mathbf{W}_s^{-1} (\ddot{\mathbf{x}}_{s_r}^{\text{ref}} + \boldsymbol{\gamma}_s - \dot{\mathbf{W}}_s \dot{\mathbf{q}}_s) \quad (2.46)$$

ただし,

$$\ddot{\mathbf{x}}_{s_r}^{\text{ref}} = \ddot{\mathbf{x}}_{s_r}^{\text{des}} + \mathbf{K}_{V_r} (\dot{\mathbf{x}}_{s_r}^{\text{des}} - \dot{\mathbf{x}}_s) + \mathbf{K}_{P_r} (\mathbf{x}_{s_r}^{\text{des}} - \mathbf{x}_s) \quad (2.47)$$

であり, また, $\mathbf{K}_{P_r} = \text{diag}\{k_{P_{r_i}}\}$ と $\mathbf{K}_{V_r} = \text{diag}\{k_{V_{r_i}}\}$ ($i = 1, \dots, 5$) はフィードバックゲイン行列で, その要素は $k_{P_{r_i}} > 0$ と $k_{V_{r_i}} > 0$ に選定する.

さらに、式(2.42)と同様に、制御入力である関節駆動トルク \mathbf{u}_s を次式で求める。

$$\mathbf{u}_s = \bar{\mathbf{M}}_s \ddot{\mathbf{q}}_{s_r}^{\text{ref}} + \bar{\mathbf{N}}_s \dot{\mathbf{q}}_s + \bar{\mathbf{f}}_s \quad (2.48)$$

ここで、制御偏差を $\mathbf{e}_x = \mathbf{x}_{s_r}^{\text{des}} - \mathbf{x}_s$ とすると、 $\bar{\mathbf{M}}_s$ 、 $\bar{\mathbf{N}}_s$ および $\bar{\mathbf{f}}_s$ が、それぞれの真値 \mathbf{M}_s 、 \mathbf{N}_s および \mathbf{f}_s に等しい場合、式(2.30)と式(2.48)より

$$\bar{\mathbf{M}}_s (\ddot{\mathbf{e}}_x + \mathbf{K}_{V_r} \dot{\mathbf{e}}_x + \mathbf{K}_{P_r} \mathbf{e}_x) = \mathbf{0} \quad (2.49)$$

が得られ、 $k_{P_{r_i}} > 0$ と $k_{V_{r_i}} > 0$ であるので、制御偏差は $\mathbf{0}$ に収束する。

2.3 実験

ここでは、Fig 2.1 の水中ロボットに対して、2.2 節で説明した 2 つの制御法を適用した実験を行い、分解加速度制御法が計算トルク法よりも良好な制御性能を有することを示す。

2.3.1 実験システムの構成

まず、実験で用いた Fig. 2.1 の水中ロボットの物理パラメータを Table 2.1 に示す。ロボットは、ベースの位置・姿勢制御用スラスタを水平方向と垂直方向に 2 基ずつベース質量中心から等距離 ($R = 0.3$ [m]) に配置したベースと、速度とトルクの 2 つの指令値が切り替え可能な関節サーボ機構を有する 2 リンクマニピュレータからなり、鉛直平面内で運動する。ベースとマニピュレータには、ロボット全体に作用する重力と浮力が釣り合うよう浮力材を取り付けている。なお、Table 2.1 の付加質量、付加慣性モーメントと流体抗力係数の値は、リンク形状に基づき設定した [59]。

つぎに、Fig. 2.3 に実験システムの構成を示す。幅 4[m]、奥行き 2[m]、高さ 2[m] の実験用水槽は、ガラス張りの計測面よりロボットの挙動を確認できる。その計測面を介して CCD カメラと処理速度 1/60 [s] の XY トラッカにより得られる、ベースに取り付けた 2 つの光点位置情報と、マニピュレータ関節サーボ機構に内蔵されたインクリメンタル型エンコーダからの信号をカウンタボードで取り込んだ角度情報より、コンピュータでベース位置・姿勢と手先位置、およびそれらの速度を得る。また、得られたロボットの位置・速度をもとに制御入力を決定し、D/A ボードを介してスラスタドライバとモータドライバに与え、ロボットを駆動する。

ここで、ロボットベース駆動機器であるスラスタは、完全防水されたモータの出力軸回転力を、マグネットカップリングを用いて非接触でプロペラに伝える。その

Table 2.1: Physical parameters of underwater robot

	Base	Link 1	Link 2
Mass [kg]	26.04	4.25	1.23
Moment of inertia [kg m ²]	1.330	0.190	0.012
Link length (x axis) [m]	0.20	0.25	0.25
Link length (y axis) [m]	0.81	0.04	0.04
Link width [m]	0.42	0.12	0.12
Added mass (x) [kg]	72.70	1.31	0.10
Added mass (y) [kg]	6.28	3.57	2.83
Added moment of inertia [kg m ²]	1.05	0.11	0.06
Drag coefficient (x)	1.2	0	0
Drag coefficient (y)	1.2	1.2	1.2

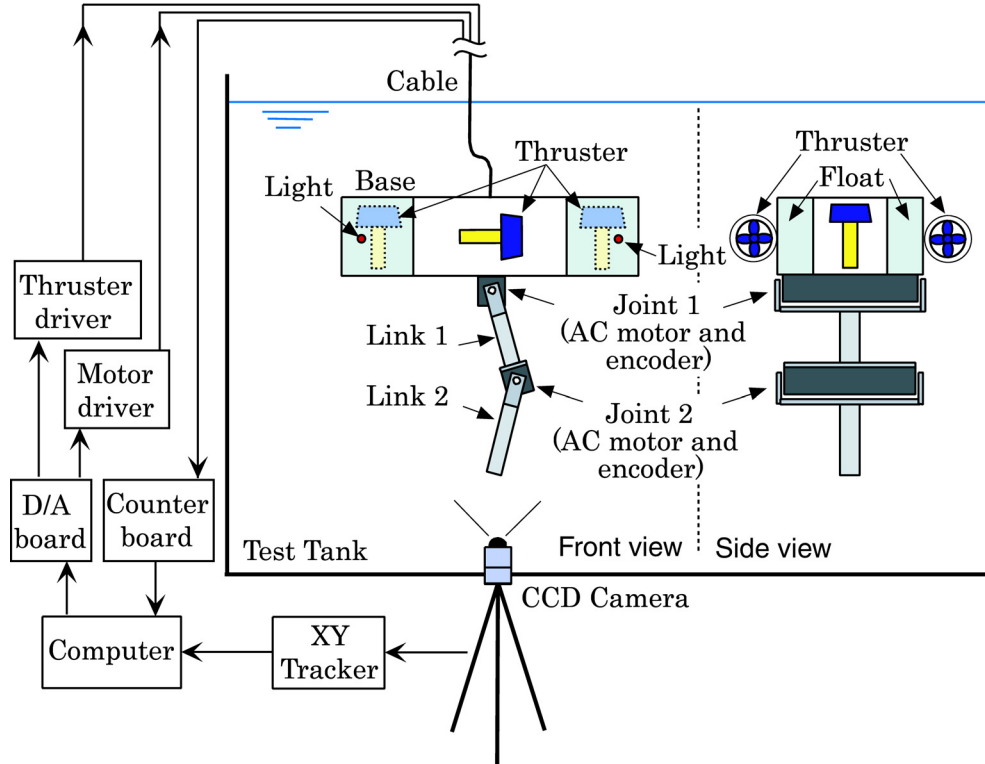


Fig. 2.3: Configuration of experimental system

ため、プロペラ回転数はモータ回転数とは完全には一致しない。プロペラが発生する推力をモータ軸回転数の関数とした数式モデルも提案されている [61] が、本実験装置で用いるスラストにはモータ回転数を計測するセンサは内蔵されていない。そこで、ベースの運動と比較してスラストの応答は十分速いので、ここでは静特性のみを考え、実験により求めたスラスト電源供給用ドライバへの入力電圧 v [V] とスラスト推力 F [N] との関係式を用いて、スラストを駆動する [27].

$$F = \begin{cases} 1.341v^2 - 1.363v - 0.026 & (1.2 \leq v \leq 4) \\ -0.763v^2 - 0.835v + 0.019 & (-4 \leq v \leq -1.2) \end{cases} \quad (2.50)$$

なお、ベース制御入力と Fig. 2.2 のスラスト推力の関係は

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_0 & C_0 & -S_0 \\ S_0 & S_0 & C_0 \\ -R & R & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ \tau_0 \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

であり、 F_3 [N] は 2 基の水平方向スラストの合力であるので、水平方向スラスト 1 基の推力は $F_3/2$ [N] となる。ただし、 $C_0 = \cos\phi_0$ 、 $S_0 = \sin\phi_0$ である。

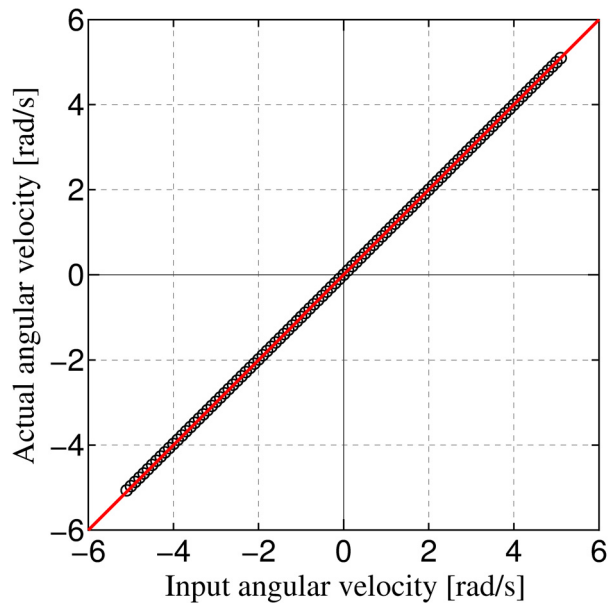
また、関節サーボ機構は、指令値を速度型とトルク型に切り替えて使用できるが、Fig. 2.4 に示すように、トルク型指令値の場合は出力角速度に不感帯が存在する。そこで、サーボ機構をトルク型で使用する場合は、不感帯を補償した指令値を与える。

2.3.2 実験結果

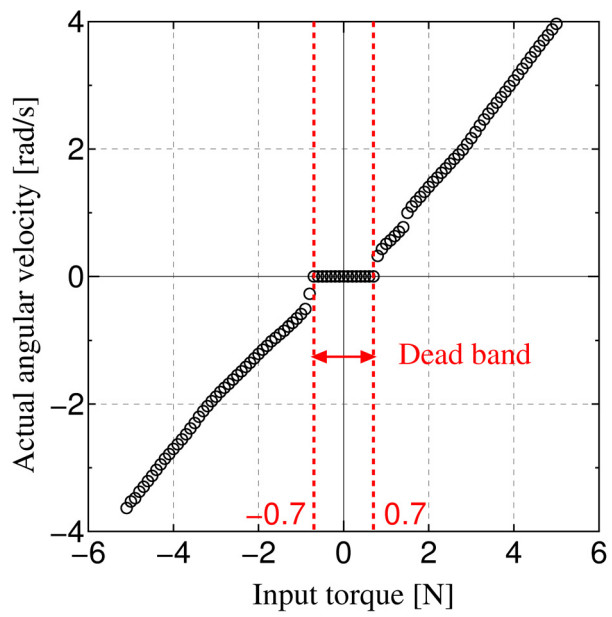
ここでは、関節トルクサーボ機構を有するロボットに対して、計算トルク法および分解加速度制御法を適用した実験結果を示す。

実験は次の条件で行った。ロボットの初期相対関節角度は $\phi_0 = -\pi/2$ [rad]、 $\phi_1 = \pi/3$ [rad] と $\phi_2 = -5\pi/18$ [rad] とし、ベース目標値は初期状態を保持するよう設定した。マニピュレータ手先目標値は、到達時間 10[s]、加減速時間 3[s] の初期手先位置からターゲットまでの直線軌道で、ターゲットを初期位置から x 方向に -0.60 [m]、 y 方向に 0.15 [m] 離れた位置に設定した。また、位置と速度のフィードバックゲインは、それぞれ $\mathbf{K}_{P_c} = \mathbf{K}_{P_r} = \text{diag}\{100, 100, 100, 50, 50\}$ と $\mathbf{K}_{V_c} = \mathbf{K}_{V_r} = \text{diag}\{10, 10, 10, 10, 10\}$ に設定した。

まず、計算トルク法と分解加速度制御法の実験結果を詳細に比較するため、実験と同条件の設定で、制御入力を求める際に用いる $\bar{\mathbf{M}}_s$ 、 $\bar{\mathbf{N}}_s$ および $\bar{\mathbf{f}}_s$ が、それぞれの真値 \mathbf{M}_s 、 \mathbf{N}_s および \mathbf{f}_s に等しく、かつ、ベース位置・姿勢角と関節角度の計測値に



(a) Velocity command type



(b) Torque command type

Fig. 2.4: Relationship between input command and actual angular velocity

誤差がない場合のシミュレーションを行った。計算トルク法と分解加速度制御法のシミュレーション結果を Fig. 2.5(a) と (b) に示す。図より、いずれの制御法もベースおよびマニピュレータ手先ともに良好に制御されており、ロボットの物理パラメータが既知で計測誤差がない場合は、同程度の制御性能が得られることがわかる。

つぎに、Fig 2.1 の水中ロボットを用いた、計算トルク法と分解加速度制御法の実験結果を、それぞれ Fig. 2.6 と 2.7 に示す。なお、いずれの図も、(a) はロボットの挙動、(b) は手先とベースの誤差の時間履歴を示している。

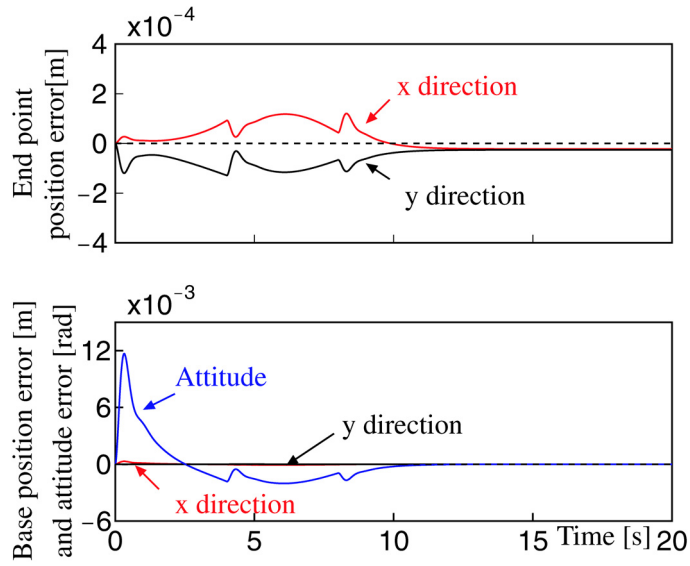
なお、実験では、制御入力を求める際に用いる \bar{M}_s , \bar{N}_s および \bar{f}_s は、付加質量・付加慣性モーメント・流体抗力係数などの流体力に関するパラメータが代表値であるため、真値の M_s , N_s および f_s とは異なる。また、X-Y トラッカを用いたベース位置・姿勢角計測とエンコーダによる関節角計測には計測誤差が存在する。さらに、ベースは実験式を用いてスラスト駆動されるため、ベースの制御性能はシミュレーションと比較して必ず劣化する。

まず、ベース位置・姿勢の制御性能は、計算トルク法と分解加速度制御法のいずれも、シミュレーション結果 (Fig. 2.5(a) と (b)) と比較して実験結果 (Fig. 2.6 と 2.7) の方が同程度劣化していることがわかる。

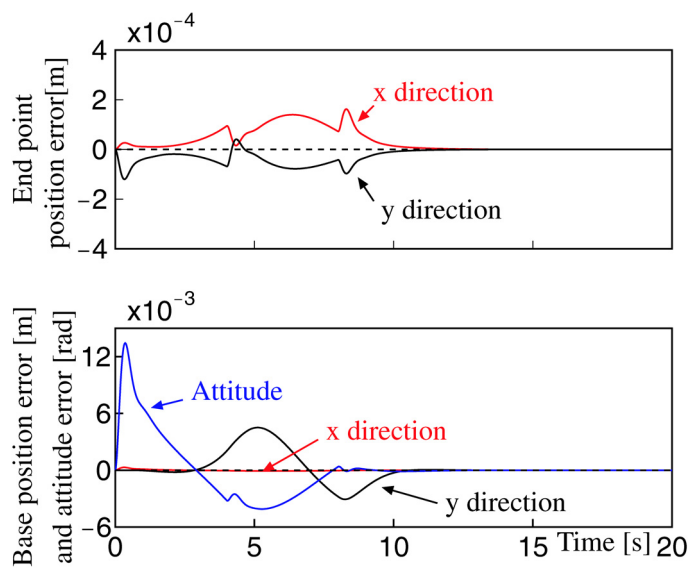
つぎに、マニピュレータ手先位置誤差に注目する。計算トルク法は、関節空間における誤差に基づいて制御入力を決定するため、手先位置はベース位置・姿勢誤差の影響を直接受ける。そのため、Fig. 2.6 より、計算トルク法の場合、ベース位置誤差が大きく変動している区間でマニピュレータ手先位置誤差も大きくなっていることが読み取れる。また、流体力に関するパラメータ誤差に起因する、ベースがマニピュレータから受ける力・トルクの計算値と真値の差により、ベースの位置・姿勢誤差が大きくなっていると考えられる。

一方、分解加速度制御法は、作業空間における誤差に基づいて制御入力を決定するため、Fig. 2.7 より、ベースが大きく変動している区間でもマニピュレータ手先位置誤差は十分抑制されていることがわかる。

なお、マニピュレータ手先が移動している区間 (0~10[s]) でのベースの姿勢誤差は、分解加速度制御法の結果は計算トルク法の結果に比べて十分小さく、マニピュレータから受ける力・トルクの計算値と真値の差による影響が抑制されていることが考えられる。現状では数学的解析は困難であるが、分解加速度制御法では、作業空間と関節空間を関係付ける式 (2.45) は、式 (2.33) より、運動量関係式の時間微分、すなわちベース入力に関する運動方程式を含んでいる。したがって、式 (2.46), (2.47) と (2.48) より、作業空間における目標値に対応する制御入力はベースに関する逆動

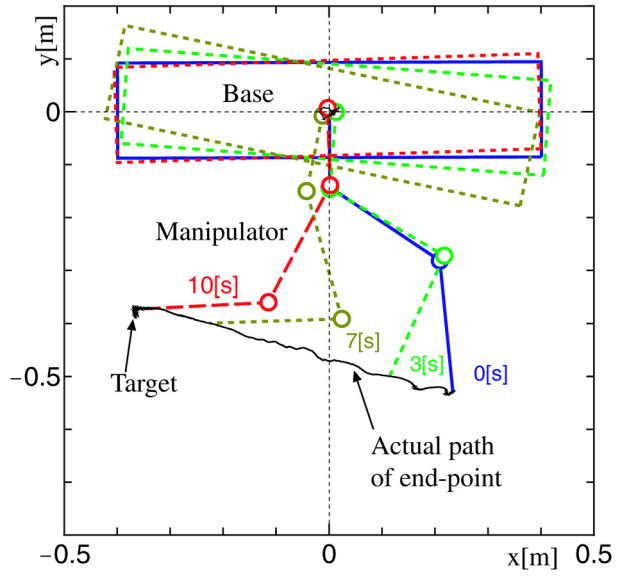


(a) Computed torque control

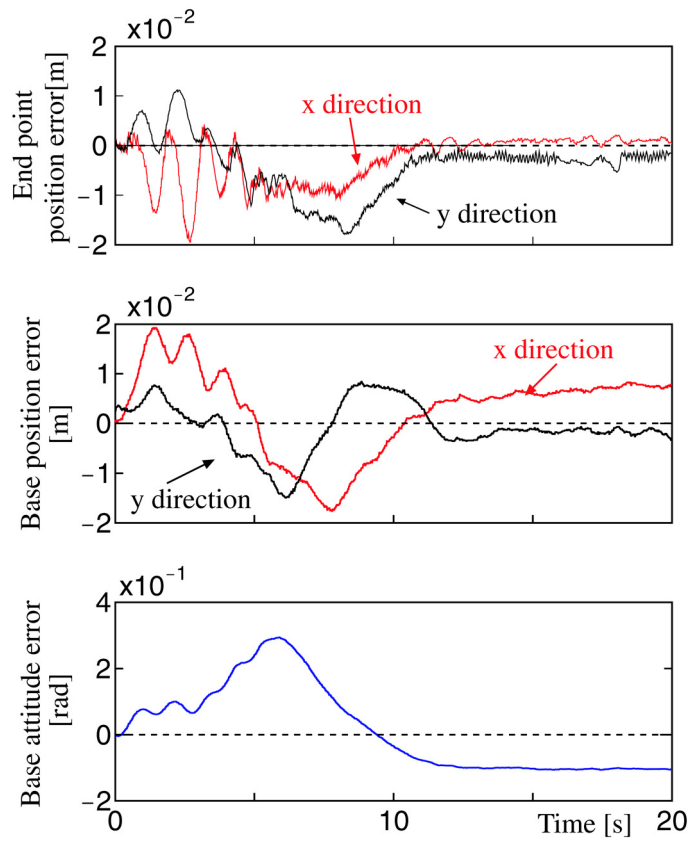


(b) Resolved acceleration control

Fig. 2.5: Simulation results both computed torque control and resolved acceleration control

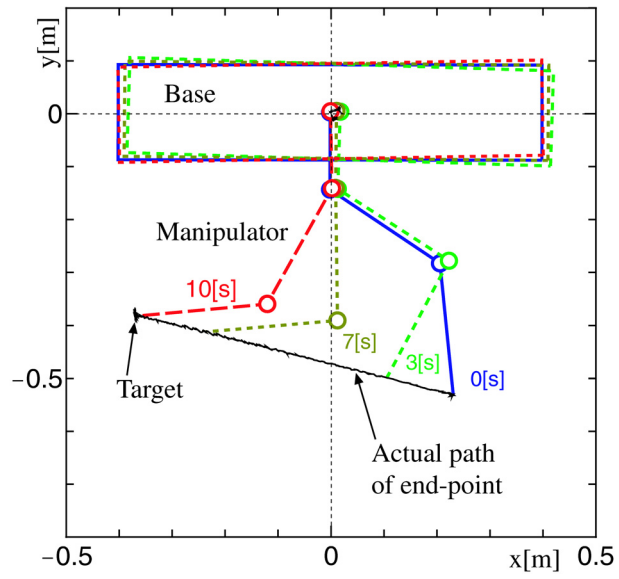


(a) Motion

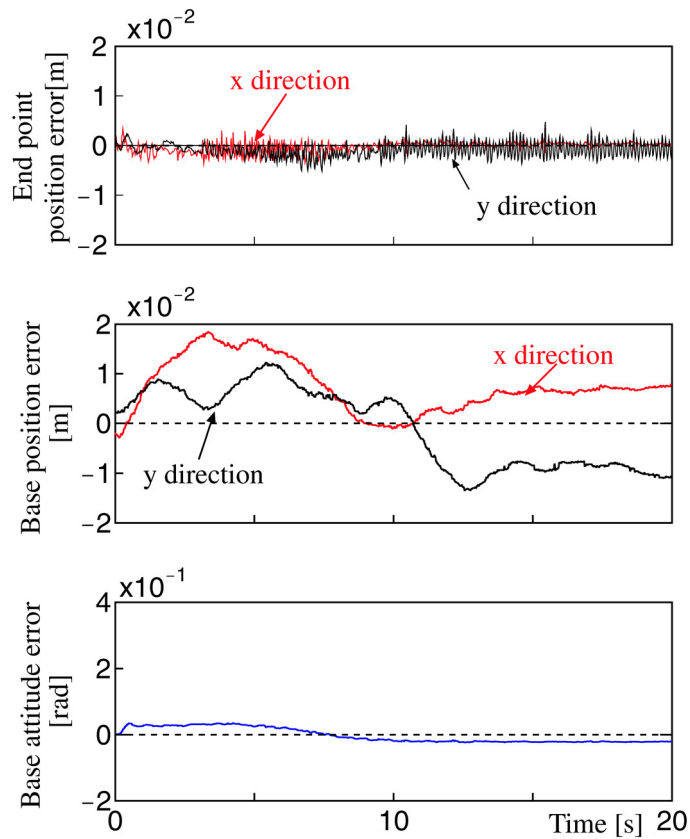


(b) Time history

Fig. 2.6: Experimental result of computed torque control



(a) Motion



(b) Time history

Fig. 2.7: Experimental result of resolved acceleration control

力学とロボット全体の動力学を用いて得られるため、ベースの流体力に起因するモデル化誤差の影響が抑制されていると考えられる。

以上より、モデルに流体力に関する不確かさと計測誤差が存在する実環境下において、分解加速度制御法は計算トルク法よりもUVMSに対して有用であることが確認できる。

2.4 まとめ

本章では、これまでUVMSに対して提案されている多くの制御法の基本であり、関節空間における位置と速度のフィードバックを行う計算トルク法と、著者らが提案しており、作業空間における位置と速度のフィードバックを行う分解加速度制御法の制御性能の比較を、2リンク水中ロボットを用いた実験により行った。実験による計算トルク法の有用性検証はこれまで行われておらず、理想状態での制御シミュレーションでは、計算トルク法と分解加速度制御法は同等の制御性能を有するが、計算トルク法を適用した制御実験では、計測誤差や流体力に関するモデリング誤差の影響により、制御性能が著しく劣化することを明らかにした。一方、分解加速度制御法は実験でも良好な制御性能を有することを明らかにした。

第3章 ヴィークル外乱補償を付加した UVMSの離散時間分解加速度 制御

第2章において、分解加速度制御法が計算トルク法よりもUVMSの制御法として有用であることを確認した。著者らは、第2章で示した連続時間分解加速度制御法のみならず、離散時間分解加速度制御法 [25] も提案している。また、連続時間分解加速度制御法の制御性能を向上する方法として、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い、ベース外乱補償を付加した連続時間分解加速度制御法も提案している [27]。本章では、ベース外乱補償を付加した離散時間分解加速度制御法を提案するとともに、第2章で示した水中ロボットを用いた実験により、外乱補償を付加した離散時間分解加速度制御法の有用性を示す。

3.1 離散時間分解加速度制御法

ここでは、Fig. 2.2のロボットに対して、まず、著者らが提案している離散時間分解加速度制御法およびマニピュレータ特異姿勢回避の一方法 [25] を示す。

3.1.1 離散時間分解加速度制御

ここでは、運動学関係式 (2.28) と運動量方程式 (2.29) を時間微分して得られた式 (2.45)

$$W_s \alpha_s = \beta_s + \gamma_s - \dot{W}_s \zeta_s \quad (3.1)$$

を離散化した式に対する、離散時間分解加速度制御法を説明する。ただし、式 (3.1) は、式 (2.45) の変数を $\alpha_s = \ddot{q}_s$, $\beta_s = \ddot{x}_s$ および $\zeta_s = \dot{q}_s$ で表現している。

まず、式(3.1)を演算時間遅れを考慮してサンプリング周期 T で離散化すると、

$$\mathbf{W}_s(k)\boldsymbol{\alpha}_s(k-1) = \frac{1}{T} [\boldsymbol{\nu}_s(k) - \boldsymbol{\nu}_s(k-1) + T\boldsymbol{\gamma}_s(k) - \{\mathbf{W}_s(k) - \mathbf{W}_s(k-1)\}\boldsymbol{\zeta}_s(k)] \quad (3.2)$$

となる。ただし、 $\boldsymbol{\nu}_s = \dot{\mathbf{x}}_s$ であり、 $\boldsymbol{\beta}_s(k)$ および $\dot{\mathbf{W}}_s(k)$ は

$$\boldsymbol{\beta}_s(k) = \frac{\boldsymbol{\nu}_s(k) - \boldsymbol{\nu}_s(k-1)}{T}, \quad \dot{\mathbf{W}}_s(k) = \frac{\mathbf{W}_s(k) - \mathbf{W}_s(k-1)}{T}$$

と後退差分近似している。

つぎに、 $\boldsymbol{\alpha}_s(k)$ の目標値 $\boldsymbol{\alpha}_s^{\text{ref}}(k)$ を次式で定義する。

$$\boldsymbol{\alpha}_s^{\text{ref}}(k) = \frac{1}{T} \{\mathbf{W}_s(k)\}^{-1} [\boldsymbol{\nu}_s^{\text{ref}}(k+1) - \boldsymbol{\nu}_s^{\text{ref}}(k) + \boldsymbol{\Lambda}\mathbf{e}_\nu(k) + T\boldsymbol{\gamma}_s(k)] \quad (3.3)$$

ただし、

$$\mathbf{e}_\nu(k) = \boldsymbol{\nu}_s^{\text{ref}}(k) - \boldsymbol{\nu}_s(k) \quad (3.4)$$

であり、また、 $\boldsymbol{\nu}_s^{\text{ref}}(k)$ は $\boldsymbol{\nu}_s(k)$ の目標値、 $\boldsymbol{\Lambda} = \text{diag}\{\lambda_i\}$ ($i = 1, \dots, 5$) は速度フィードバックゲイン行列である。

式(3.2)と(3.3)より次式の誤差方程式を得る。

$$\begin{aligned} T\mathbf{W}_s(k)\mathbf{e}_\alpha(k-1) &= \mathbf{e}_\nu(k) - \mathbf{e}_\nu(k-1) + \boldsymbol{\Lambda}\mathbf{e}_\nu \\ &\quad - T\{\boldsymbol{\gamma}_s(k) - \boldsymbol{\gamma}_s(k-1)\} + \{\mathbf{W}_s(k) - \mathbf{W}_s(k-1)\}\boldsymbol{\zeta}_s(k) \end{aligned} \quad (3.5)$$

ただし、

$$\mathbf{e}_\alpha(k) = \boldsymbol{\alpha}_s^{\text{ref}}(k) - \boldsymbol{\alpha}_s(k) \quad (3.6)$$

である。ここで、1サンプリング周期間において、 $\mathbf{W}_s(k)$ と $\boldsymbol{\gamma}_s(k)$ の変化が小さい、すなわち $\mathbf{W}_s(k) \approx \mathbf{W}_s(k-1)$ と $\boldsymbol{\gamma}_s(k) \approx \boldsymbol{\gamma}_s(k-1)$ を仮定すると、式(3.5)は次式となる。

$$T\mathbf{W}_s(k+1)\mathbf{e}_\alpha(k) = \{(q-1)\mathbf{E}_5 + \boldsymbol{\Lambda}\}\mathbf{e}_\nu(k) \quad (3.7)$$

ただし、 q はシフト演算子である。 $\mathbf{W}_s(k)$ の要素はすべて有界であるので、 λ_i を $0 < \lambda_i < 1$ に選べば、式(3.7)より、 $\mathbf{e}_\alpha(k) \rightarrow \mathbf{0}$ ($k \rightarrow \infty$) のとき $\mathbf{e}_\nu(k) \rightarrow \mathbf{0}$ が保証される。

さらに、 $\boldsymbol{\nu}_s(k)$ の目標値 $\boldsymbol{\nu}_s^{\text{ref}}(k)$ を次式で定義する。

$$\boldsymbol{\nu}_s^{\text{ref}}(k) = \frac{1}{T} \{\mathbf{x}_s^{\text{des}}(k) - \mathbf{x}_s^{\text{des}}(k-1) + \boldsymbol{\Gamma}\mathbf{e}_x(k-1)\} \quad (3.8)$$

ただし、

$$\mathbf{e}_x(k) = \mathbf{x}_s^{\text{des}}(k) - \mathbf{x}_s(k) \quad (3.9)$$

で、 $\mathbf{x}_s^{\text{des}}(k)$ は $\mathbf{x}_s(k)$ の目標値、また、 $\mathbf{\Gamma} = \text{diag}\{\gamma_i\}$ ($i = 1, \dots, 5$) は位置誤差フィードバックゲインである。

式 (3.4) と (3.8) より次式の誤差方程式を得る。

$$T\mathbf{W}_s(k+1)\mathbf{e}_\nu(k) = \{\mathbf{E}_5 - (\mathbf{E}_5 - \mathbf{\Gamma})q^{-1}\}\mathbf{e}_x(k) \quad (3.10)$$

ただし、 $\boldsymbol{\nu}_s(k)$ は

$$\boldsymbol{\nu}_s(k) = \frac{\mathbf{x}_s(k) - \mathbf{x}_s(k-1)}{T}$$

と後退差分近似している。式 (3.10) より、 γ_i を $0 < \gamma_i < 1$ に選べば、 $\mathbf{e}_\nu(k) \rightarrow \mathbf{0}$ ($k \rightarrow \infty$) のとき $\mathbf{e}_x(k) \rightarrow \mathbf{0}$ が保証される。

3.1.2 マニピュレータ特異姿勢回避

マニピュレータを搭載した水中ロボットによる作業の多くは、ロボットベースの位置・姿勢を保持した状態でのマニピュレータ手先の位置・姿勢制御が考えられる。しかしながら、このような条件下でマニピュレータが特異姿勢にならない作業を、事前に把握することは困難である。そこで、基本的なベースの位置・姿勢は作業開始時点の状態を保持する条件下におけるマニピュレータの特異姿勢を回避する方法として、マニピュレータの手先速度と関節速度を関係付けるヤコビ行列、すなわちマニピュレータの可操作度に基づいてベースの位置・姿勢を修正する方法を、著者らは提案している [25]。

マニピュレータのヤコビ行列 $\mathbf{J}_M(k)$ の行列式を $J(k) = \det\mathbf{J}_M(k)$ とし、その絶対値 $|J(k)|$ に対して閾値 J_s を設定する。 $|J(k)|$ が J_s より小さくなったときの時間を k_1T 、また、 $|J(k)|$ が J_s より大きくなったときの時間を k_2T とし、マニピュレータ手先の目標速度を用いてベースの目標加速度を次式で与える。

$$\ddot{\mathbf{x}}_{s_0}^{\text{des}}(k) = \begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_{s_e}^{\text{ref}}(k) & (k_1 \leq k < k_1 + n_a) \\ \mathbf{0} & (\text{otherwise}) \\ -\dot{\mathbf{x}}_{s_e}^{\text{ref}}(k) & (k_2 \leq k < k_2 + n_a) \end{cases} \quad (3.11)$$

ただし、 n_aT は加速時間であり、このベース目標加速度 $\ddot{\mathbf{x}}_{s_0}^{\text{des}}(k)$ を数値積分したベース目標値 $\mathbf{x}_{s_0}^{\text{des}}(k)$ を 3.1.1 項の離散時間分解加速度制御法に適用する。

3.2 ベース外乱補償

水中で運動する物体の付加質量・付加慣性モーメントと流体抗力係数は、厳密には物体の運動に依存してそれらの値が変動するが、水中ロボットのモデリングおよ

び制御では、それらの値はロボットの構成要素に基づいた一定値が用いられる [59]. しかしながら、実際には水中ロボットに作用する付加質量と付加慣性モーメントによる付加慣性力および流体抵抗、すなわち流体力は真値が未知、かつ、ロボットの運動により変動する. したがって、2.1 節で示した運動量方程式および運動方程式は、流体力に起因するモデル化誤差を含んでいる.

一定値の付加質量、付加慣性モーメントと流体抗力係数を用いた場合、前節の式 (3.3) と (3.8) から構成される離散時間分解加速度制御法はモデル化誤差の影響を受けるが、ベースおよびマニピュレータ手先の位置と速度のフィードバックによりモデル化誤差の影響を抑制可能である.

ここで、マニピュレータが速度型関節サーボ機構を有する場合、式 (3.3) で得られる関節空間における目標加速度 $\alpha_s^{\text{ref}}(k) = [(\ddot{\mathbf{x}}_{s_0}^{\text{ref}})^T, (\ddot{\phi}^{\text{ref}})^T]^T$ の要素である目標関節角加速度 $\ddot{\phi}^{\text{ref}}$ の数値積分値、すなわち、目標関節角速度 $\dot{\phi}^{\text{ref}}$ をマニピュレータ関節は実現する. 一方、ベース制御入力¹の力とトルクは、制御則で得られる目標加速度 $\ddot{\mathbf{x}}_{s_0}^{\text{ref}}$ および $\ddot{\phi}^{\text{ref}}$ と、付加質量、付加慣性モーメントと流体抗力係数を一定値としたベース運動方程式より求めるため、この運動方程式のモデル化誤差の影響を軽減できれば、制御系の制御性能が向上すると考えられる. そこで、このモデル化誤差を外乱として取り扱い、外乱オブザーバを用いた外乱補償を行う. なお、外乱オブザーバは連続時間系で構成したものを離散化して分解加速度制御法に付加する.

ベース運動方程式 (2.31) において、 \mathbf{M}_{BB} の付加質量、付加慣性モーメントと流体抗力係数を一定値としたベースの公称慣性モデルを $\bar{\mathbf{M}}_{\text{BB}}$ とする. まず、公称モデルによる慣性力 $\bar{\mathbf{M}}_{\text{BB}}\ddot{\mathbf{x}}_0$ 以外によって発生する力をすべて外乱 \mathbf{f}_L とみなすと、

$$\mathbf{f}_L = \mathbf{u}_B - \bar{\mathbf{M}}_{\text{BB}}\ddot{\mathbf{x}}_0 \quad (3.12)$$

となる. また、その推定値 $\hat{\mathbf{f}}_L$ は時定数 T_f の 1 次フィルタ $F(p) = 1/(T_f p + 1)$ を用いて

$$\hat{\mathbf{f}}_L = F(p) (\mathbf{u}_B - \bar{\mathbf{M}}_{\text{BB}}\ddot{\mathbf{x}}_0) \quad (3.13)$$

で求められる [62]. ただし、 p は微分演算子である.

したがって、ベース目標加速度 $\ddot{\mathbf{x}}_0^{\text{ref}}$ に対して、外乱を補償したベースの制御入力 \mathbf{u}_B は

$$\mathbf{u}_B = \bar{\mathbf{M}}_{\text{BB}}\ddot{\mathbf{x}}_0^{\text{ref}} + \hat{\mathbf{f}}_L \quad (3.14)$$

となり、ベース外乱補償の基本構成は Fig. 3.1 となる.

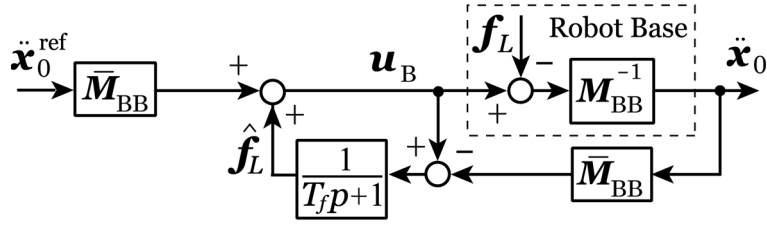


Fig. 3.1: Basic disturbance compensation (continuous version)

さて，Fig. 3.1の外乱補償は，公称モデルによる慣性力 $\bar{\mathbf{M}}_{\text{BB}}\ddot{\mathbf{x}}_0$ 以外によって発生する力をすべて外乱 \mathbf{f}_L とみなして推定する構成となっている．そこで，ベース運動方程式(2.31)を付加質量，付加慣性モーメントと流体抗力係数を一定値とした式を用いて，Fig. 3.1を流体力に関するモデル化誤差のみを推定する構成に修正する．

まず，ベース運動方程式(2.31)において， \mathbf{M}_{BM} ， \mathbf{N}_{BB} ， \mathbf{N}_{BM} と \mathbf{f}_B の付加質量，付加慣性モーメントおよび流体抗力係数を一定値とした要素を，それぞれ $\bar{\mathbf{M}}_{\text{BM}}$ ， $\bar{\mathbf{N}}_{\text{BB}}$ ， $\bar{\mathbf{N}}_{\text{BM}}$ と $\bar{\mathbf{f}}_B$ とし，そのとき得られるベース入力を $\bar{\mathbf{u}}_B$ とすると，

$$\bar{\mathbf{M}}_{\text{BB}}\ddot{\mathbf{x}}_0 + \bar{\mathbf{M}}_{\text{BM}}\ddot{\phi} + \bar{\mathbf{N}}_{\text{BB}}\dot{\mathbf{x}}_0 + \bar{\mathbf{N}}_{\text{BM}}\dot{\phi} + \bar{\mathbf{f}}_B = \bar{\mathbf{u}}_B \quad (3.15)$$

となる．

つぎに，式(3.15)左辺の公称モデルによる慣性力 $\bar{\mathbf{M}}_{\text{BB}}\ddot{\mathbf{x}}_0$ 以外の項を

$$\mathbf{f}_t = \bar{\mathbf{M}}_{\text{BM}}\ddot{\phi}^{\text{ref}} + \bar{\mathbf{N}}_{\text{BB}}\dot{\mathbf{x}}_0 + \bar{\mathbf{N}}_{\text{BM}}\dot{\phi} + \bar{\mathbf{f}}_B \quad (3.16)$$

とすると，流体力に関するモデル化誤差は

$$\mathbf{f}_E = \mathbf{u}_B - \bar{\mathbf{M}}_{\text{BB}}\ddot{\mathbf{x}}_0^{\text{ref}} - \mathbf{f}_t \quad (3.17)$$

となる．式(3.13)と同様に， \mathbf{f}_E の推定値 $\hat{\mathbf{f}}_E$ は

$$\hat{\mathbf{f}}_E = F(p) (\mathbf{u}_B - \bar{\mathbf{M}}_{\text{BB}}\ddot{\mathbf{x}}_0 - \mathbf{f}_t) \quad (3.18)$$

で求められ，ベースの制御入力 \mathbf{u}_B は

$$\mathbf{u}_B = \bar{\mathbf{M}}_{\text{BB}}\ddot{\mathbf{x}}_0^{\text{ref}} + \mathbf{f}_t + \hat{\mathbf{f}}_E \quad (3.19)$$

となり，Fig. 3.1の外乱補償の構成はFig. 3.2となる[27]．

さらに，Fig. 3.2の外乱補償は連続時間系の構成であるので，連続時間フィルタ

$$F(p) = \frac{1}{T_f p + 1}$$

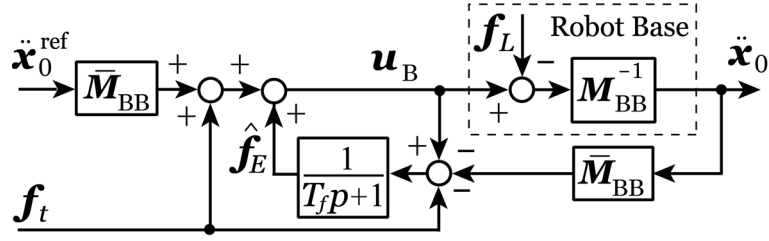


Fig. 3.2: Modified disturbance compensation (continuous version)

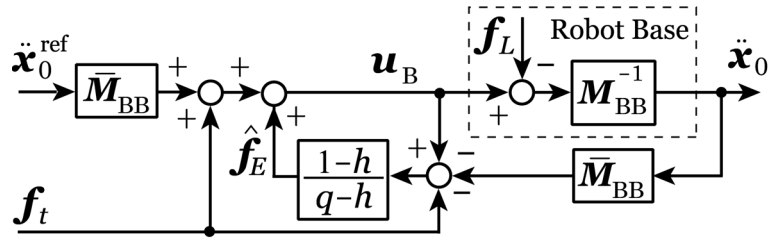


Fig. 3.3: Disturbance compensation (discrete version)

を

$$F(q) = \frac{1-h}{q-h}$$

と離散化 [63] した Fig. 3.3 の外乱補償を，分解加速度制御法に付加して制御系を構成する．ただし， $h = e^{-T_f/T}$ である．

3.3 実験

ここでは，ベース外乱補償を付加した離散時間分解加速度制御法の有用性を，第2章と同じく，Fig. 2.1 の水中ロボットへの適用実験により検証する．

3.3.1 トルク型関節サーボ機構を有するロボット

ここでは，マニピュレータ関節がトルク型サーボ機構を有する水中ロボットに対しても，離散時間分解加速度制御法が，第2章で示した連続時間分解加速度制御法と同様の制御性能を有することを示すとともに，ベース外乱補償の有用性を示す．

実験条件は次のとおりである．ロボットの初期相対関節角度は $\phi_0 = -\pi/2[\text{rad}]$, $\phi_1 = \pi/3[\text{rad}]$ と $\phi_2 = -5\pi/18[\text{rad}]$ とし，ベース目標値は初期状態を保持するよう設定した．マニピュレータ手先目標値は，到達時間 10[s]，加減速時間 3[s] の初期手先位置からターゲットまでの直線軌道で，ターゲットを初期位置から x 方向に $-0.60[\text{m}]$ ， y 方向に $0.15[\text{m}]$ 離れた位置に設定した．なお，これらの設定値は第 2 章の実験と同一である．また，制御系のサンプリング周期は X-Y トラックの処理速度にあわせた $T = 1/60[\text{s}]$ とし，外乱補償のフィルタ時定数は $T_f = 0.1[\text{s}]$ ，位置と速度のフィードバックゲインを，それぞれ $\mathbf{F} = \text{diag}\{0.3, 0.3, 0.2, 0.2, 0.2\}$ と $\mathbf{A} = \text{diag}\{0.3, 0.3, 0.2, 0.2, 0.2\}$ に設定した．

ベース外乱補償なしの場合とありの場合の実験結果を，それぞれ Fig. 3.4 と 3.5 に示す．

ベース外乱補償なしの結果である Fig. 3.4 は，連続時間系の結果である Fig. 2.7 と同程度の良好な制御性能を有していることがわかる．また，ベース外乱補償ありの結果である Fig. 3.5 は，外乱補償なしの結果 Fig. 3.4 よりもベースの位置・姿勢誤差が全体的に小さく，その結果手先の最大誤差も小さくなっていることもわかる．

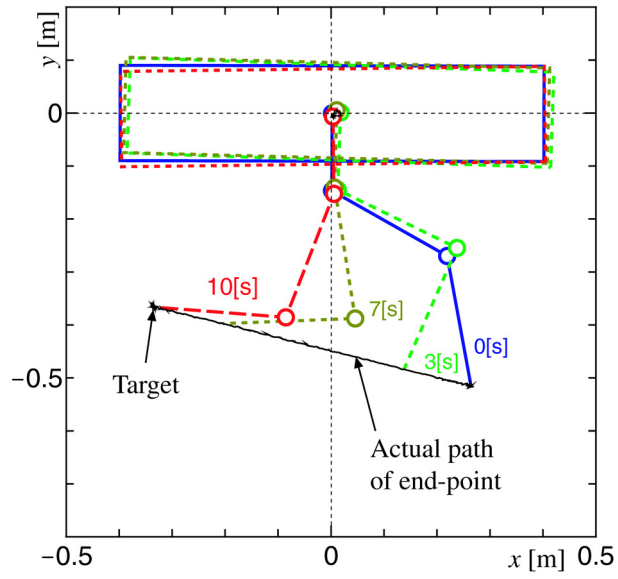
3.3.2 速度型関節サーボ機構を有するロボット

ここでは，マニピュレータ関節が速度型サーボ機構を有する水中ロボットに対して，マニピュレータ特異姿勢回避を行う実験を行い，ベース外乱補償の有用性を示す．

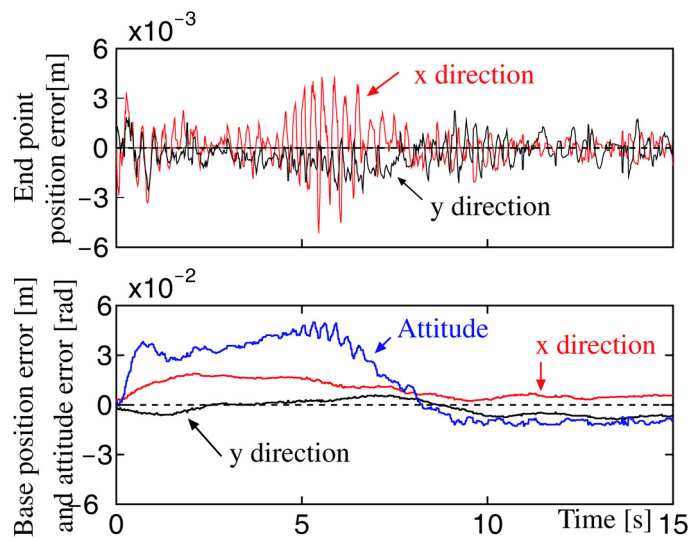
実験条件は次のとおりである．マニピュレータ手先ターゲット位置と外乱補償のフィルタ時定数以外の設定値は，3.3.2 項と同一とした．ターゲットは，ベースを移動させなければマニピュレータが軌道追従の途中で特異姿勢となるよう，初期位置から x 方向に $-0.60[\text{m}]$ ， y 方向に $-0.15[\text{m}]$ 離れた位置に設定した．また，この特異姿勢回避のためのパラメータは，ヤコビ行列の行列式 $J(k)$ の絶対値に関する閾値は $J_s = 0.45$ とし，加減速時間は $n_a = 60$ ，すなわち 1[s] に設定した．さらに，外乱補償のフィルタ時定数は，マニピュレータが速度型関節サーボ機構で駆動されるため，マニピュレータからベースが受ける力とトルクの変動が大きくなると考えられるため， $T_f = 10[\text{s}]$ とした．

ベース外乱補償なしの場合とありの場合の実験結果を，それぞれ Fig. 3.6 と 3.7 に示す．

まず，Fig. 3.6 と 3.7 より，両者ともマニピュレータ特異姿勢回避のためベースが移動している区間 ($\ddot{\mathbf{x}}_{s_0}^{\text{des}}$ が変化している約 5~10[s]) において，ベースの位置・姿勢誤差が他の区間と比較して大きくなっていることがわかる．それにともないマニピュ



(a) Motion

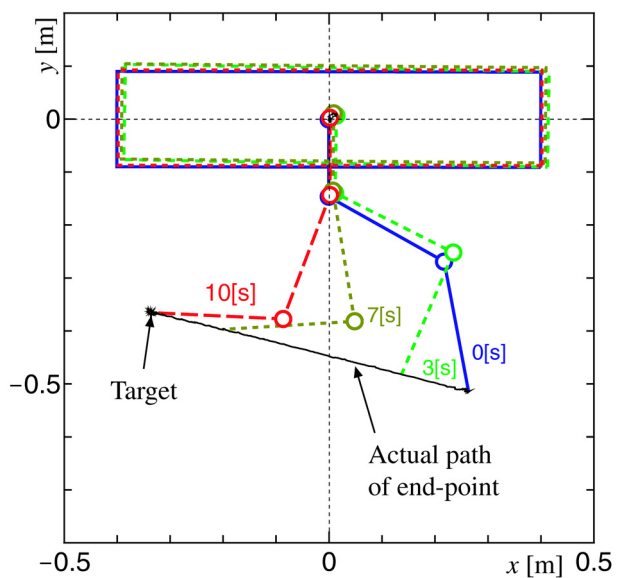


(b) Time history

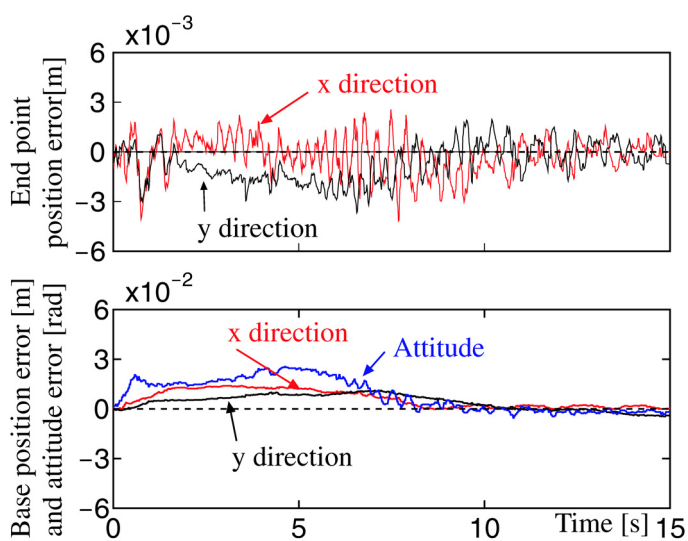
Fig. 3.4: Experimental result without disturbance compensation of base (joint torque type)

レータ手先の位置誤差も若干大きくなっているが、全般的に手先位置制御性能は良好である。

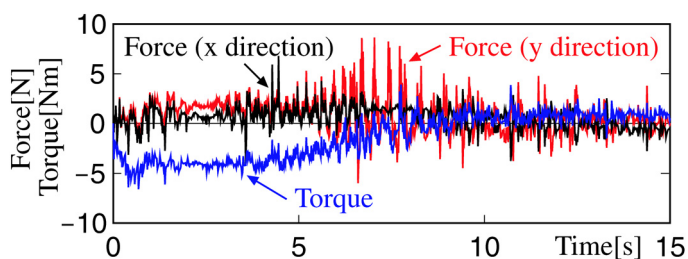
次に、ベース外乱補償の効果について着目する。Fig. 3.6 の外乱補償なしの場合と



(a) Motion

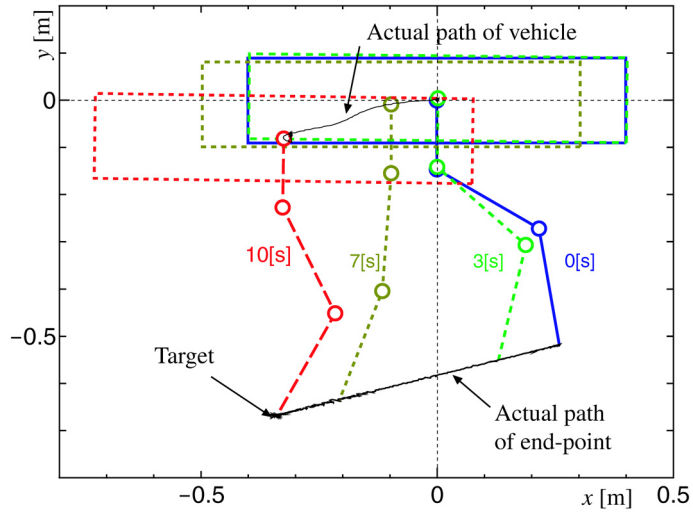


(b) Time history

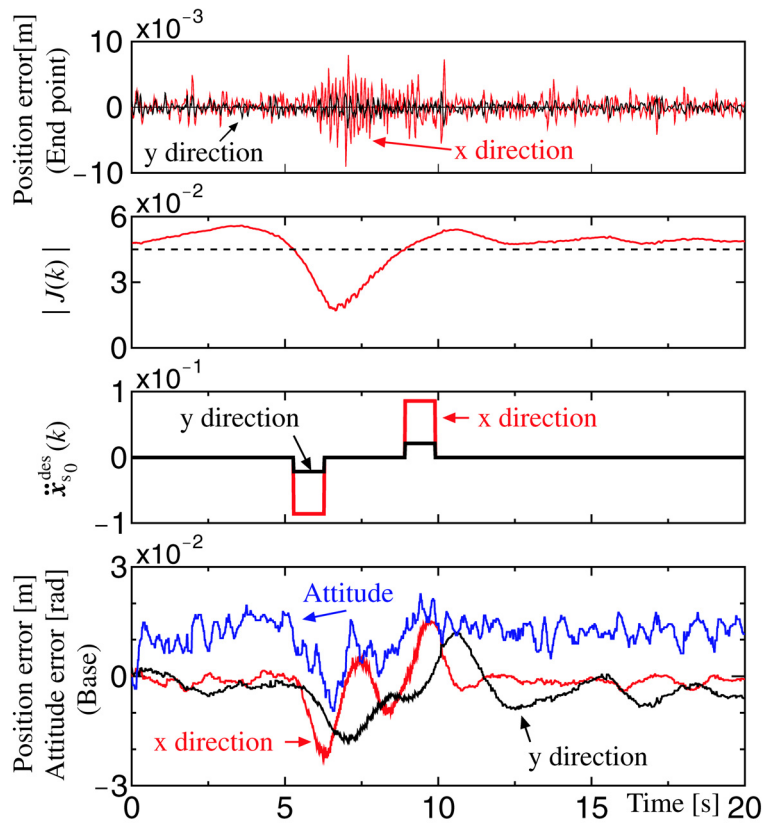


(c) Estimated disturbance

Fig. 3.5: Experimental result with disturbance compensation of base (joint torque type)

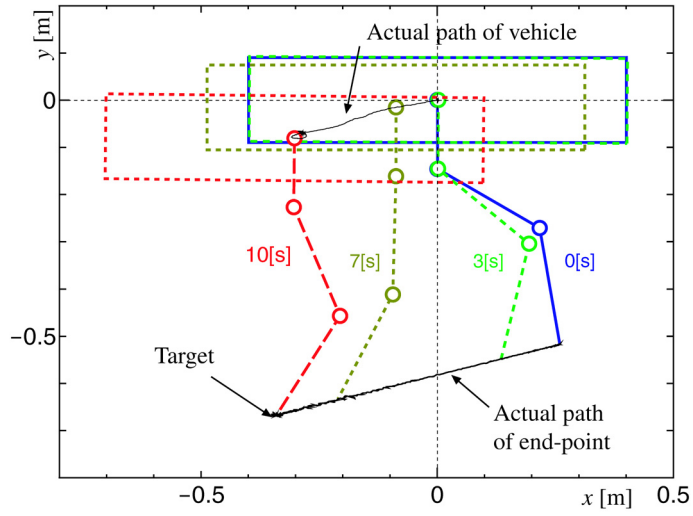


(a) Motion

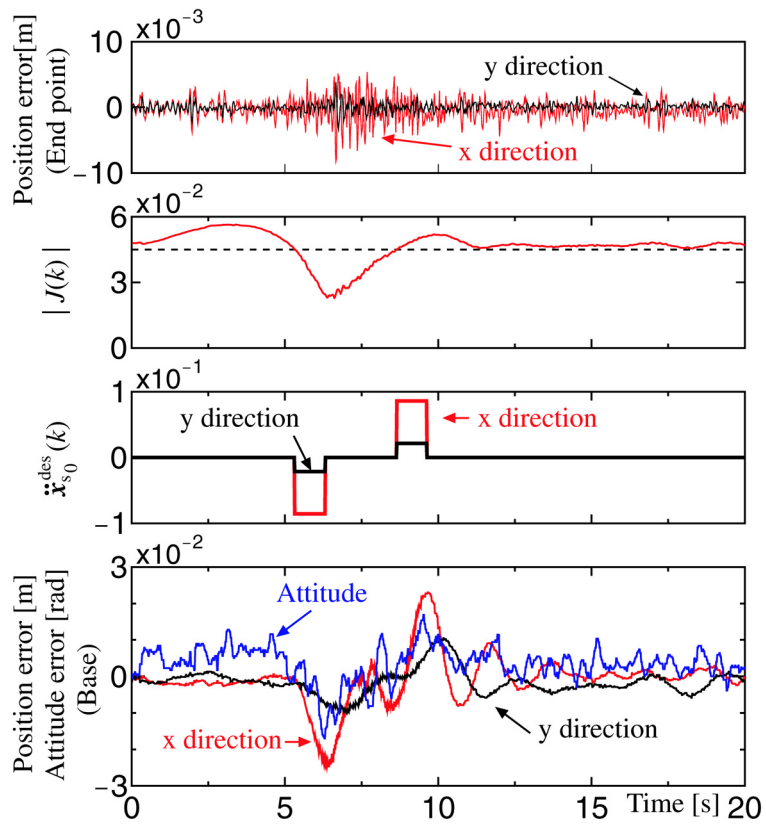


(b) Time history

Fig. 3.6: Experimental result without disturbance compensation of base (joint velocity type)



(a) Motion



(b) Time history

Fig. 3.7: Experimental result with disturbance compensation of base (joint velocity type)

比較して、Fig. 3.7の外乱補償ありの場合はベースの変動が抑制されている。また、マニピュレータ手先の目標値が変化している区間(0~10[s])において、手先誤差の振動振幅も抑制されていることも読み取れる。

3.4 まとめ

本章では、まず、ベース外乱補償を付加した離散時間分解加速度制御法を提案した。つぎに、第2章で示した水中ロボットを用いた種々の実験を行い、提案制御法の有用性を確認した。マニピュレータがトルク型関節サーボ機構を有する場合の実験では、離散時間制御法が連続時間制御法と同程度の良好な制御性能を有し、ベース外乱補償を付加した場合、制御性能が向上することを示した。また、マニピュレータが速度型関節サーボ機構を有する場合に対する、ベース外乱補償なしとありのマニピュレータ特異姿勢回避実験では、ベース外乱補償を付加することにより、トルク型関節サーボ機構と同様に、制御性能が向上することを示した。

第4章 物体操作のためのUVMSの離散時間外乱補償分解加速度制御

第3章では、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い、ベース外乱補償を付加した離散時間分解加速度制御法を提案し、実験により提案制御法の有用性を示した。さて、UVMSによる物体の操作は、速度型関節サーボ機構を有するマニピュレータの場合、マニピュレータは操作対象物体による手先の質量変化に関わらず所望の運動を実現できるので、第3章の制御法で対応可能である。しかしながら、マニピュレータがトルク型関節サーボ機構を有する場合は、操作対象物体により関節トルクが変動するため、所望の作業が実現できないことが十分考えられる。そこで、本章では、トルク型関節サーボ機構を有するマニピュレータを搭載した水中ロボットに対して、流体力も含めたロボット全体に作用する外力のモデル化誤差を外乱として取り扱う、外乱補償分解加速度制御法を提案するとともに、ハンドを装備した2リンク水中ロボットによる物体捕獲実験により、提案制御法の有用性を示す。

4.1 ハンドを装備した2リンク水中ロボット

ここでは、本章で提案するUVMSの外乱補償制御法の有用性を検証するために製作した、物体把持が可能なハンドを装備した実験用水中ロボットの構成を示す。

製作したロボットの写真と物理パラメータを、それぞれFig. 4.1とTable 4.1に示す。まず、ロボットベースはFig. 2.1の水中ロボットと同一である。つぎに、2リンクマニピュレータは、Fig. 4.2に示す円筒形リンクとハンドから構成される。円筒形リンクは、Fig. 2.1の水中ロボットでも用いているエンコーダ付ACモータとギヤ比100のギヤが内挿されており、ギヤ出力軸と関節軸の間はオイルシールで2重防水されている。また、第2リンクに装備したハンドは水密容器内のDCモータ出力軸の回転をマグネットカップリングを介して容器外の送りねじを回転し、三つの爪を開閉する機構となっている。また、物体との衝突によるロボットへの影響を緩和

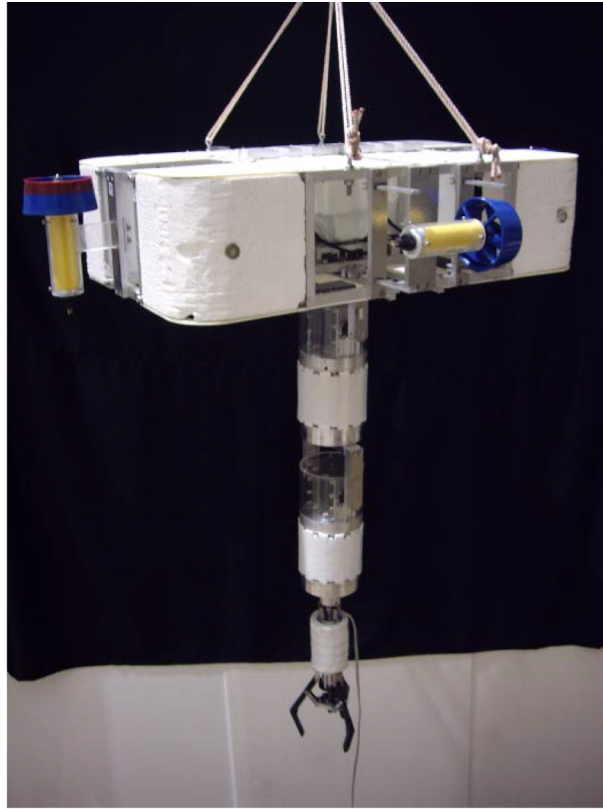


Fig. 4.1: Underwater robot with hand

Table 4.1: Physical parameters of underwater robot

	Base	Link 1	Link 2
Mass [kg]	20.82	4.25	5.89
Volume [m ³]	28.3×10^{-3}	3.79×10^{-3}	4.49×10^{-3}
Moment of inertia [kg m ²]	1.330	0.075	0.260
Link length (x axis) [m]	0.21	0.345	0.64
Link length (y axis) [m]	0.81	0.04	0.04
Link width [m]	0.42	0.13	0.13
Added mass (x) [kg]	72.70	0.35	0.35
Added mass (y) [kg]	6.28	3.31	3.92
Added moment of inertia [kg m ²]	1.05	0.06	0.075
Drag coefficient (x)	1.2	0	0
Drag coefficient (y)	1.2	1.0	1.0

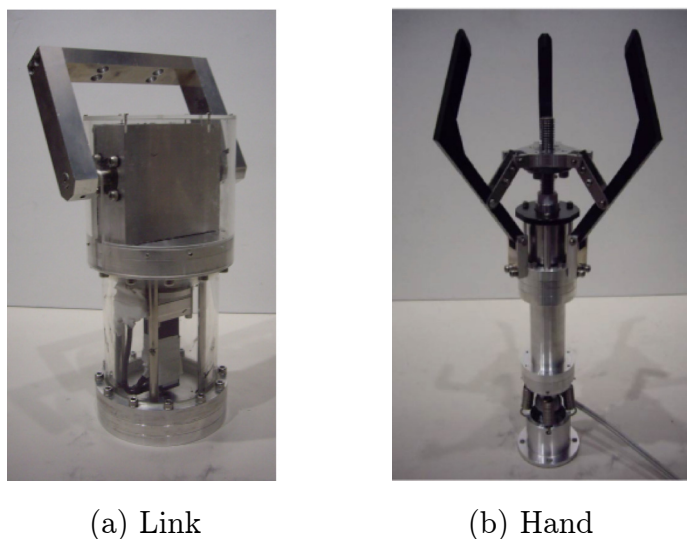


Fig. 4.2: Elements of manipulator

するため，ハンドの手首にはボールジョイントとばねが取り付けられている．

4.2 UVMSの外乱補償

ここでは，前節で示したハンドを装備した2リンク水中ロボットを対象として，分解加速度制御法で得られる関節空間における目標加速度をUVMSが高精度に実現できる外乱補償法を示す．なお，この外乱補償法は3次元空間で運動する n リンク水中ロボットにも容易に適用可能である．

まず，第2章で示したFig. 2.2の2リンク水中ロボットモデルの運動方程式(2.30)を改めて示す．

$$\mathbf{M}_s(\mathbf{q}_s)\ddot{\mathbf{q}}_s + \mathbf{N}_s(\mathbf{q}_s, \dot{\mathbf{q}}_s)\dot{\mathbf{q}}_s + \mathbf{f}_s = \mathbf{u}_s \quad (4.1)$$

ただし， $\mathbf{x}_e = [p_{e_x}, p_{e_y}]^T$ ， $\mathbf{x}_0 = [r_{0_x}, r_{0_y}, \phi_0]^T$ ， $\mathbf{s}_s = [\eta_x, \eta_y, \mu_z]^T$ ， $\mathbf{q}_s = [\mathbf{x}_0^T, \boldsymbol{\phi}^T]^T$ ， $\mathbf{u}_s = [f_{0_x}, f_{0_y}, n_{0_z}, \tau_1, \tau_2]^T$ である．

運動方程式(4.1)において， \mathbf{M}_s の付加質量，付加慣性モーメントと流体抗力係数を一定値としたロボットの公称慣性モデルを $\bar{\mathbf{M}}_s$ とする．まず，公称モデルによる慣性力 $\bar{\mathbf{M}}_s\ddot{\mathbf{q}}_s$ 以外によって発生する力をすべて外乱 \mathbf{f}_L とみなすと，

$$\mathbf{f}_L = \mathbf{u}_s - \bar{\mathbf{M}}_s\ddot{\mathbf{q}}_s \quad (4.2)$$

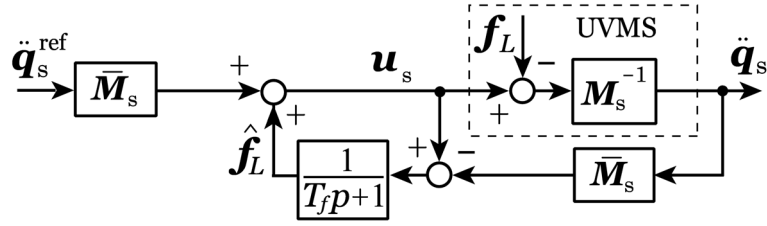


Fig. 4.3: Basic disturbance compensation (continuous version)

となる．また，その推定値 $\hat{\mathbf{f}}_L$ は時定数 T_f の 1 次フィルタ $F(p) = 1/(T_f p + 1)$ を用いて

$$\hat{\mathbf{f}}_L = F(p) (\mathbf{u}_s - \bar{\mathbf{M}}_s \ddot{\mathbf{q}}_s) \quad (4.3)$$

で求められる [62]．ただし， p は微分演算子である．

したがって，目標加速度 $\ddot{\mathbf{q}}_s^{\text{ref}}$ に対して，外乱を補償した制御入力 \mathbf{u}_s は

$$\mathbf{u}_s = \bar{\mathbf{M}}_s \ddot{\mathbf{q}}_s^{\text{ref}} + \hat{\mathbf{f}}_L \quad (4.4)$$

となり，外乱補償の基本構成は Fig. 4.3 となる．

さて，Fig. 4.3 の外乱補償は，公称モデルによる慣性力 $\bar{\mathbf{M}}_s \ddot{\mathbf{q}}_s$ 以外によって発生する力をすべて外乱 \mathbf{f}_L とみなして推定する構成となっている．そこで，水中ロボットの運動方程式 (4.1) を付加質量，付加慣性モーメントと流体抗力係数を一定値とした式を用いて，流体力に関するモデル化誤差およびマニピュレータ手先が把持した物体による力とトルクの変化を推定する構成に，Fig. 4.3 を修正する．

まず，運動方程式 (4.1) において， \mathbf{N}_s と \mathbf{f}_s の付加質量，付加慣性モーメントおよび流体抗力係数を一定値とした要素を，それぞれ $\bar{\mathbf{N}}_s$ と $\bar{\mathbf{f}}_s$ とし，そのとき得られる入力を $\bar{\mathbf{u}}_s$ とすると，

$$\bar{\mathbf{M}}_s \ddot{\mathbf{q}}_s + \bar{\mathbf{N}}_s \dot{\mathbf{q}}_s + \bar{\mathbf{f}}_s = \bar{\mathbf{u}}_s \quad (4.5)$$

となる．

つぎに，式 (4.5) 左辺の公称モデルによる慣性力 $\bar{\mathbf{M}}_s \ddot{\mathbf{q}}_s$ 以外の項を

$$\mathbf{f}_t = \bar{\mathbf{N}}_s \dot{\mathbf{q}}_s + \bar{\mathbf{f}}_s \quad (4.6)$$

とすると，流体力および把持物体に関するモデル化誤差は

$$\mathbf{f}_E = \mathbf{u}_s - \bar{\mathbf{M}}_s \ddot{\mathbf{q}}_s^{\text{ref}} - \mathbf{f}_t \quad (4.7)$$

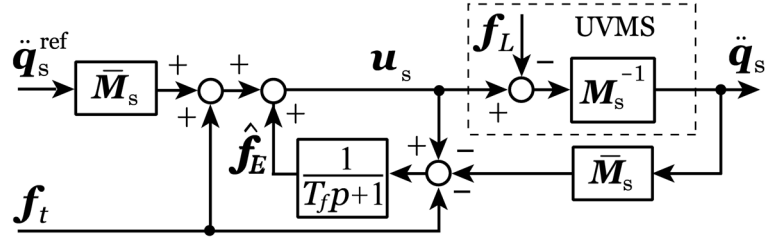


Fig. 4.4: Modified disturbance compensation (continuous version)

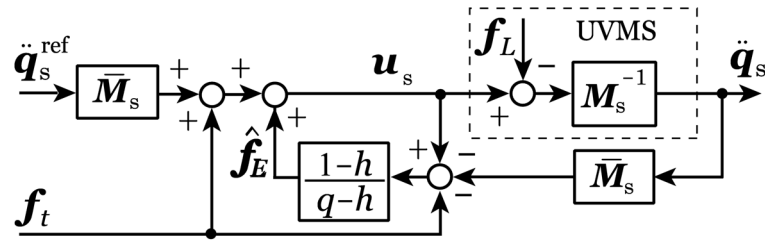


Fig. 4.5: Disturbance compensation (discrete version)

となる．式 (4.3) と同様に， \mathbf{f}_E の推定値 $\hat{\mathbf{f}}_E$ は

$$\hat{\mathbf{f}}_E = F(p) (\mathbf{u}_s - \bar{\mathbf{M}}_s \ddot{\mathbf{q}}_s - \mathbf{f}_t) \quad (4.8)$$

で求められ，制御入力 \mathbf{u}_s は

$$\mathbf{u}_s = \bar{\mathbf{M}}_s \ddot{\mathbf{q}}_s^{\text{ref}} + \mathbf{f}_t + \hat{\mathbf{f}}_E \quad (4.9)$$

となり，Fig. 4.3 の外乱補償の構成は Fig. 4.4 となる．

さらに，Fig. 4.4 の外乱補償は連続時間系の構成であるので，連続時間フィルタ

$$F(p) = \frac{1}{T_f p + 1}$$

を

$$F(q) = \frac{1-h}{q-h}$$

と離散化 [63] した Fig. 4.5 の外乱補償を，分解加速度制御法に付加して制御系を構成する．ただし， $h = e^{-T_f/T}$ である．

4.3 実験

ここでは、3.3.1項の離散時間分解加速度法に4.2項の外乱補償法を付加した制御系の有用性を、マニピュレータ関節サーボ機構をトルク型とした、Fig. 4.1のハンドを装備した2リンク水中ロボットの物体捕獲実験により示す。

まず、実験条件は次のとおりである。捕獲物体は質量0.4 [kg]、直径85 [mm]の球体とし、ロボットの初期相対関節角度は $\phi_0 = -\pi/2[\text{rad}]$ 、 $\phi_1 = \pi/3[\text{rad}]$ 、 $\phi_2 = -7\pi/18[\text{rad}]$ とした。制御系は、サンプリング周期を $T = 1/60$ [s]、位置と速度のフィードバックゲインを

$$\mathbf{A} = \text{diag}\{0.01, 0.01, 0.03, 0.02, 0.02\}$$

$$\mathbf{\Gamma} = \text{diag}\{0.02, 0.02, 0.06, 0.005, 0.005\}$$

に設定した。また、外乱補償で用いたローパスフィルタの時定数はベースに対しては $T_f = 1[\text{s}]$ 、マニピュレータに対しては $T_f = 0.2[\text{s}]$ とした。

次に、物体捕獲実験の手順を示す。

Action 1：(接近動作) ベースの初期状態を保持しつつ、手先を初期位置から物体まで直線移動 (Fig. 4.6(a))

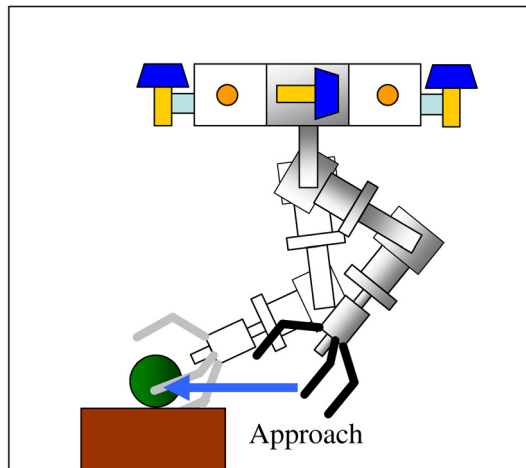
Action 2：(捕獲動作) ハンドを閉じる命令を与え、物体を捕獲 (Fig. 4.6(b))

Action 3：(持ち上げ動作) 手先移動命令を与え、ベースの初期状態を保持しつつ、手先を捕獲位置から x 方向に0.05[m]、 y 方向に0.15[m]離れた位置まで直線移動 (Fig. 4.6(c))

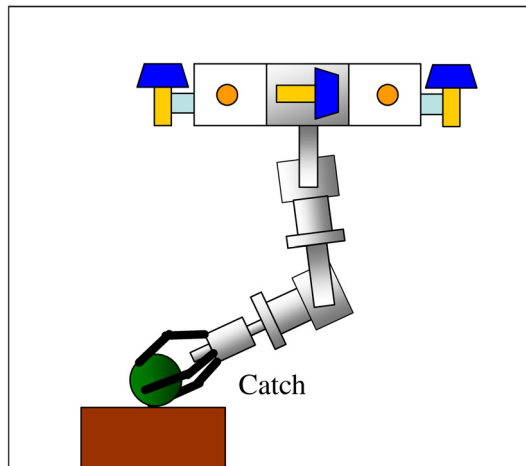
外乱補償なしの場合とありの場合の実験結果を、それぞれFig. 4.7と4.8に示す。

まず、ベースの位置・姿勢誤差について両者の結果を比較する。外乱補償ありの場合は、第3章のベース外乱補償の場合と同様に、外乱補償なしの場合よりも誤差が小さく抑えられていることがわかる。

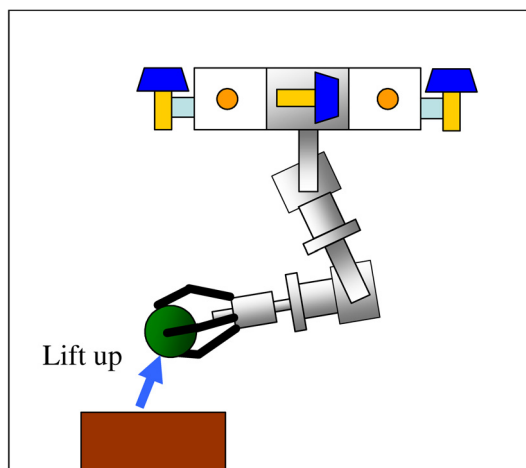
つぎに、ハンドの位置誤差について両者の結果を比較する。制御開始から物体捕獲までは、両者とも同程度の制御性能を有しているが、物体捕獲後は、外乱補償なしの場合は物体の持ち上げができていない。マニピュレータの関節サーボ機構がトルク型であるので、ハンドが未知質量の物体を把持した場合、マニピュレータの物理パラメータのみを用いて求めた関節制御入力トルクは、実際に要求されるトルクとは明らかに異なる。一方、外乱補償ありの場合は、関節が把持物体から受けるトルクを推定するので、物体捕獲直後は持ち上げ方向(y 方向)の誤差が大きくなっているが、その後はその誤差も小さくなり、制御目的を達成できていることがわかる。



(a) Action 1

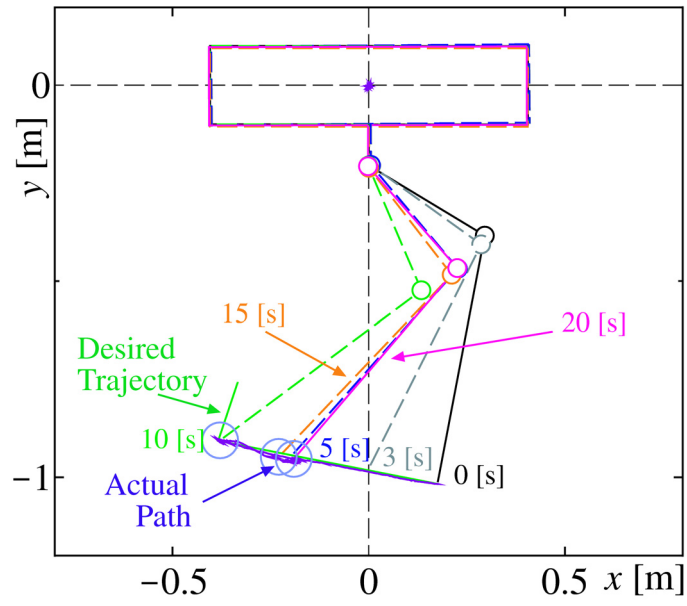


(b) Action 2

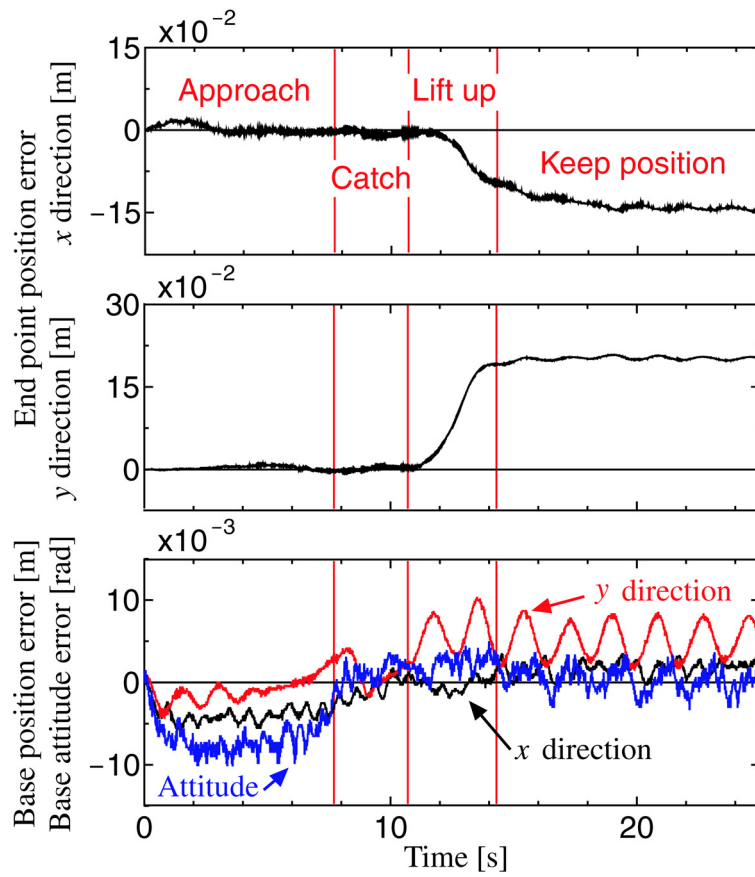


(c) Action 3

Fig. 4.6: Catching procedure

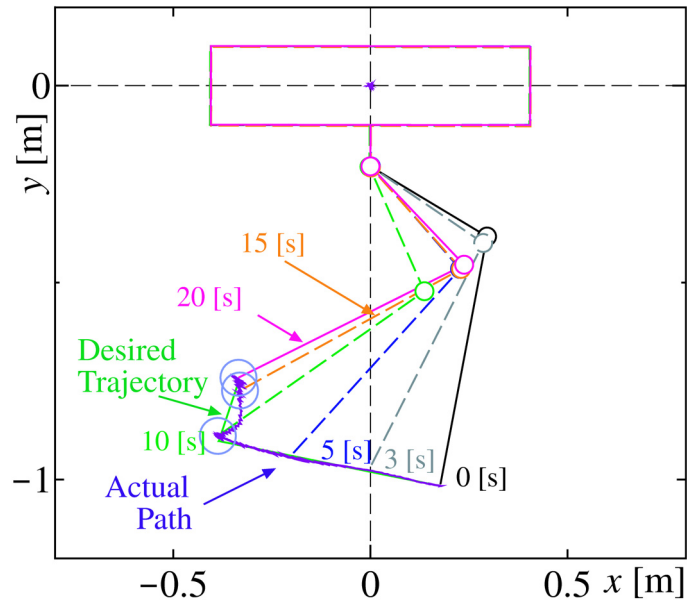


(a) Motion

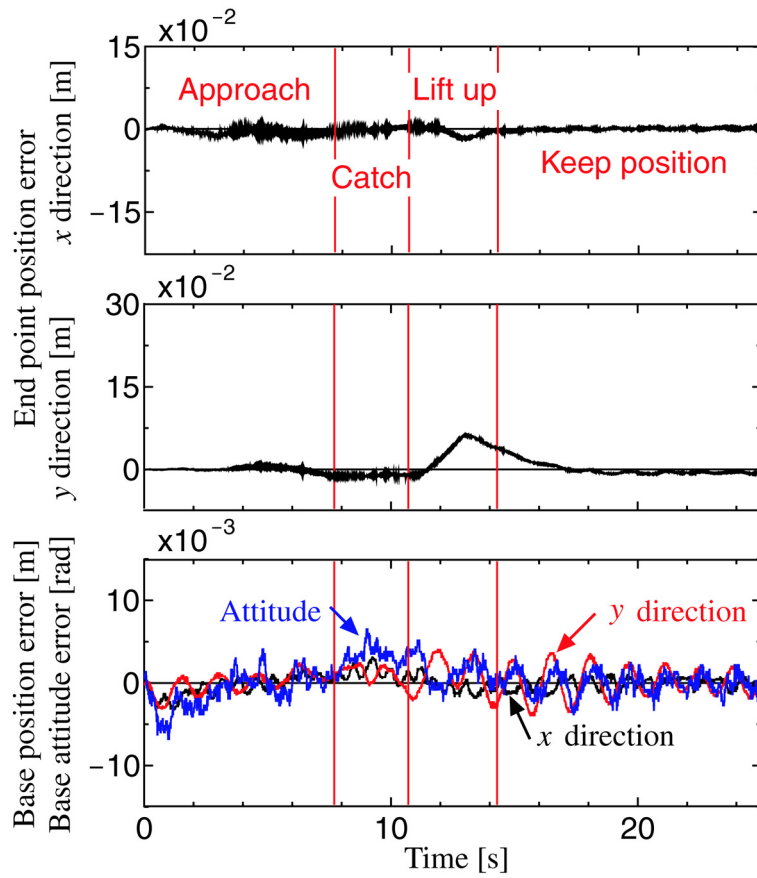


(b) Time history

Fig. 4.7: Experimental result without disturbance compensation



(a) Motion



(b) Time history

Fig. 4.8: Experimental result with disturbance compensation

4.4 まとめ

本章では，マニピュレータ関節がトルク型サーボ機構で駆動される UVMS の物体操作に対して，流体力も含めた UVMS 全体に作用する外力のモデル化誤差を外乱として取り扱う，外乱補償分解加速度制御法を提案するとともに，ハンドを装備した2リンク水中ロボットによる物体捕獲実験により，提案制御法の有用性を検証した．実験結果より，外乱補償がない場合は物体質量等の影響により捕獲後のマニピュレータ制御が不能となるが，外乱補償がある場合は良好な制御性能を有することを確認した．

第5章 結論

本研究では、著者らが提案している UVMS に対する分解加速度制御法の有用性の検証ならびに、さらに良好な制御性能を得るための外乱補償を付加した分解加速度制御法を提案するとともに、実験により提案制御法の有用性の検証を行った。以下では、本論文で得られた成果を要約して結論とする。

第2章では、これまで UVMS の基本制御法として提案されているが、実験による有用性が示されていなかった計算トルク法の問題点を、推進機構であるスラスタをロボットベースに実装して鉛直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を用いた実験により明らかにした。まず、計算トルク法と分解加速度制御法は、シミュレーションにおいてはいずれも同程度の良好な制御性能を有することを示した。つぎに、2つの制御法を適用した実験により、計算トルク法ではマニピュレータ手先の制御性能はロボットベースの制御性能に依存するため、ベースの変動に対してロバストでないが、分解加速度制御法はベース変動の影響を十分抑制し、良好な手先制御性能を有することを確認した。

第3章では、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、外乱補償を付加した離散時間分解加速度制御法を提案した。まず、離散時間分解加速度制御法の構成を示すとともに、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、離散時間外乱オブザーバを提案した。つぎに、第2章で用いた水中ロボットのマニピュレータ関節がトルク型サーボ機構で駆動される場合と速度型サーボ機構で駆動される場合の実験をそれぞれ行い、ベース外乱補償を付加した離散時間分解加速度制御法の有用性を確認した。

第4章では、トルク型関節サーボ機構を有する UVMS が物体を操作する場合のマニピュレータに作用する外力を考慮し、流体力も含めた UVMS 全体に作用する外力のモデル化誤差を外乱として取り扱う、外乱補償を付加した離散時間分解加速度制御法を提案した。まず、UVMS 全体に対する外力のモデル化誤差を外乱として取り扱う、離散時間外乱オブザーバを提案した。つぎに、マニピュレータ関節がトルク型サーボ機構で駆動される、物体捕獲用ハンドを装備した2リンク水中ロボットの物体捕獲実験を、外乱補償なしの場合と外乱補償ありの場合の両方行い、UVMS 全

体に対する外乱補償を付加した離散時間分解加速度制御法の有用性を確認した。

以上より，UVMS に対して著者らが提案している分解加速度制御法の有用性と，さらに良好な制御性能を得るために本論文で提案した，外乱補償を付加した分解加速度制御法の有用性を，いずれも実験的に確認した。

謝辞

本論文をまとめる機会を与えてくださり，常に懇切なご指導とご鞭撻を賜った九州工業大学田川善彦教授に深甚な万謝をささげる次第であります。

本論文をまとめるにあたり，有益なご助言，熱心なご討論をいただいた九州工業大学近藤浩教授，米本浩一教授に甚大なる謝意を表します。

本研究の遂行にあたり，適切にご指導をいただきました九州工業大学相良慎一准教授に心よりの感謝をいたします。また，輪講等においてご討論いただいた相良研究室の先輩方，同輩後輩に心よりお礼申し上げます。

最後に，大学生活を支えてくれた両親に心から感謝の念を表して，謝辞とさせていただきます。

平成 21 年 12 月

矢藤 孝

参考文献

- [1] 浦環, 高川真一 (編著) : 海中ロボット総覧, 成山堂書店, 1994.
- [2] 浦環, 高川真一 (編著) : 海中ロボット, 成山堂書店, 1997.
- [3] 浦環 : “海中に求められるロボット”, 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 6, pp. 692–696, 2004.
- [4] 田中敏成 : “港湾分野における水中作業の無人化に向けた技術開発”, 計測と制御, Vol. 47, No. 10, pp. 847–842, 2008.
- [5] 浦環 : “自律型海中ロボット”, 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 7, pp. 933–936, 2000.
- [6] 巻俊宏, 近藤逸人, 浦環 : “自律型水中ロボット (AUV) による水中ロボットマッピング”, 計測と制御, Vol. 47, No. 10, pp. 810–816, 2008.
- [7] 山本欣市, 柿倉正義 (編著), “極限作業ロボット”, 工業調査会, 1992.
- [8] T. I. Fossen: *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley & Sons, 1995.
- [9] G. Antonelli : *Underwater Robots*, Springer, 2003.
- [10] 五百井清, 伊藤憲治 : “水中マニピュレータのモデリングとシミュレーション”, 日本ロボット学会誌, Vol. 6, No. 2, pp. 160–168, 1988.
- [11] 五百井清, 石見勝弘, 伊藤憲治 : “水中マニピュレータの動揺補償型位置・力ハイブリッド制御”, 日本ロボット学会誌, Vol. 7, No. 4, pp. 295–306, 1989.
- [12] 福田敏男, 原文雄 : “水中ロボットマニピュレータの運動制御”, 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 54, No. 507, pp. 2702–2706, 1988.
- [13] 小菅和弘, 福田敏男 : “水上に浮遊するマニピュレータ/ビークルの軌道制御”, 第30回計測自動制御学会学術講演会予稿集, pp. 809–810, 1991.

- [14] 田口 幹, 川島 豪, 田村 正和 ; “浮遊型水中用マニピュレータの運動制御”, 第 30 回計測自動制御学会学術講演会予稿集, pp. 811–812, 1991.
- [15] 川島 豪 : “浮遊式水中アームの位置決め制御”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 58, No. 552, pp. 2586–2592, 1992.
- [16] 足達 康行, 吉田 和夫 : “外乱補償制御法を用いた水中浮遊ロボットの運動制御”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 60, No. 578, pp. 3446–3451, 1994.
- [17] M. Tamura, S. Sagara and R. Katoh: “Control of Manipulator Mounted on Floating Underwater Robot while Maintaining Vehicle Attitude”, *Proceedings of the 6th International Symposium on Artificial Life and Robotics*, pp. 121–125, 2001.
- [18] S. Sagara, T. Tanikawa, M. Tamura and R. Katoh: “Experiments of a Floating Underwater Robot with 2 Link Manipulator”, *Journal of Artificial Life and Robotics*, Vol. 5, No. 4, pp. 215–219, 2001.
- [19] S. Yamada and S. Sagara: “Resolved Acceleration Control of an Underwater Robot with Vertical Planar 2-Link Manipulator”, *Proceedings of the 7th International Symposium on Artificial Life and Robotics*, pp. 230–233, 2002.
- [20] S. Sagara: “Digital Control of an Underwater Robot with Vertical Planar 2-Link Manipulator”, *Proceedings of the 8th International Symposium on Artificial Life and Robotics*, pp. 524–527, 2003.
- [21] S. Sagara, K. Shibuya and M. Tamura: “Experiment of a Digital RAC for an Underwater Robot with Vertical Planar 2-Link Manipulator”, *Proceedings of the 9th International Symposium on Artificial Life and Robotics*, pp. 337–340, 2004.
- [22] S. Sagara, K. Shibuya and M. Tamura: “Digital Resolved Acceleration Control of Underwater Vehicle-Manipulator Systems”, *Proceedings of the International Symposium on Bio-inspired Systems*, Part V: Robotics and Motion Control, pp. 21–26, 2004.
- [23] 池田 徹, 相良 慎一, 矢藤 孝, 田村 正和 : “浮遊型 2 リンク水中ロボットの分解加速度制御”, 第 23 回計測自動制御学会九州支部学術講演会予稿集, pp. 23–26, 2004.

- [24] 相良 慎一, 矢藤 孝, 渋谷 健三, 田村 正和 “UVMS の連続・離散時間分解加速度制御”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’05 講演論文集, 2P1-S-011 (4 ページ), 2005.
- [25] S. Sagara, M. Tamura, T. Yatoh and K. Shibuya: “Digital RAC for Underwater Vehicle-Manipulator Systems Considering Singular Configuration”, *Journal of Artificial Life and Robotics*, Vol. 10, No. 2, pp. 106–111, 2006.
- [26] 相良 慎一, 矢藤 孝, 田村 正和 : “運動方程式を用いた UVMS の離散時間分解加速度制御”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’06 講演論文集, 1P1-E33 (4 ページ), 2006.
- [27] 田村 正和, 相良 慎一, 矢藤 孝, 田川 善彦: “2 リンクマニピュレータを搭載した水中ロボットの外乱補償制御”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 73, No. 726, pp. 520–527, 2007.
- [28] 吉川 恒夫 : ロボット制御基礎論, コロナ社, 1988.
- [29] 足達 康行, 吉田 和夫 : “水中浮遊ロボットの作業領域と動的可操作性”, 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 6, pp. 863–871, 1994.
- [30] J. Yuh (ed.): *Underwater Robotic Vehicles: Design and Control*, TSI Press, 1995.
- [31] H. Maheshi, J. Yuh and R. Lakshmi: “A Coordinated Control of an Underwater Vehicle and Robotic Manipulator”, *Journal of Robotic Systems*, Vol. 8, No. 3, pp. 339–370, 1991.
- [32] B. Lévesque B and M. J. Richard: “Dynamic Analysis of a Manipulator in a Fluid Environment”, *International Journal of Robotics Research*, Vol. 13, No. 3, pp. 221–231, 1994.
- [33] T. W. McLain, S. M. Rock and M. J. Lee: “Experiments in the Coordinated Control of an Underwater Arm/Vehicle System”, In J. Yuh, T. Ura and G. A. Bekey (Eds.): *Underwater Robots*, pp. 269–283, Kluwer Academic Publishers, 1996.

- [34] T. W. McLain and S. M. Rock: “Development and Experimental Validation of an Underwater Manipulator Hydrodynamic Model”, *International Journal of Robotics Research*, Vol. 17, No. 7, pp. 748–759, 1998.
- [35] S. McMillan, D. E. David and R. B. McGhee: “Efficient Dynamic Simulation of an Underwater Vehicle with a Robotic Manipulator”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 25, No. 8, pp. 1194–1206, 1995.
- [36] T. J. Tarn, G. A. Shoults and S. P. Yang: “A Dynamic Model of an Underwater Vehicle with a Robotic Manipulator”, In J. Yuh, T. Ura and G. A. Bekey (Eds.): *Underwater Robots*, pp. 269–283, Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [37] T. R. Kane, P. W. Likens and D. A. Levinson: “Spacecraft Dynamics”, McGraw-Hill Inc., 1983.
- [38] Y. Cui, T. K. Podder and N. Sarkar: “Impedance Control of Underwater Vehicle-Manipulator Systems (UVMS)”, *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 148–153, 1999.
- [39] G. Antonelli, F. Caccavale and S. Chiaverini: “A Modular Scheme for Adaptive Control of Underwater Vehicle-Manipulator Systems”, *Proceedings of American Control Conference*, pp. 3008–3012, 1999.
- [40] N. Sarkar, J. Yuh and T. K. Podder: “Adaptive Control of Underwater Vehicle-Manipulator Systems Subject to Joint Limits”, *Proceedings of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 142–147, 1999.
- [41] Y. Cui and J. Yuh: “A Unified Adaptive Force Control of Underwater Vehicle-Manipulator Systems (UVMS)”, *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 553–558, 2003.
- [42] G. Antonelli, F. Caccavale, S. Chiaverini and L. Villani: “Tracking Control for Underwater Vehicle-Manipulator Systems with Velocity Estimation”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 25, No. 3, pp. 399–413, 2000.
- [43] N. Sarkar and T. K. Podder: “Coordinated Motion Planning and Control of Autonomous Underwater Vehicle-Manipulator Systems Subject to Drag Opti-

- mization”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 26, No. 2, pp. 228–239, 2001.
- [44] J. H. Ryu, D. S. Kwon and P. M. Lee: “Control of Underwater Manipulators Mounted on an ROV Using Base Force Information”, *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3238–3243, 2001.
- [45] Z. Vafa and S. Dubowsky: “On the Dynamics of Manipulators in Space Using the Virtual Manipulator Approach”, *Proceeding IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 579–585, 1987.
- [46] 梅谷 陽二, 吉田 和哉: “一般化ヤコビ行列を用いた宇宙用ロボットマニピュレータの分解速度制御”, *日本ロボット学会誌*, Vol. 7, No. 4, pp. 327–337, 1989.
- [47] K. Yoshida and Y. Umetani: “Control of Space Manipulators with Generalized Jacobian Matrix”, In: Y. Xu and T. Kanade (eds): *Space Robotics: Dynamics and Control*, Kluwer Academic Publishers, pp. 165–204, 1993.
- [48] 吉田 和哉: 宇宙用ロボット・マニピュレータの運動制御, 東京工業大学学位論文, 1990.
- [49] R. Mukherjee and Y. Nakamura: “Formulation and Efficient Computation of Inverse Dynamics of Space Robots”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 8, No. 3, pp. 400–406, 1992.
- [50] 吉田 和哉, D. N. ネンチェフ: “移動ベースロボット/アンダーアクチュエータードシステムの一般化”, *日本機械学会第2回ロボティクスシンポジウム講演予稿集*, pp. 265–268, 1997.
- [51] 足達 康行, 吉田 和夫: “重力と浮力を考慮した水中浮遊ロボットの運動制御”, *日本機械学会論文集 (C編)*, Vol. 61, No. 583, pp. 1050–1057, 1995.
- [52] 足達 康行, 吉田 和夫: “非保存浮遊ロボットマニピュレータの動的な一般化ヤコビ行列”, *計測自動制御学会論文集*, Vol. 32, No. 2, pp. 207–214, 1996.
- [53] T. Yatoh and S. Sagara: “Resolved Acceleration Control of Underwater Vehicle-Manipulator Systems Using Momentum Equation”, *Proceedings of MTS/IEEE OCEANS 2007*, Paper No. 070427-004 (6 pages), 2007.

- [54] T. Yatoh, S. Sagara and M. Tamura: “Digital Type Disturbance Compensation Control of a Floating Underwater Robot with 2 Link Manipulator”, *Journal of Artificial Life and Robotics*, Vol. 13, No. 1, pp. 377–381, 2008.
- [55] T. Yatoh and S. Sagara: “Digital Type Disturbance Compensation Control of Underwater Vehicle-Manipulator systems”, *Proceedings of OCEANS’08 MTS/IEEE KOBE-TECHNO-OCEAN*, Paper No. 071109-002 (6 pages), 2008.
- [56] S. Sagara, T. Yatoh and T. Shimosawa: “Digital RAC with Disturbance Observer for Underwater Vehicle-Manipulator Systems”, *Proceedings of 15th International Symposium on Artificial Life and Robotics* (To be appeared), 5 pages, 2010.
- [57] 元良 誠三 (監修) : 船体と海洋構造物の運動学, 成山堂書店, 1982.
- [58] J. N. Newman: *Marine Hydrodynamics*, The MIT Press, 1977.
- [59] 文献 [8], pp. 431–452.
- [60] 文献 [9], pp. 17–20.
- [61] 文献 [8], pp. 94–97.
- [62] 荒井 裕彦, 谷江 和雄, 舘 暲 : “宇宙ロボットの外乱補償制御”, 日本ロボット学会誌, Vol. 10, No. 4, pp. 481–489, 1992.
- [63] I. Godler, H. Honda and K. Ohnishi: “Design Guidelines for Disturbance Observer’s Filter in Discrete Time”, *7th International Workshop on Advanced Motion Control*, pp. 390–395, 2002.