

マニピュレータを搭載した水中ロボットの
分解加速度制御に関する実験的研究

平成19年1月

九州工業大学大学院 工学研究科

田村 正和

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	従来の水中用ロボットマニピュレータの制御法	3
1.2	本研究の概要	5
第 2 章	水平駆動 2 リンク水中ロボットの分解加速度制御	8
2.1	モデリング	8
2.1.1	運動学関係式および運動量方程式	10
2.1.2	流体抗力および運動方程式	14
2.2	分解加速度制御	16
2.3	実 験	19
2.3.1	実験システムの構成	19
2.3.2	モデルの検証	21
2.3.3	制御実験	23
2.4	まとめ	23
第 3 章	UVMS の連続時間分解加速度制御	25
3.1	モデリング	25
3.1.1	運動学関係式および運動量関係式	27
3.1.2	流体抗力および浮力	27
3.1.3	運動方程式	30
3.2	制御系の構成	31
3.2.1	分解加速度制御	31
3.2.2	ベース外乱補償	32
3.3	実 験	35
3.3.1	実験システムの構成	35

3.3.2	制御実験	37
3.4	まとめ	42
第 4 章	UVMS の離散時間分解加速度制御	45
4.1	モデリング	45
4.2	制御系の構成	49
4.2.1	離散時間分解加速度制御	49
4.2.2	マニピュレータ特異姿勢回避	50
4.3	実 験	51
4.4	まとめ	56
第 5 章	結 論	57
	謝 辞	59
	参考文献	60

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

広大な海洋空間は地球上に残された最後のフロンティアと呼ばれて久しい。しかし、「近くて遠い世界」と言われているように、海は人類には簡単にその門口を開けてはくれない。しかしながらそのような状況ではあっても生産素材やエネルギーとしての鉱物資源の確保、防災を絡めた学問的見地からの海洋地質調査など、海洋開発は人間の生活にとって非常に重要な位置を占めると考えられる。さて、以上のような理由から従来より海洋開発が積極的に進められてきているが、その作業環境は宇宙空間と同様に人間にとって非常に厳しい環境下にある。すなわち、水中は高水圧、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う極限環境であり、人間にとっては活動が著しく困難な環境である。これに対して人類は、神から授けられた英知と創造力をもって対処していく必要がある。例えば、作業深度が深い場合には作業を行うダイバーの安全のために水中における作業時間は非常に短くなり作業効率は極端に低下する。このため、人間に代わってそのような極限環境下で所定の作業を行い続けられる水中作業用ロボットの要望は高く、特に近年水中ロボットに関する研究が盛んに行われている。水中ロボットのニーズは産業的見地における海洋開発のみならず、珊瑚を食い荒らすオニヒトデの駆除などの環境保全を目的としたものや原子炉等の水槽の保守点検等の保全目的のものなども挙げられる。

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

水中ロボットのニーズの場はおもに海洋であり、これまでに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大きく分けて、有人潜水艇と無人潜水艇に大別できる [1,2]。一般に、有人潜水艇は大型のものが多く、「しんかい 6500」等がある。一方、無人潜水艇は比較的小型で、AUV (Autonomous Underwater Vehicle) や ROV (Remotely Operated Vehicle) 等の自律型あるいは遠隔操縦型のものが多い。特に、必要最小限の機能を搭載し人間が簡単に持ち運べる小型の LCROV (Low Cost Remotely Operated Vehicle) は、その利便性から海洋調査や海洋構造物検査等に広く用いられている。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盛んに行われている。

また、構造的な側面から海中ロボットを分類するとテザーケーブルによりロボットがオペレータと直接接続されているかどうかにより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、テレエイグジステンスの技術など共に発達し、特に、オイルショックによる原油価格の高騰の影響で、1970 年代から 1980 年の初めにかけて海底石油開発に大規模投資が行われ、重作業用の有索機 (HD-ROV: Heavy Duty Remotely Operated Vehicle) の開発が米国や英国で盛んに行われた。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、海中のモニタリングを目的にした単機能のカメラロボが開発され、ROV のバラエティが増えた。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が開発されるようになってきている。港湾建設や浚渫工事などの特殊用途の遠隔操縦機も作られ利用されているが、適用例は少ない。これに対して無索機 (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を有するが、電池技術とマイクロプロセッサ技術の発展に伴い 1990 年代に実用化への途をたどっている。音響通信を通じて必要最小限のデータを海上の支援船間でやり取りして、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 の開発が待たれている。現在は、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面から分類すると、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、一定の場所に留まり作業を行うものとに分けられる。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の作業代替者としての役割が要求され、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。操縦が困難でかつ複雑な作業をロボット自身が自律的に行うことができれば、オペレータの負担軽減につながるものの、現状の技術レベル・開発体制では完全な自律化は道半ばと言わざるを得ない。

国内では、当時の通商産業省（現・経済産業省）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」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 [4]。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的な側面からは未完成のままとなっている。

1.1.3 従来の水中用ロボットマニピュレータの制御法

マニピュレータを搭載した小型水中ロボットの運動制御上の問題点は、流体中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状態からの影響を受けたり、マニピュレータ自身の動作反力、また重力・浮力のバランスに伴いロボット本体が変動することにある。特に、作業性能を向上させるためにロボット本体に対してマニピュレータを大きくすると、マニピュレータから本体へ及ぼす影響も顕著に大きくなる。したがって、以上の問題を考慮した制御系を構成する必要がある [5,6]。

これまで、浮遊ロボット・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ている。国内ではこれらに先駆けた研究として、五百井ら [7,8] 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挙げられる。また、福田ら [9] の非線形流体力の適応補償制御をはじめとして、小菅ら [10] による水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 [11] による冗長自由度を利用した水中浮遊マニピュレータ

の研究や川島ら [12] による平面 1 リンクアームによる位置決制御などの、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。

また、マニピュレータの性能を評価する基準として、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 [13] が地上固定マニピュレータに対して提案されている。足達ら [14] は重力・浮力の作用しない浮遊型水中マニピュレータに対する作業領域や動的可操作性等について操作能力の評価に関する報告をしている。さらに、モデル化の困難な流体力等を外乱として補償する制御法に関する報告 [15] も行っている。

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 [16]。さらに、1990 年代初頭の Maheshi ら [17] 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 [18] 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 [19,20] 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 [21] 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 [22] 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 [23] 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定する。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 [24]、適応制御法 [25-27] 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 [28], マニピュレータが受ける流体力を最適化する方法 [29], ベースに作用する力に基づいた方法 [30] など提案されている.

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 [19,20] 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 [31] 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 [32,33] 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 [34,35] 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 [36]. そこで, 足達ら [37,38] 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

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 の制御手法開発を本研究の目的とする. 本論文で提案する制御法は, 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関節の加速度制御入力を直接決定する, 分解加速度制御法である. 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おり, これまで水中ロボットへの適用例はない. 本論文では, 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た, UVMS に対する分解加速度制御法を提案する. さらに, 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, 提案制御法の有用性を示す.

本論文の構成を Fig. 1.1 に示すとともに, その概要を以下に述べる.

第 2 章では, UVMS に対する分解加速度制御法の有用性確認の第一歩として, ロ

ロボットベースに推進機構が実装されておらず、かつ、重力・浮力の影響を受けない、水平2次元面内で運動する2リンクマニピュレータを搭載した水中ロボットの制御法を開発する。まず、分解加速度制御法開発に必要なとなるロボットベースとマニピュレータ手先の速度関係およびロボットベースに関する運動量を定式化するとともに、ロボットの運動方程式を導出する。つぎに、マニピュレータ手先位置のみを制御する分解加速度制御法を提案する。さらに、導出した運動方程式の妥当性をシミュレーションと開ループ実験との比較により示すとともに、制御実験により提案制御法の有用性を示す [39]。

第3章では、第2章で得られた結果に基づき、推進機構であるスラスタをロボットベースに実装し、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の制御法を開発する。まず、ロボットに作用する流体抗力の3次元モデルおよびロボットの数学モデルを導出する。つぎに、ロボットベースとマニピュレータ手先を同時に制御可能な分解加速度制御法を提案するとともに、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、外乱補償制御法を提案する。また、スラスタのモデルを実験により求めるとともに、分解加速度制御法および外乱補償制御法の実験を行い、提案制御法の有用性を示す [40,41]。

第4章では、一般にディジタルコンピュータがコントローラとして使用されることを考慮し、離散時間分解加速度制御法を提案する。まず、3次元空間で運動する水中ロボットの数学モデルを導出するとともに離散時間系の分解加速度制御法を提案する。つぎに、第3章で提案した外乱補償制御法は離散時間制御系にも簡単に適用可能であるため、ここでは、マニピュレータの特異姿勢を回避する一方法を提案する。さらに、第3章で用いた水中ロボットを用いた離散時間分解加速度制御法および特異姿勢回避法の適用実験を行い、離散時間制御法が第3章の連続時間制御法と同等の制御性能を有するとともに、特異姿勢回避法が有用であることを示す [42,43]。

最後に第5章では、本研究によって得られた結果をまとめる。

本論文の構成

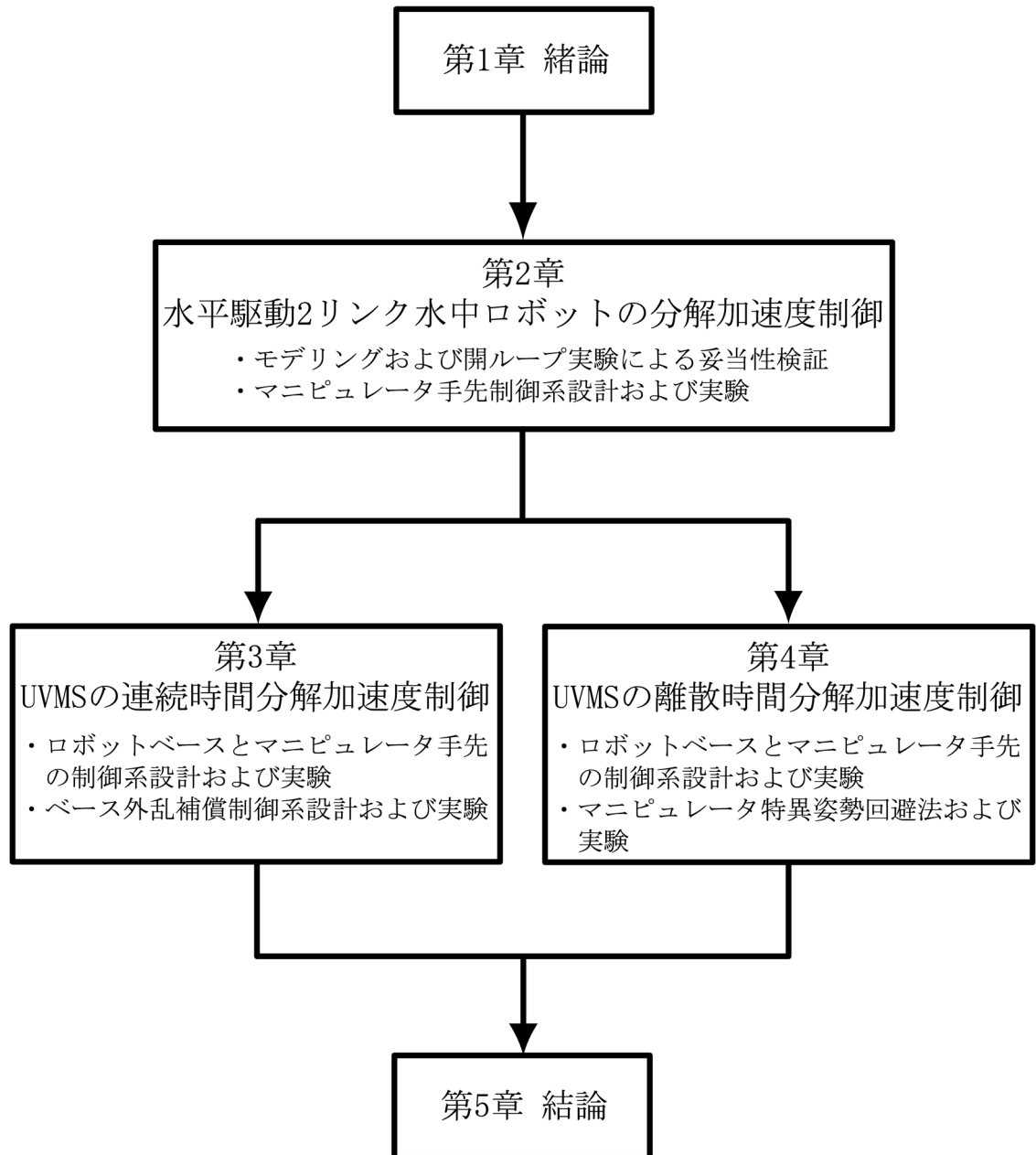


Fig. 1.1: Organization of this paper

第2章 水平駆動2リンク水中ロボットの分解加速度制御

ここでは、マニピュレータを搭載した水中ロボットの制御法開発の第一歩として、水平面内で運動する、2リンクマニピュレータを搭載した水中ロボットを対象とし、その数学モデルの導出および分解加速度制御法を提案する。また、水中ロボットの数学モデルおよび制御法の有用性を検証するために、流体力の影響を大きく受ける水中ロボット実験装置を用いたモデルの検証実験および制御実験により、導出した数学モデルおよび提案制御法の有用性を示す。

2.1 モデリング

まず、本章で対象とする、リンク形状が直方体の回転関節型2リンクマニピュレータと推進機構を有しない円柱形ロボット本体(ベース)からなり、水平面上でのみ運動する水中ロボットのモデルを Fig. 2.1 に示す。また、ベースをリンク 0 とし、マニピュレータの各リンクはベース側から順に 1, 2 と番号をつける。

つぎに、本章で用いる仮定とおもな記号を以下に示す。

【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. 各リンクの質量中心と付加質量中心は一致する。
- A4. 周囲の流体は静止しているものとする。

【記号】

Σ_I : 地上などに固定した基準座標系

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

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

iR_j : Σ_j から Σ_i への座標変換行列 ($\in \mathbf{R}^{3 \times 3}$)

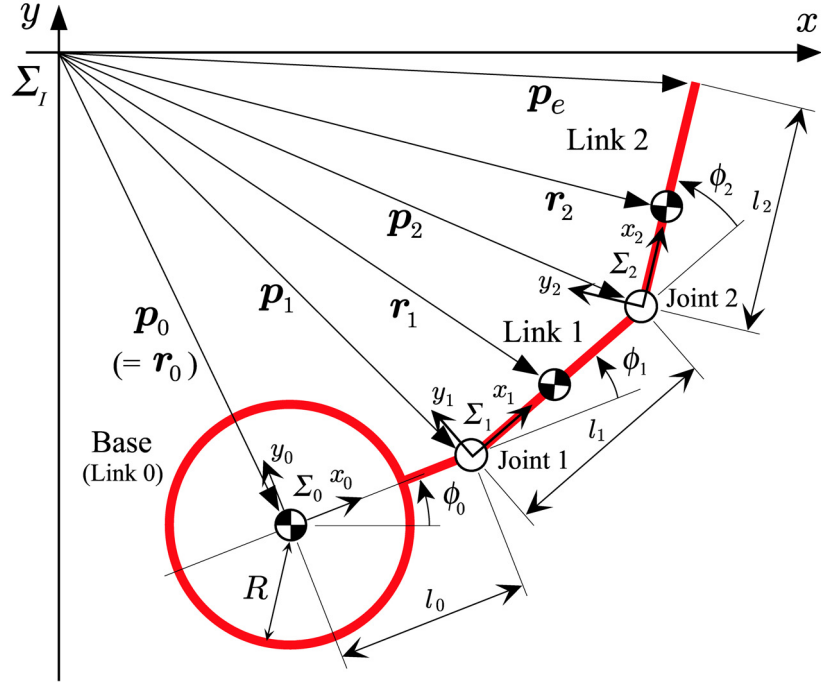


Fig. 2.1: 2-link underwater robot manipulator model

- \mathbf{r}_0 : Σ_I に関する Σ_0 原点の位置ベクトル ($\in \mathbf{R}^{3 \times 1}$)
- \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 ($\in \mathbf{R}^{3 \times 1}$)
- \mathbf{p}_i : Σ_I に関する関節 i ($i = 1, 2$) の位置ベクトル ($\in \mathbf{R}^{3 \times 1}$)
- \mathbf{p}_e : Σ_I に関するマニピュレータ手先位置ベクトル ($\in \mathbf{R}^{3 \times 1}$)
- ${}^i \mathbf{k}_i$: Σ_i に関する関節回転軸方向を示す単位ベクトル ($= [0, 0, 1]^T$)
- ϕ_i : 相対関節角度
- ϕ : マニピュレータ関節角度ベクトル ($= [\phi_1, \phi_2]^T$)
- $\boldsymbol{\omega}_i$: 関節 i の角速度ベクトル ($\in \mathbf{R}^{3 \times 1}$)
- $\boldsymbol{\omega}_e$: マニピュレータ手先の角速度ベクトル ($\in \mathbf{R}^{3 \times 1}$)
- $\boldsymbol{\nu}_0$: ベース速度変数ベクトル ($= [\dot{\mathbf{r}}_0^T, \boldsymbol{\omega}_0^T]^T$)
- $\boldsymbol{\nu}_e$: 手先速度変数ベクトル ($= [\dot{\mathbf{p}}_e^T, \boldsymbol{\omega}_e^T]^T$)
- l_i : リンク i の長さ
- a_i : 関節 i からリンク i の質量中心までの長さ
- ${}^i \mathbf{l}_i$: Σ_i に関する関節 $(i + 1)$ の位置ベクトル ($= [l_i, 0, 0]^T$)
- ${}^i \mathbf{a}_i$: Σ_i に関するリンク i の質量中心位置ベクトル ($= [a_i, 0, 0]^T$)

- m_i : リンク i の質量
- ${}^i\mathbf{M}_{a_i}$: Σ_i に関するリンク i の付加質量テンソル ($\in \mathbf{R}^{3 \times 3}$)
- ${}^i\mathbf{I}_i$: Σ_i に関するリンク i の慣性テンソル ($\in \mathbf{R}^{3 \times 3}$)
- ${}^i\mathbf{I}_{a_i}$: Σ_i に関するリンク i の付加慣性テンソル ($\in \mathbf{R}^{3 \times 3}$)
- \mathbf{E}_j : j 次の単位行列

なお、ベクトルおよびテンソルは、 ${}^i\mathbf{a}$ 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 $\mathbf{a} = [x, y, z]^T$ に対して、 $\tilde{\mathbf{a}}$ を

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

で定義する。なお、 $\{\sim\}$ は、2つのベクトル \mathbf{a} と \mathbf{b} の外積演算を $\mathbf{a} \times \mathbf{b} = \tilde{\mathbf{a}}\mathbf{b}$ 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 [20]。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 [44,45]。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おり、本論文でも形状に依存した一定値として取り扱う。なお、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 [14]。

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 [32–34] と同様に、運動学関係式および運動量方程式の導出に必要となる、ロボットを構成するベースおよびリンクの質量中心と各関節の速度を求める。

はじめに，関節 i 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

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

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

$$(i = 1, 2)$$

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

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

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

$$(i = 1, 2)$$

となり，リンク i の質量中心の並進速度は

$$\dot{\mathbf{r}}_i = \dot{\mathbf{p}}_i + \boldsymbol{\omega}_i \times ({}^I\mathbf{R}_i {}^i\mathbf{a}_i) \quad (i = 1, 2) \quad (2.6)$$

となる．また，手先速度は

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

となる．

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

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

$${}^I\mathbf{R}_i {}^i\mathbf{a}_i = \mathbf{r}_i - \mathbf{p}_i$$

であることに注意し，また，

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

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

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

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

となり，また，式 (2.7) の手先速度と角速度は，それぞれ

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

$$\boldsymbol{\omega}_e = \boldsymbol{\omega}_2 = \boldsymbol{\omega}_0 + \sum_{j=1}^2 \mathbf{k}_j \dot{\phi}_j \tag{2.11}$$

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

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

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 $\boldsymbol{\nu}_e = [\dot{\mathbf{p}}_e^T, \boldsymbol{\omega}_e^T]^T$ とベース速度変数ベクトル $\boldsymbol{\nu}_0 = [\dot{\mathbf{r}}_0^T, \boldsymbol{\omega}_0^T]^T$ 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．

$$\boldsymbol{\nu}_e = \mathbf{A}\boldsymbol{\nu}_0 + \mathbf{B}\dot{\boldsymbol{\phi}} \tag{2.13}$$

ただし，

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_3 & -(\tilde{\mathbf{p}}_e - \tilde{\mathbf{r}}_0) \\ \mathbf{0} & \mathbf{E}_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{k}}_1(\mathbf{p}_e - \mathbf{p}_1) & \tilde{\mathbf{k}}_2(\mathbf{p}_e - \mathbf{p}_2) \\ \mathbf{k}_1 & \mathbf{k}_2 \end{bmatrix} \tag{2.14}$$

である．

つぎに，流体中で生じる付加質量 \mathbf{M}_{a_i} と付加慣性モーメント \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

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{\eta} &= \sum_{i=0}^2 M_{T_i} \dot{\mathbf{r}}_i \\
&= M_{T_0} \dot{\mathbf{r}}_0 + M_{T_1} \left\{ \dot{\mathbf{r}}_0 - (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_0) \times \boldsymbol{\omega}_0 - (\mathbf{r}_1 - \mathbf{p}_1) \times \mathbf{k}_1 \dot{\phi}_1 \right\} \\
&\quad + M_{T_2} \left\{ \dot{\mathbf{r}}_0 - (\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_0) \times \boldsymbol{\omega}_0 - (\mathbf{r}_2 - \mathbf{p}_1) \times \mathbf{k}_1 \dot{\phi}_1 - (\mathbf{r}_2 - \mathbf{p}_2) \times \mathbf{k}_2 \dot{\phi}_2 \right\} \\
&= \sum_{i=0}^2 M_{T_i} \dot{\mathbf{r}}_0 - \sum_{i=1}^2 M_{T_i} (\tilde{\mathbf{r}}_i - \tilde{\mathbf{r}}_0) \boldsymbol{\omega}_0 + \sum_{i=1}^2 \left\{ \sum_{j=i}^2 M_{T_j} \tilde{\mathbf{k}}_i (\mathbf{r}_j - \mathbf{p}_i) \right\} \dot{\phi}_i \quad (2.15)
\end{aligned}$$

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、

$$\boldsymbol{\mu}_I = \sum_{i=0}^2 (\mathbf{I}_{T_i} \boldsymbol{\omega}_i + \mathbf{r}_i \times \mathbf{M}_{T_i} \dot{\mathbf{r}}_i) \quad (2.16)$$

となる。ただし、

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

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

$$\boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{\mu}_I - \mathbf{r}_0 \times \boldsymbol{\eta} \quad (2.17)$$

の関係があるので、式 (2.16) を式 (2.17) 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

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{\mu} &= \boldsymbol{\mu}_I - \mathbf{r}_0 \times \boldsymbol{\eta} \\
&= \sum_{i=0}^2 (\mathbf{I}_{T_i} \boldsymbol{\omega}_i + \mathbf{r}_i \times \mathbf{M}_{T_i} \dot{\mathbf{r}}_i) - \mathbf{r}_0 \times \sum_{i=0}^2 M_{T_i} \dot{\mathbf{r}}_i \\
&= \sum_{i=0}^2 \{ \mathbf{I}_{T_i} \boldsymbol{\omega}_i + (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0) \times \mathbf{M}_{T_i} \dot{\mathbf{r}}_i \} \\
&= \sum_{i=1}^2 (\tilde{\mathbf{r}}_i - \tilde{\mathbf{r}}_0) M_{T_i} \dot{\mathbf{r}}_0 + \sum_{i=0}^2 \{ \mathbf{I}_{T_i} - (\tilde{\mathbf{r}}_i - \tilde{\mathbf{r}}_0) M_{T_i} (\tilde{\mathbf{r}}_i - \tilde{\mathbf{r}}_0) \} \boldsymbol{\omega}_0 \\
&\quad + \sum_{i=1}^2 \left\{ \sum_{j=i}^2 \{ \mathbf{I}_{T_j} - (\tilde{\mathbf{r}}_j - \tilde{\mathbf{r}}_0) M_{T_j} (\tilde{\mathbf{r}}_j - \tilde{\mathbf{p}}_i) \} \right\} \mathbf{k}_i \dot{\phi}_i \quad (2.18)
\end{aligned}$$

となる.

したがって, 式 (2.15) と (2.18) より, 次の運動量方程式を得る.

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} \eta \\ \mu \end{bmatrix} = \mathbf{C}\boldsymbol{\nu}_0 + \mathbf{D}\dot{\phi} \quad (2.19)$$

ただし,

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

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

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

$$\mathbf{d}_{2i} = \sum_{j=i}^2 \{ \mathbf{I}_{T_j} \mathbf{k}_i + (\tilde{\mathbf{r}}_j - \tilde{\mathbf{r}}_0) \mathbf{M}_{T_j} \tilde{\mathbf{k}}_i (\mathbf{r}_j - \mathbf{p}_1) \}$$

である.

2.1.2 流体抗力および運動方程式

ここでは, 流体力を含んだ Fig. 2.1 のロボットに対する運動方程式を導出する.

まず, Fig. 2.2 に示すように, リンク i ($i = 1, 2$) に作用する流体抗力および抗力モーメントを, Σ_i 原点に関して表現すると, それぞれ次式となる [18].

$${}^i \mathbf{f}_{d_i} = \frac{\rho}{2} C_{D_i} \mathbf{T}_i \int_0^{l_i} \|\mathbf{w}_i\| \mathbf{w}_i dx_i \quad (2.20)$$

$${}^i \mathbf{n}_{d_i} = \frac{\rho}{2} C_{D_i} \int_0^{l_i} \mathbf{x}_i \times (\mathbf{T}_i \|\mathbf{w}_i\| \mathbf{w}_i) dx_i \quad (2.21)$$

ただし,

$$\mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & t_{y_i} & 0 \\ 0 & 0 & t_{z_i} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{w}_i = {}^i \mathbf{R}_I (\dot{\mathbf{r}}_i + \tilde{\boldsymbol{\omega}}_i \mathbf{x}_i)$$

$$\mathbf{x}_i = [x_i, 0, 0]^T$$

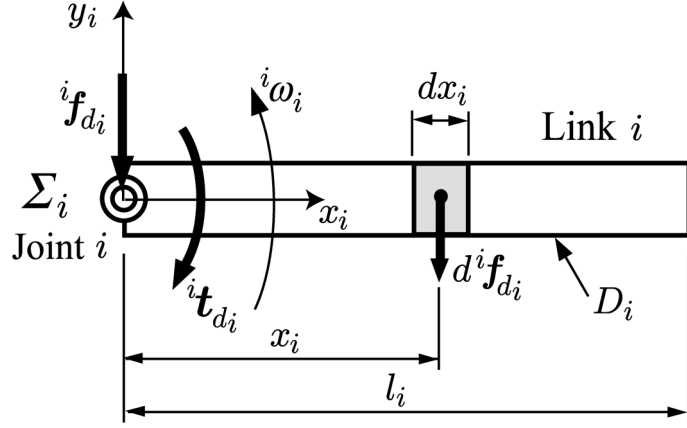


Fig. 2.2: Drag force and moment acting on link i

であり, ρ は流体密度, C_{D_i} は流体抗力係数である. また, t_{y_i} および t_{z_i} はリンクを Σ_i の y_i および z_i 軸に垂直な面に射影した物体の幅である. なお, リンクを x_i 軸に垂直な面に射影した物体の面積が y_i および z_i 軸の場合と比較して十分小さいと仮定し, \mathbf{T}_i の第 1 行第 1 列要素は 0 としている.

ここで, 本章で対象としている Fig. 2.1 のロボットの運動は, 水平面に限定されているので, 式 (2.20) と (2.21) は, それぞれ

$$^i \mathbf{f}_{d_i} = \frac{\rho}{2} C_{D_i} t_{y_i} \int_0^{l_i} \|\mathbf{w}_i\| \mathbf{w}_i dx_i \quad (2.22)$$

$$^i \mathbf{n}_{d_i} = \frac{\rho}{2} C_{D_i} t_{y_i} \int_0^{l_i} \mathbf{x}_i \times \|\mathbf{w}_i\| \mathbf{w}_i dx_i \quad (2.23)$$

となる. また, ベースは半径 R の円柱形であるので, ベースに作用する流体抗力および抗力モーメントは, それぞれ

$$^0 \mathbf{f}_{d_0} = \frac{\rho}{2} C_{D_0} t_{y_0} \int_{-R}^R \|\mathbf{w}_0\| \mathbf{w}_0 dx_0 \quad (2.24)$$

$$^0 \mathbf{n}_{d_0} = \frac{\rho}{2} C_{D_0} t_{y_0} \int_{-R}^R \mathbf{x}_0 \times \|\mathbf{w}_0\| \mathbf{w}_0 dx_0 \quad (2.25)$$

となる.

つぎに, 付加質量, 付加慣性モーメントおよび式 (2.22)~(2.25) の流体抗力, すなわち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・オイラー法を用いて求める [46].

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

$$\left. \begin{aligned} {}^i\boldsymbol{\omega}_i &= {}^i\mathbf{R}_{i-1} {}^{i-1}\boldsymbol{\omega}_{i-1} + {}^i\mathbf{k}_i\dot{\phi}_i \\ {}^i\dot{\boldsymbol{\omega}}_i &= {}^i\mathbf{R}_{i-1} {}^{i-1}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{i-1} + {}^i\mathbf{k}_i\ddot{\phi}_i + {}^i\boldsymbol{\omega}_i \times {}^i\mathbf{k}_i\dot{\phi}_i \\ {}^i\ddot{\mathbf{p}}_i &= {}^i\mathbf{R}_{i-1} \{ {}^{i-1}\ddot{\mathbf{p}}_{i-1} + {}^{i-1}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{i-1} \times {}^{i-1}\mathbf{l}_{i-1} + {}^{i-1}\boldsymbol{\omega}_{i-1} \times ({}^{i-1}\boldsymbol{\omega}_{i-1} {}^{i-1}\mathbf{l}_{i-1}) \} \\ {}^i\ddot{\mathbf{r}}_i &= {}^i\ddot{\mathbf{p}}_i + {}^i\dot{\boldsymbol{\omega}}_i \times {}^i\mathbf{r}_i + {}^i\boldsymbol{\omega}_i \times ({}^i\boldsymbol{\omega}_i \times {}^i\mathbf{r}_i) \end{aligned} \right\} \quad (2.26)$$

を $i = 1, 2$ で逐次計算し、つぎに、リンク i 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

$$\left. \begin{aligned} {}^i\hat{\mathbf{f}}_i &= (m_i\mathbf{E}_3 + {}^i\mathbf{M}_{a_i}) {}^i\ddot{\mathbf{r}}_i \\ {}^i\hat{\mathbf{n}}_i &= ({}^i\mathbf{I}_i + {}^i\mathbf{I}_{a_i}) {}^i\dot{\boldsymbol{\omega}}_i + {}^i\dot{\boldsymbol{\omega}}_i \times \{ ({}^i\mathbf{I}_i + {}^i\mathbf{I}_{a_i}) {}^i\boldsymbol{\omega}_i \} \\ {}^i\mathbf{f}_i &= {}^i\mathbf{R}_{i+1} {}^{i+1}\mathbf{f}_{i+1} + {}^i\hat{\mathbf{f}}_i + {}^i\mathbf{f}_{d_i} \\ {}^i\mathbf{n}_i &= {}^i\mathbf{R}_{i+1} {}^{i+1}\mathbf{n}_{i+1} + {}^i\hat{\mathbf{n}}_i + {}^i\mathbf{l}_i \times ({}^i\mathbf{R}_{i+1} {}^{i+1}\mathbf{f}_{i+1}) + {}^i\mathbf{r}_i \times {}^i\hat{\mathbf{f}}_i + {}^i\mathbf{n}_{d_i} \end{aligned} \right\} \quad (2.27)$$

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

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{f}_0 &= [f_{0x}, f_{0y}, f_{0z}]^T = {}^I\mathbf{R}_0 {}^0\mathbf{f}_0 \\ \mathbf{n}_0 &= [n_{0x}, n_{0y}, n_{0z}]^T = {}^I\mathbf{R}_0 {}^0\mathbf{n}_0 \end{aligned} \right\} \quad (2.28)$$

より Σ_I に関するベースの力とトルク, また,

$$\tau_i = ({}^i\mathbf{k}_i)^T {}^i\mathbf{n}_i \quad (i = 1, 2) \quad (2.29)$$

より, マニピュレータ関節トルクが得られる. なお, 式 (2.26)~(2.29) 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.

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

ただし, $\mathbf{q} = [\phi_0, \boldsymbol{\phi}^T]^T$, $\boldsymbol{\zeta} = [\nu_0^T, \dot{\boldsymbol{\phi}}^T]^T$ 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} は流体抗力項, また, $\mathbf{u} = [\mathbf{f}_0^T, \mathbf{n}_0^T, \tau_1, \tau_2]^T$ である.

2.2 分解加速度制御

まず, Fig. 2.1 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 (2.19) および運動方程式 (2.30) は，それぞれ

$$\dot{\mathbf{x}}_e = \mathbf{A}_s \dot{\mathbf{x}}_0 + \mathbf{B}_s \dot{\phi} \quad (2.31)$$

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

$$\mathbf{M}_s(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{N}_s(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{x}})\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{f}_s = \mathbf{u}_s \quad (2.33)$$

と低次元化できる．ただし， $\mathbf{x}_e = [p_{e_x}, p_{e_y}]^T$ ， $\mathbf{x}_0 = [r_{0_x}, r_{0_y}, \phi_0]^T$ ， $\mathbf{s}_s = [\eta_x, \eta_y, \mu_z]^T$ ， $\boldsymbol{\chi} = [\mathbf{x}_0^T, \boldsymbol{\phi}^T]^T$ $\mathbf{u}_s = [f_{0_x}, f_{0_y}, n_{0_z}, \tau_1, \tau_2]^T$ であり，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 に関して，運動方程式 (2.33) 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，ベース入力に関する運動方程式

$$\mathbf{M}_{BB}\ddot{\mathbf{x}}_0 + \mathbf{M}_{BM}\ddot{\phi} + \mathbf{N}_{BB}\dot{\mathbf{x}}_0 + \mathbf{N}_{BM}\dot{\phi} + \mathbf{f}_B = \mathbf{u}_B \quad (2.34)$$

を得る．

さて，式 (2.31) と (2.32) を時間微分すると，それぞれ

$$\ddot{\mathbf{x}}_e = \mathbf{A}_s \ddot{\mathbf{x}}_0 + \mathbf{B}_s \ddot{\phi} + \dot{\mathbf{A}}_s \dot{\mathbf{x}}_0 + \dot{\mathbf{B}}_s \dot{\phi} \quad (2.35)$$

$$\dot{\mathbf{s}}_s = \mathbf{C}_s \ddot{\mathbf{x}}_0 + \mathbf{D}_s \ddot{\phi} + \dot{\mathbf{C}}_s \dot{\mathbf{x}}_0 + \dot{\mathbf{D}}_s \dot{\phi} \quad (2.36)$$

となるので，式 (2.35) と (2.36) を整理すると

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C}_s & \mathbf{D}_s \\ \mathbf{A}_s & \mathbf{B}_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_0 \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \ddot{\mathbf{x}}_e \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{z}_1 \\ \mathbf{z}_2 \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

が得られる．ただし，

$$\mathbf{z}_1 = \dot{\mathbf{C}}_s \dot{\mathbf{x}}_0 + \dot{\mathbf{D}}_s \dot{\phi} - \dot{\mathbf{s}}_s \quad (2.38)$$

$$\mathbf{z}_2 = \dot{\mathbf{A}}_s \dot{\mathbf{x}}_0 + \dot{\mathbf{B}}_s \dot{\phi} \quad (2.39)$$

である.

そこで, 手先位置 \mathbf{x}_e の目標値 $\mathbf{x}_e^{\text{des}}$ を設定し, 手先位置と速度の誤差を付加した修正目標加速度 $\ddot{\mathbf{x}}_e^{\text{ref}}$ を用いて, 式 (2.37) に基づいた次式の分解加速度制御則により, 関節加速度 $\ddot{\boldsymbol{\phi}}$ の目標値 $\ddot{\boldsymbol{\phi}}^{\text{ref}}$ を決定する.

$$\begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_0^{\text{ref}} \\ \ddot{\boldsymbol{\phi}}^{\text{ref}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_s & \mathbf{D}_s \\ \mathbf{A}_s & \mathbf{B}_s \end{bmatrix}^{-1} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \ddot{\mathbf{x}}_e^{\text{ref}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{z}_1 \\ \mathbf{z}_2 \end{bmatrix} \right) \quad (2.40)$$

ただし,

$$\ddot{\mathbf{x}}_e^{\text{ref}} = \ddot{\mathbf{x}}_e^{\text{des}} + \mathbf{K}_v (\dot{\mathbf{x}}_e^{\text{des}} - \dot{\mathbf{x}}_e) + \mathbf{K}_p (\mathbf{x}_e^{\text{des}} - \mathbf{x}_e)$$

であり, また, $\mathbf{K}_p = \text{diag}\{k_{p_i}\}$ と $\mathbf{K}_v = \text{diag}\{k_{v_i}\}$ ($i = 1, 2$) はフィードバックゲイン行列で, その要素は $k_{p_i} > 0$ と $k_{v_i} > 0$ に選定する. なお, $\ddot{\mathbf{x}}_0^{\text{ref}}$ はベースの目標加速度であるが, ベースには推進機器が搭載されていないので用いない.

Fig. 2.3 のマニピュレータ関節は速度型サーボ機構により駆動されるので, 制御則 (2.40) で得られた $\ddot{\boldsymbol{\phi}}^{\text{ref}}$ を時間積分してサーボ機構に入力する.

なお, 制御則 (2.40) の \mathbf{z}_1 および \mathbf{z}_2 の係数行列とベクトルは, 以下のように求めることができる. まず, \mathbf{z}_1 については式 (2.38) より, $\dot{\mathbf{C}}_s$, $\dot{\mathbf{D}}_s$ と $\dot{\mathbf{s}}_s$ の値が必要であるが, 式 (2.34) と (2.36) より

$$\mathbf{C}_s = \mathbf{M}_{\text{BB}}$$

$$\mathbf{D}_s = \mathbf{M}_{\text{BM}}$$

$$\dot{\mathbf{C}}_s = \mathbf{N}_{\text{BB}}$$

$$\dot{\mathbf{D}}_s = \mathbf{N}_{\text{BM}}$$

$$\dot{\mathbf{s}}_s = \mathbf{u}_B - \mathbf{f}_B$$

の関係が得られる. したがって, $\dot{\mathbf{C}}_s$, $\dot{\mathbf{D}}_s$ と $\dot{\mathbf{s}}_s$, さらに \mathbf{C}_s と \mathbf{D}_s も運動方程式 (2.34) から得ることができる.

また, \mathbf{z}_2 については式 (2.39) より, $\dot{\mathbf{A}}_s$ と $\dot{\mathbf{B}}_s$ の値が必要であるが, 式 (2.14) より

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

$$\dot{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1 & \mathbf{b}_2 \\ \boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{k}_1 & \boldsymbol{\omega}_2 \times \mathbf{k}_2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b}_i = (\boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{k}_i) \times (\mathbf{p}_e - \mathbf{p}_i) + \tilde{\mathbf{k}}_i(\dot{\tilde{\mathbf{p}}}_e - \dot{\tilde{\mathbf{p}}}_i)$$

が得られるので, $\dot{\mathbf{A}}_s$ と $\dot{\mathbf{B}}_s$ も簡単に求められる.

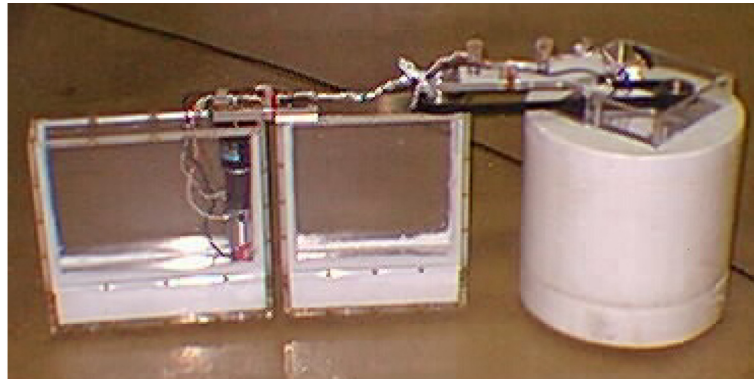


Fig. 2.3: Floating 2-link underwater robot manipulator

2.3 実験

ここでは, Fig. 2.3 のロボットを用いた実験を行い, モデリングおよび制御法の有用性を検証する.

2.3.1 実験システムの構成

実験システムの構成を Fig. 2.4 に示す.

まず, Table 2.1 の物理パラメータを有するロボットは, 円柱型ベースと, エンコーダ付 DC サーボモータにより関節が駆動される直方体型の 2 リンクマニピュレータからなり, 水面上で浮遊する. なお, 流体力, 特に流体抗力の影響を大きく受けるよう, リンク形状は直方体型としている.

つぎに, コンピュータからの関節速度指令電圧入力を, 速度型サーボコントローラに印加することにより, 関節の DC サーボモータを駆動する. このときのロボットの位置・姿勢計測は CCD カメラ, X-Y トラッカ, エンコーダおよびコンピュータにより行う. マニピュレータの第 2 リンクに取り付けられた 2 つの光点の位置を, ロボット上方から吊るされた CCD カメラを介して XY トラッカで計測する. また, 関節に取り付けられたエンコーダにより関節角度を計測する. これらのリンク 2 の位置姿勢情報と関節角度情報より, コンピュータを用いてロボットベースの位置・姿勢ならびにマニピュレータ手先位置が計算される.

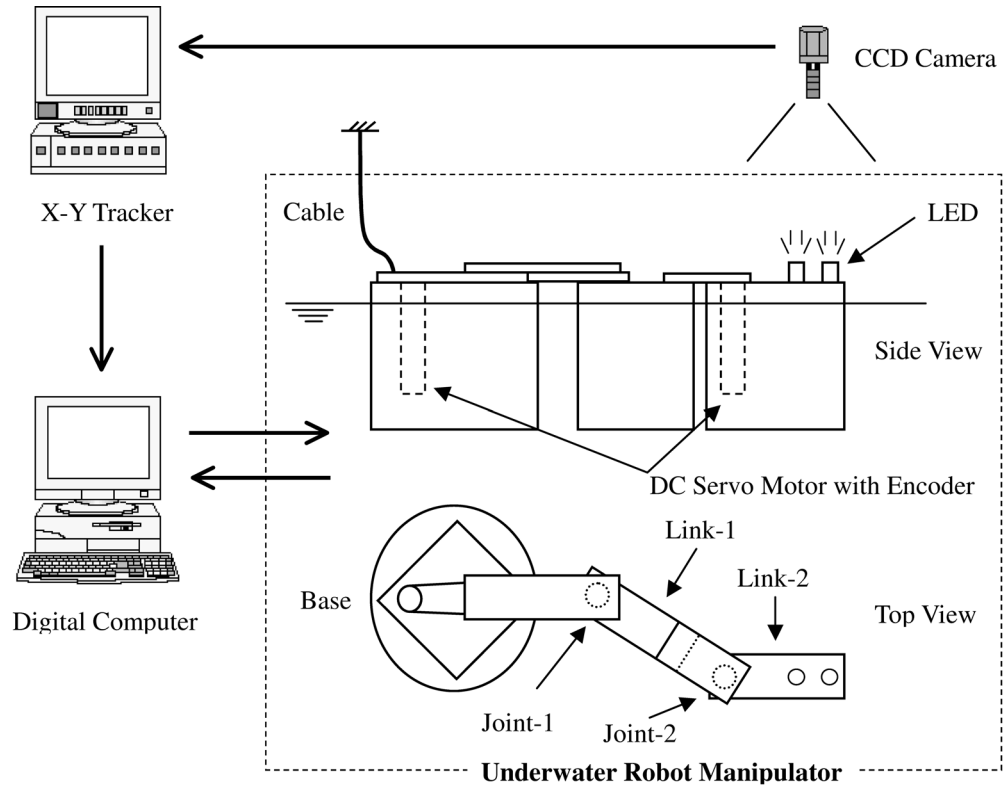


Fig. 2.4: Configuration of underwater robot system

Table 2.1: Physical parameters of the underwater robot

	Base	Link 1	Link 2
Mass [kg]	31.72	7.48	9.68
Moment of inertia [kg m ²]	0.41	0.20	0.37
Link length [m]	0.16	0.30	0.30
Height [m]	0.30	0.30	0.30

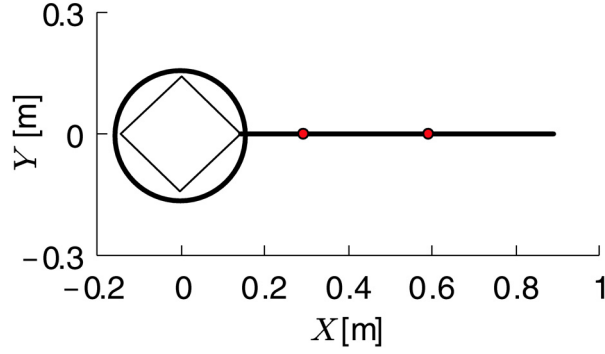


Fig. 2.5: Initial posture of the robot

2.3.2 モデルの検証

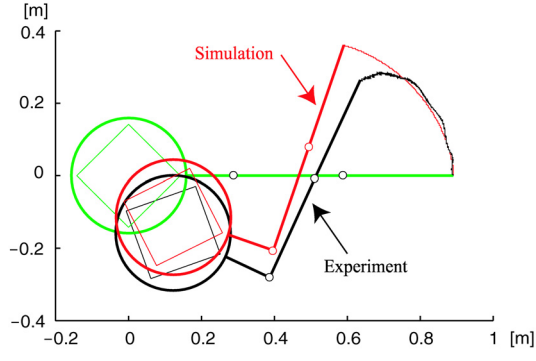
ここでは, Fig. 2.5に示すように, マニピュレータを伸ばした状態を初期状態とし, 相対関節角度を 0 [deg] から 90 [deg] まで一定角速度で回転させるシミュレーションおよび実験を行い, 2.1.2 項で導出した水中ロボットの運動方程式 (2.33) の妥当性を検討する.

シミュレーションで用いた流体力に関する値は, ベースおよびリンクの形状である円柱および直方体の代表値 [47] に基づき, ロボットの運動が水平方向に限定され, かつ, リンクの長手方向には流体力が作用しないとし,

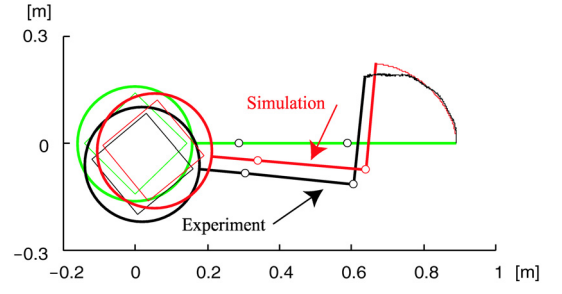
$$\begin{aligned}
 {}^0\mathbf{M}_{a_0} &= \begin{bmatrix} 48.26 & 0 & 0 \\ 0 & 48.26 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad {}^1\mathbf{M}_{a_1} = {}^2\mathbf{M}_{a_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 32.82 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 {}^0\mathbf{I}_{a_0} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad {}^1\mathbf{I}_{a_1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.15 \end{bmatrix}, \quad {}^2\mathbf{I}_{a_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.33 \end{bmatrix} \\
 C_{d_0} &= 1.12, \quad C_{d_1} = C_{d_2} = 2
 \end{aligned}$$

に選定した.

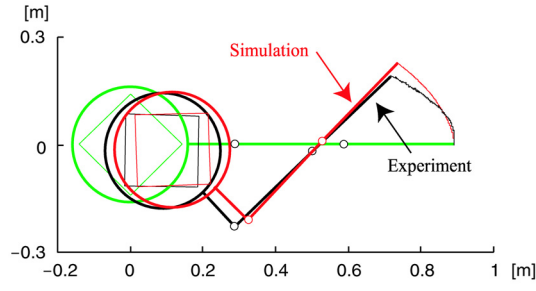
Fig. 2.6 に, 関節 1 および 2 を 4.5 [deg/s], 15 [deg/s] と 30 [deg/s] で 90 [deg] 駆動させた場合の, シミュレーションと実験結果の比較を示す. 付加質量, 付加慣性モーメントおよび流体抗力係数の値は実際には変化するため, シミュレーション結



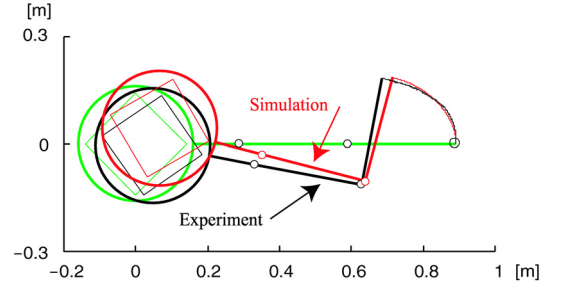
$$\dot{\phi}_1 = 4.5 \text{ deg/s}$$



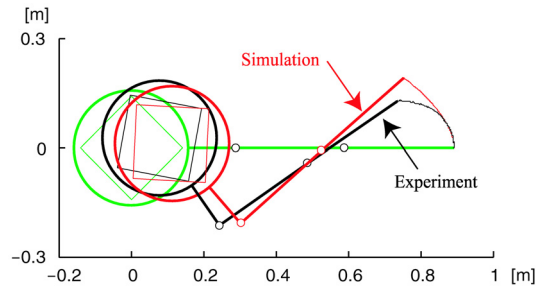
$$\dot{\phi}_2 = 4.5 \text{ deg/s}$$



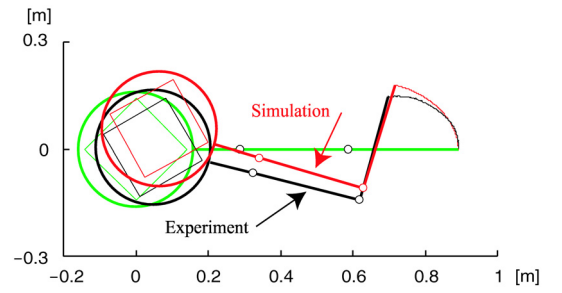
$$\dot{\phi}_1 = 15 \text{ deg/s}$$



$$\dot{\phi}_2 = 15 \text{ deg/s}$$



$$\dot{\phi}_1 = 30 \text{ deg/s}$$



$$\dot{\phi}_2 = 30 \text{ deg/s}$$

Fig. 2.6: Comparison between experiments and simulations

果と実験結果の挙動に違いが見られるが傾向は似ている．したがって，2.1.2 項で導出したロボットの運動方程式 (2.33) は妥当であると考えられる．

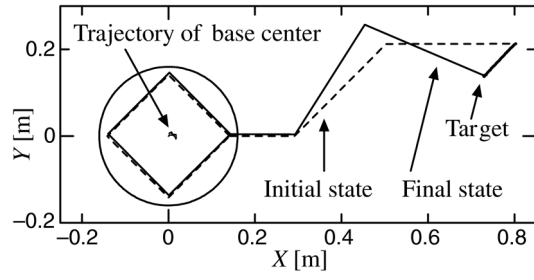
2.3.3 制御実験

ここでは，式 (2.40) の制御則を適用した実験結果について示す．ロボットの初期姿勢を $\phi_0 = 0$ [deg]， $\phi_1 = 45$ [deg]， $\phi_2 = -45$ [deg] とし，マニピュレータ手先を初期位置から x ， y 方向に -0.07 [m] ずつ離れた目標位置に直線で移動させる．

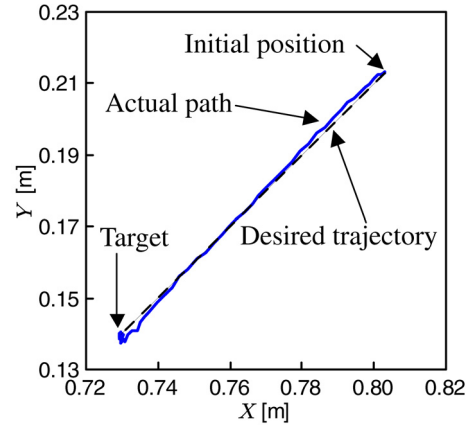
制御則のゲインを $K_v = \text{diag}\{2, 2\}$ と $K_p = \text{diag}\{1, 1\}$ とした場合の実験結果を Fig. 2.7 に示す．なお，Fig. 2.7 において，(a) から (d) は，ロボットの挙動，手先軌道，手先目標加速度および手先追従誤差である．図より，一定値の付加質量，付加慣性モーメントおよび流体抗力係数を用いているにもかかわらず，位置と速度のフィードバックにより手先追従誤差は十分抑制されているのが読み取れ，分解加速度制御法の有用性が確認できる．

2.4 まとめ

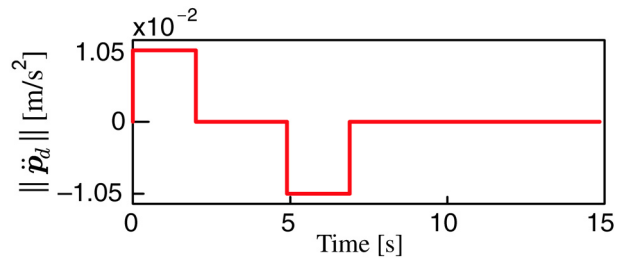
本章では，UVMS に対する分解加速度制御法の有用性確認の第一歩として，ロボットベースに推進機構が実装されておらず，かつ，重力・浮力の影響を受けない，水平 2 次元面内で運動する 2 リンクマニピュレータを搭載した水中ロボットの制御法を提案した．まず，分解加速度制御法開発に必要となるロボットベースとマニピュレータ手先の速度関係およびロボットベースに関する運動量を定式化するとともに，ロボットの運動方程式を導出した．つぎに，マニピュレータ手先位置のみを制御する分解加速度制御法を提案した．さらに，導出した運動方程式の妥当性をシミュレーションと開ループ実験との比較により示すとともに，制御実験により提案制御法の有用性を示した．



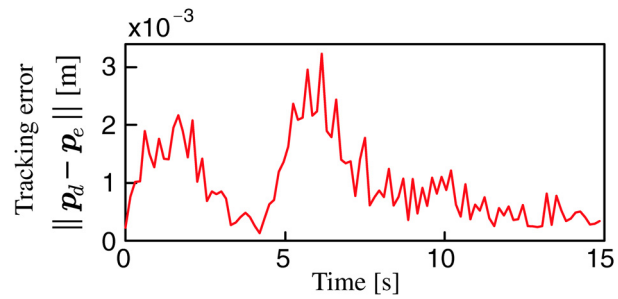
(a) Motion of the underwater robot



(b) End-point trajectory



(c) End-point desired acceleration



(d) End-point tracking error

Fig. 2.7: Experimental result

第3章 UVMSの連続時間分解加速度制御

第2章において、水平面上で運動する、マニピュレータを搭載した水中ロボットモデリングおよび制御法開発を行い、その有用性を実験により確認した。本章では、第2章の結果をもとに、垂直面内で運動し、ロボットベース位置・姿勢制御用の推進機器を搭載した水中ロボットのモデリングを行うとともに、ベースとマニピュレータ手先の両方を制御する連続時間系の分解加速度制御法を提案し、実験によりその有用性を検証する。さらに、流体力のモデル化誤差を外乱として取り扱い、分解加速度制御法に外乱補償を付加した制御系を構成するとともに、実験により提案制御法の有用性を示す。

3.1 モデリング

ここでは、Fig. 3.1の水中ロボットに対して、ロボット本体(ベース)および回転関節を持つ2リンクマニピュレータからなり、 $x-y$ 鉛直平面内でのみ運動する Fig. 3.2のモデルを設定し、その運動学および動力学の定式化を行う。

また、第2章と同様に、本章で対象とするロボットの運動は2次元平面内に限定されるので、仮定とおもな記号は基本的には第2章と同じである。ただし、本章のロボットの運動は鉛直方向であり、重力および浮力の影響を受ける。この点を考慮した新たな仮定と記号を以下に示す。

【仮定】

- A5. 重力と浮力はベースおよび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】

- V_i : 第 i リンクの体積
 F_j : スラスト推力 ($j = 1, 2, 3$)
 R : Σ_0 原点からスラストまでの距離

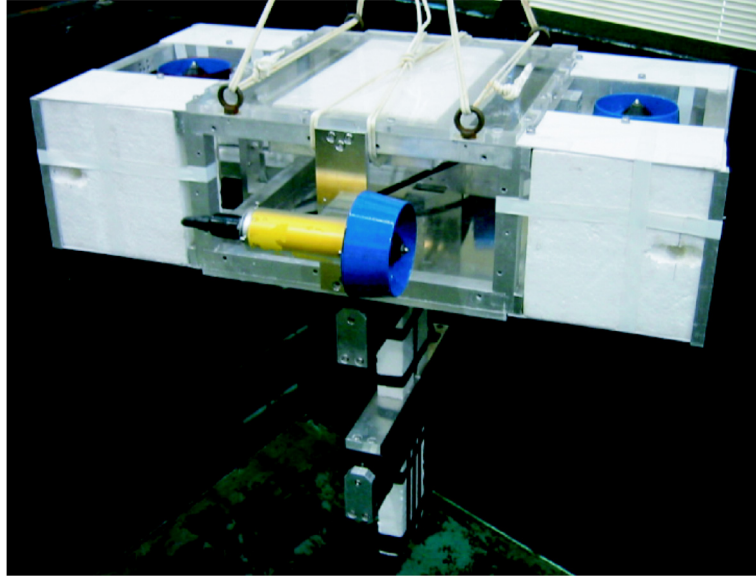


Fig. 3.1: Underwater robot

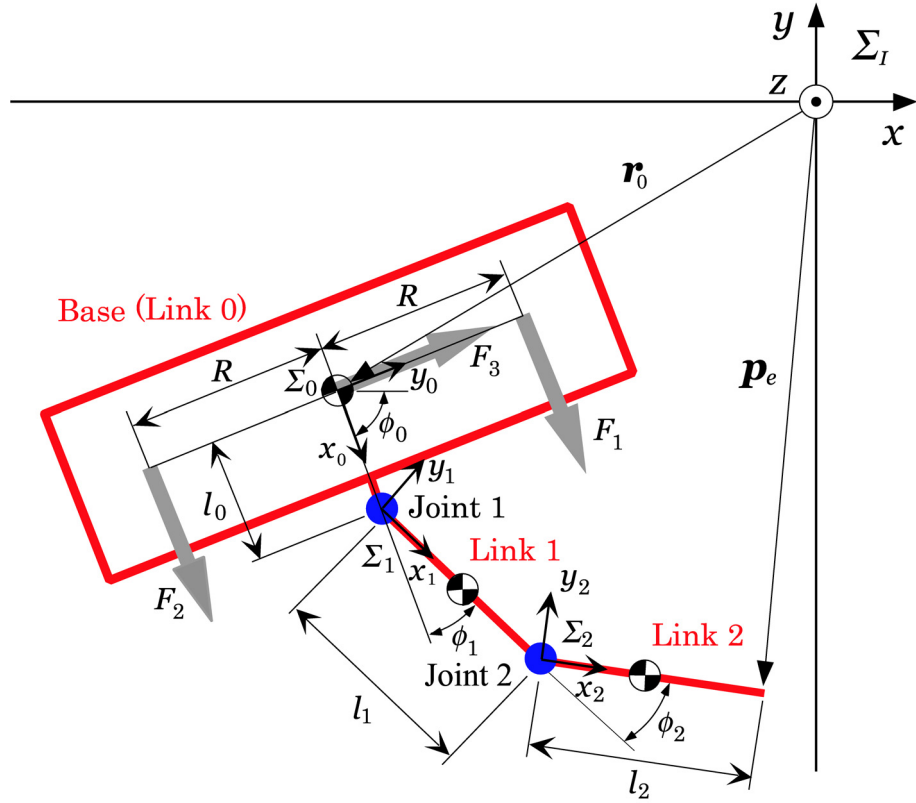


Fig. 3.2: Underwater robot model

3.1.1 運動学関係式および運動量関係式

まず、ベースと手先の作業変数ベクトルを、それぞれ $\boldsymbol{\nu}_0 = [\dot{\mathbf{r}}_0^T, \dot{\boldsymbol{\omega}}_0^T]^T$ と $\boldsymbol{\nu}_e = [\dot{\mathbf{p}}_e^T, \dot{\boldsymbol{\omega}}_e^T]^T$ とすると、Fig. 3.2 の幾何学的関係より式 (2.13) と同一の次式を得る.

$$\boldsymbol{\nu}_e = \mathbf{A}\boldsymbol{\nu}_0 + \mathbf{B}\dot{\boldsymbol{\phi}} \quad (3.1)$$

ただし、

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_3 & -(\tilde{\mathbf{p}}_e - \tilde{\mathbf{r}}_0) \\ \mathbf{0} & \mathbf{E}_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{k}}_1(\mathbf{p}_e - \mathbf{p}_1) & \tilde{\mathbf{k}}_2(\mathbf{p}_e - \mathbf{p}_2) \\ \mathbf{k}_1 & \mathbf{k}_2 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

である.

つぎに、流体中で物体が運動することにより生じる付加質量と付加慣性モーメントを含んだ、水中ロボット質量中心の並進運動量 $\boldsymbol{\eta}$ およびベース質量中心まわりの角運動量 $\boldsymbol{\mu}$ に関する関係式も、式 (2.19) と同一の次式となる.

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\eta} \\ \boldsymbol{\mu} \end{bmatrix} = \mathbf{C}\boldsymbol{\nu}_0 + \mathbf{D}\dot{\boldsymbol{\phi}} \quad (3.3)$$

ただし、

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

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

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

$$\mathbf{d}_{2i} = \sum_{j=i}^2 \left\{ I_{T_j} \mathbf{k}_i + (\tilde{\mathbf{r}}_j - \tilde{\mathbf{r}}_0) M_{T_j} \tilde{\mathbf{k}}_i(\mathbf{r}_j - \mathbf{p}_1) \right\}$$

である.

3.1.2 流体抗力および浮力

第2章で求めた式 (2.22)～(2.25) の流体抗力および抗力モーメントは、物体の運動が2次元平面内に限定される場合に対するものである. ここでは、3次元運動する物体に作用する流体抗力および抗力モーメント、さらには浮力を定式化する.

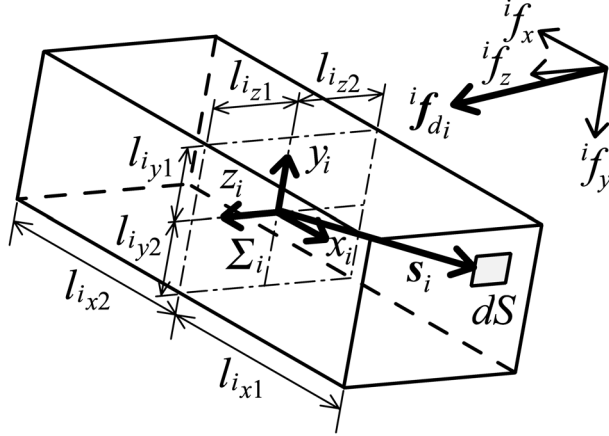


Fig. 3.3: Drag force on link i

Fig. 3.3に示すように、リンク座標系 $\Sigma_i(x_i, y_i, z_i)$ において、 x_i, y_i, z_i 軸方向長さが $l_{i*} = l_{i*1} + l_{i*2}$ ($* = x, y, z$) であるリンク i に作用する、 Σ_i に関する流体抗力と浮力を求める。

まず、Fig. 3.3において、流体抗力の x_i 軸方向成分 ${}^i f_x$ が作用するリンク表面の位置 $\mathbf{s}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ にある、面積 $dy_i dz_i$ の微小面 dS に加わる x_i 軸方向の力 $d {}^i f_x$ 、および $d {}^i f_x$ により生じる抗力モーメント $d {}^i \boldsymbol{\tau}_{f_x}$ は、それぞれ

$$d {}^i f_x = \frac{\rho}{2} C_{D_i} w_{i_x} |w_{i_x}| dy_i dz_i \quad (3.4)$$

$$d {}^i \boldsymbol{\tau}_{f_x} = \tilde{\mathbf{s}}_i \begin{bmatrix} d {}^i f_x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ z_i \\ -y_i \end{bmatrix} d {}^i f_x \quad (3.5)$$

となる [18]。ただし、

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_i &= [w_{i_x}, w_{i_y}, w_{i_z}]^T = {}^i \dot{\mathbf{p}}_i + {}^i \tilde{\boldsymbol{\omega}}_i \mathbf{s}_i \\ {}^i \dot{\mathbf{p}}_i &= {}^i \mathbf{R}_I \dot{\mathbf{p}}_i, \quad {}^i \boldsymbol{\omega}_i = {}^i \mathbf{R}_I \boldsymbol{\omega}_i \end{aligned}$$

であり、 ${}^i \dot{\mathbf{p}}_i$ と ${}^i \boldsymbol{\omega}_i$ は Σ_i に関する Σ_i 原点の並進速度と角速度である。

式 (3.4) と (3.5) より、リンク i に作用する流体抗力の x_i 軸方向成分 ${}^i f_x$ 、および ${}^i f_x$ により生ずる抗力モーメント ${}^i \mathbf{n}_{f_x}$ は次式となる。

$${}^i f_x = \frac{\rho}{2} C_{D_i} \int_{-l_{z2}}^{l_{z1}} \int_{-l_{y2}}^{l_{y1}} w_{ix} |w_{ix}| dy_i dz_i \quad (3.6)$$

$${}^i \mathbf{n}_{f_x} = \frac{\rho}{2} C_{D_i} \int_{-l_{z2}}^{l_{z1}} \int_{-l_{y2}}^{l_{y1}} \begin{bmatrix} 0 \\ z_i \\ -y_i \end{bmatrix} w_{ix} |w_{ix}| dy_i dz_i \quad (3.7)$$

同様にして、リンクに作用する流体抗力の y_i と z_i 軸方向成分 ${}^i f_y$ と ${}^i f_z$ 、および ${}^i f_y$ と ${}^i f_z$ により生じる抗力モーメント ${}^i \mathbf{n}_{f_y}$ と ${}^i \mathbf{n}_{f_z}$ は、それぞれ次式となる．

$${}^i f_y = \frac{\rho}{2} C_{D_i} \int_{-l_{x2}}^{l_{x1}} \int_{-l_{z2}}^{l_{z1}} w_{iy} |w_{iy}| dz_i dx_i \quad (3.8)$$

$${}^i f_z = \frac{\rho}{2} C_{D_i} \int_{-l_{y2}}^{l_{y1}} \int_{-l_{x2}}^{l_{x1}} w_{iz} |w_{iz}| dx_i dy_i \quad (3.9)$$

$${}^i \mathbf{n}_{f_y} = \frac{\rho}{2} C_{D_i} \int_{-l_{x2}}^{l_{x1}} \int_{-l_{z2}}^{l_{z1}} \begin{bmatrix} -z_i \\ 0 \\ x_i \end{bmatrix} w_{iy} |w_{iy}| dz_i dx_i \quad (3.10)$$

$${}^i \mathbf{n}_{f_z} = \frac{\rho}{2} C_{D_i} \int_{-l_{y2}}^{l_{y1}} \int_{-l_{x2}}^{l_{x1}} \begin{bmatrix} y_i \\ -x_i \\ 0 \end{bmatrix} w_{iz} |w_{iz}| dx_i dy_i \quad (3.11)$$

したがって、式(3.6)～(3.11)より、リンク i に作用する Σ_i に関する抗力および抗力モーメントは

$${}^i \mathbf{f}_{d_i} = [{}^i f_x, {}^i f_y, {}^i f_z]^T \quad (3.12)$$

$${}^i \mathbf{n}_{d_i} = {}^i \mathbf{n}_{f_x} + {}^i \mathbf{n}_{f_y} + {}^i \mathbf{n}_{f_z} \quad (3.13)$$

となる．

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

$${}^i \mathbf{f}_{g_i} = {}^i \mathbf{R}_I (\rho V_i - m_i) \mathbf{g} \quad (3.14)$$

$${}^i \mathbf{n}_{g_i} = {}^i \mathbf{R}_I (\tilde{\mathbf{b}}_i \rho V_i - \tilde{\mathbf{a}}_i m_i) \mathbf{g} \quad (3.15)$$

となる．ただし、 \mathbf{a}_i と \mathbf{b}_i は、それぞれ関節 i からリンク i の質量中心と浮心までの位置ベクトルである．

3.1.3 運動方程式

流体力を考慮した水中ロボットの運動方程式を、第2章と同様に、漸化的ニュートン・オイラー法 [46] を用いて求める。なお、第2章との違いは、重力および浮力が考慮されている点である。

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

$$\left. \begin{aligned} {}^i\boldsymbol{\omega}_i &= {}^i\mathbf{R}_{i-1} {}^{i-1}\boldsymbol{\omega}_{i-1} + {}^i\mathbf{k}_i \dot{\phi}_i \\ {}^i\dot{\boldsymbol{\omega}}_i &= {}^i\mathbf{R}_{i-1} {}^{i-1}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{i-1} + {}^i\mathbf{k}_i \ddot{\phi}_i + {}^i\boldsymbol{\omega}_i \times {}^i\mathbf{k}_i \dot{\phi}_i \\ {}^i\ddot{\mathbf{p}}_i &= {}^i\mathbf{R}_{i-1} \{ {}^{i-1}\ddot{\mathbf{p}}_{i-1} + {}^{i-1}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{i-1} \times {}^{i-1}\mathbf{l}_{i-1} + {}^{i-1}\boldsymbol{\omega}_{i-1} \times ({}^{i-1}\boldsymbol{\omega}_{i-1} {}^{i-1}\mathbf{l}_{i-1}) \} \\ {}^i\ddot{\mathbf{r}}_i &= {}^i\ddot{\mathbf{p}}_i + {}^i\dot{\boldsymbol{\omega}}_i \times {}^i\mathbf{r}_i + {}^i\boldsymbol{\omega}_i \times ({}^i\boldsymbol{\omega}_i \times {}^i\mathbf{r}_i) \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

を $i = 1, 2$ で逐次計算し、つぎに、リンク i 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

$$\left. \begin{aligned} {}^i\hat{\mathbf{f}}_i &= (m_i \mathbf{E}_3 + {}^i\mathbf{M}_{a_i}) {}^i\ddot{\mathbf{r}}_i \\ {}^i\hat{\mathbf{n}}_i &= ({}^i\mathbf{I}_i + {}^i\mathbf{I}_{a_i}) {}^i\dot{\boldsymbol{\omega}}_i + {}^i\boldsymbol{\omega}_i \times \{ ({}^i\mathbf{I}_i + {}^i\mathbf{I}_{a_i}) {}^i\boldsymbol{\omega}_i \} \\ {}^i\mathbf{f}_i &= {}^i\mathbf{R}_{i+1} {}^{i+1}\mathbf{f}_{i+1} + {}^i\hat{\mathbf{f}}_i + {}^i\mathbf{f}_{d_i} + {}^i\mathbf{f}_{g_i} \\ {}^i\mathbf{n}_i &= {}^i\mathbf{R}_{i+1} {}^{i+1}\mathbf{n}_{i+1} + {}^i\hat{\mathbf{n}}_i + {}^i\mathbf{l}_i \times ({}^i\mathbf{R}_{i+1} {}^{i+1}\mathbf{f}_{i+1}) + {}^i\mathbf{r}_i \times {}^i\hat{\mathbf{f}}_i + {}^i\mathbf{n}_{d_i} + {}^i\mathbf{n}_{g_i} \end{aligned} \right\} \quad (3.17)$$

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

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{f}_0 &= [f_{0x}, f_{0y}, f_{0z}]^T = {}^I\mathbf{R}_0 {}^0\mathbf{f}_0 \\ \mathbf{n}_0 &= [n_{0x}, n_{0y}, n_{0z}]^T = {}^I\mathbf{R}_0 {}^0\mathbf{n}_0 \end{aligned} \right\} \quad (3.18)$$

より Σ_I に関するベースの力とトルク、また、

$$\tau_i = ({}^i\mathbf{k}_i)^T {}^i\mathbf{n}_i \quad (i = 1, 2) \quad (3.19)$$

より、マニピュレータ関節トルクが得られる。なお、式 (3.16)～(3.19) 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。

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\dot{\boldsymbol{\zeta}} + \mathbf{N}(\mathbf{q}, \boldsymbol{\zeta})\boldsymbol{\zeta} + \mathbf{f} = \mathbf{u} \quad (3.20)$$

ただし、 $\mathbf{q} = [\phi_0, \boldsymbol{\phi}^T]^T$, $\boldsymbol{\zeta} = [\nu_0^T, \dot{\boldsymbol{\phi}}^T]^T$ 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。

3.2 制御系の構成

ここでは, Fig. 3.2 のロボットに対して, まず, ベースとマニピュレータ手先を同時に制御する, 分解加速度制御系の構成法を示す. つぎに, 流体力に関するモデル化誤差を外乱とみなし, 外乱補償を付加した制御系の構成法を示す.

3.2.1 分解加速度制御

まず, Fig. 3.2 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 (3.1), 運動量方程式 (3.3) および運動方程式 (3.20) は, それぞれ

$$\dot{\mathbf{x}}_e = \mathbf{A}_s \dot{\mathbf{x}}_0 + \mathbf{B}_s \dot{\boldsymbol{\phi}} \quad (3.21)$$

$$\mathbf{s}_s = \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{x}}_0 + \mathbf{D}_s \dot{\boldsymbol{\phi}} \quad (3.22)$$

$$\mathbf{M}_s(\mathbf{q})\ddot{\boldsymbol{\chi}} + \mathbf{N}_s(\mathbf{q}, \dot{\boldsymbol{\chi}})\dot{\boldsymbol{\chi}} + \mathbf{f}_s = \mathbf{u}_s \quad (3.23)$$

と低次元化できる. ただし, $\mathbf{x}_e = [p_{e_x}, p_{e_y}]^T$, $\mathbf{x}_0 = [r_{0_x}, r_{0_y}, \phi_0]^T$, $\mathbf{s}_s = [\eta_x, \eta_y, \mu_z]^T$, $\boldsymbol{\chi} = [\mathbf{x}_0^T, \boldsymbol{\phi}^T]^T$, $\mathbf{u}_s = [f_{0_x}, f_{0_y}, n_{0_z}, \tau_1, \tau_2]^T$ であり, 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 に関して, 運動方程式 (3.23) 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.

$$\mathbf{M}_{BB}\ddot{\mathbf{x}}_0 + \mathbf{M}_{BM}\ddot{\boldsymbol{\phi}} + \mathbf{N}_{BB}\dot{\mathbf{x}}_0 + \mathbf{N}_{BM}\dot{\boldsymbol{\phi}} + \mathbf{f}_B = \mathbf{u}_B \quad (3.24)$$

さて, 式 (3.21) と (3.22) を時間微分して整理すると

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C}_s + \mathbf{E}_3 & \mathbf{D}_s \\ \mathbf{A}_s & \mathbf{B}_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_0 \\ \ddot{\boldsymbol{\phi}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_0 \\ \ddot{\mathbf{x}}_e \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{z}_1 \\ \mathbf{z}_2 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

を得る．ただし，

$$z_1 = \dot{C}_s \dot{x}_0 + \dot{D}_s \dot{\phi} - \dot{s}_s \quad (3.26)$$

$$z_2 = \dot{A}_s \dot{x}_0 + \dot{B}_s \dot{\phi} \quad (3.27)$$

である．

なお，式 (3.25) は，2.2 節の式 (2.37) と同様に導出されているが，本章ではマニピュレータ手先のみではなくベースも制御するため，式 (3.25) 右辺第 1 項のベクトルはベース加速度 \ddot{x}_0 を含んでいる．

式 (3.25) に基づき， x_0 と x_e の目標値 x_0^{des} と x_e^{des} に対して，次式の分解加速度制御則によりベース加速度 \ddot{x}_0 と関節加速度 $\ddot{\phi}$ の修正目標値 $\ddot{x}_{0e}^{\text{ref}}$ と $\ddot{\phi}^{\text{ref}}$ を決定する．

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_0^{\text{ref}} \\ \ddot{\phi}^{\text{ref}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_s + E_3 & D_s \\ A_s & B_s \end{bmatrix}^{-1} \left(\ddot{x}_{0e}^{\text{ref}} - \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} \right) \quad (3.28)$$

ただし，

$$\ddot{x}_{0e}^{\text{ref}} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_0^{\text{des}} \\ \ddot{x}_e^{\text{des}} \end{bmatrix} + K_v \begin{bmatrix} \dot{x}_0^{\text{des}} - \dot{x}_0 \\ \dot{x}_e^{\text{des}} - \dot{x}_e \end{bmatrix} + K_p \begin{bmatrix} x_0^{\text{des}} - x_0 \\ x_e^{\text{des}} - x_e \end{bmatrix}$$

であり，また， $K_p = \text{diag}\{k_{p_i}\}$ と $K_v = \text{diag}\{k_{v_i}\}$ ($i = 1, \dots, 5$) はフィードバックゲイン行列で，その要素は $k_{p_i} > 0$ と $k_{v_i} > 0$ に選定する．

Fig. 3.1 のマニピュレータ関節は速度型サーボ機構により駆動されるので，制御則 (3.28) で得られた修正目標値 $\ddot{\phi}^{\text{ref}}$ を時間積分してサーボ機構に入力する．また，ベースの運動方程式 (3.24) の \ddot{x}_0 と $\ddot{\phi}$ を制御則 (3.28) で得られたベースと関節の修正目標値 $\ddot{x}_{0e}^{\text{ref}}$ と $\ddot{\phi}^{\text{ref}}$ で置換することにより，ベース制御入力が見られる．

3.2.2 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，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基づいた一定値が用いられる [48]．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，3.1 節で定式化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．

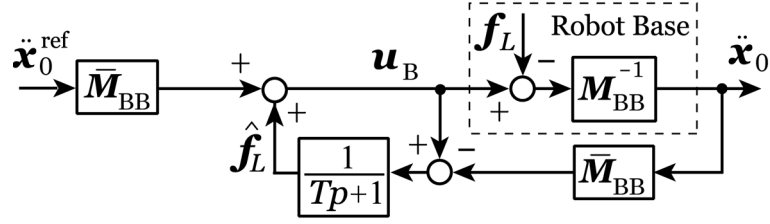


Fig. 3.4: Basic disturbance compensation

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，3.2.1 項の分解加速度制御法はモデル化誤差の影響を受けるが，ベースと手先の位置および速度誤差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と考えられる．

ここで，速度型関節サーボ機構を有するマニピュレータ関節は，制御則 (3.28) で得られる修正目標関節角加速度 $\ddot{\phi}^{\text{ref}}$ の積分値，すなわち目標関節角速度 $\dot{\phi}^{\text{ref}}$ を実現する．一方，ベース制御入力 \mathbf{u}_B の力とトルクは，制御則で得られる修正目標加速度 $\ddot{\mathbf{x}}_0^{\text{ref}}$ および $\dot{\phi}^{\text{ref}}$ 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．

ベース運動方程式 (3.24) 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，

$$\mathbf{f}_L = \mathbf{u}_B - \bar{\mathbf{M}}_{\text{BB}}\ddot{\mathbf{x}}_0 \quad (3.29)$$

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

$$\hat{\mathbf{f}}_L = F(p) (\mathbf{u}_B - \bar{\mathbf{M}}_{\text{BB}}\ddot{\mathbf{x}}_0) \quad (3.30)$$

で求められる [50]．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

$$\mathbf{u}_B = \bar{\mathbf{M}}_{\text{BB}}\ddot{\mathbf{x}}_0^{\text{ref}} + \hat{\mathbf{f}}_L \quad (3.31)$$

となり，ベース外乱補償の基本構成は Fig. 3.4 となる．

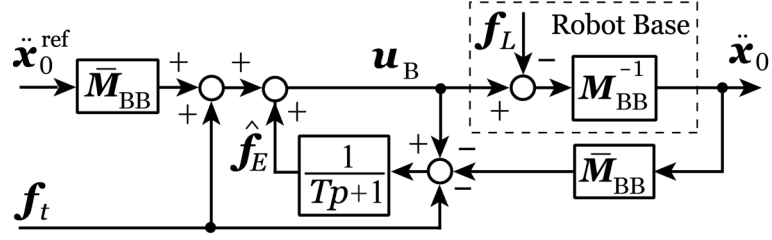


Fig. 3.5: Modified disturbance compensation

さて，Fig. 3.4 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 (3.24) 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. 3.4 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 (3.24) 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，

$$\bar{\mathbf{M}}_{\text{BB}}\ddot{\mathbf{x}}_0 + \bar{\mathbf{M}}_{\text{BM}}\ddot{\boldsymbol{\phi}} + \bar{\mathbf{N}}_{\text{BB}}\dot{\mathbf{x}}_0 + \bar{\mathbf{N}}_{\text{BM}}\dot{\boldsymbol{\phi}} + \bar{\mathbf{f}}_B = \bar{\mathbf{u}}_B \quad (3.32)$$

となる．

つぎに，式 (3.32) 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

$$\mathbf{f}_t = \bar{\mathbf{M}}_{\text{BM}}\ddot{\boldsymbol{\phi}}^{\text{ref}} + \bar{\mathbf{N}}_{\text{BB}}\dot{\mathbf{x}}_0 + \bar{\mathbf{N}}_{\text{BM}}\dot{\boldsymbol{\phi}} + \bar{\mathbf{f}}_B \quad (3.33)$$

とすると，流体力に関するモデル化誤差は

$$\mathbf{f}_E = \mathbf{u}_B - \bar{\mathbf{M}}_{\text{BB}}\ddot{\mathbf{x}}_0^{\text{ref}} - \mathbf{f}_t \quad (3.34)$$

となる．式 (3.30) と同様に， \mathbf{f}_E の推定値 $\hat{\mathbf{f}}_E$ は

$$\hat{\mathbf{f}}_E = F(p) (\mathbf{u}_B - \bar{\mathbf{M}}_{\text{BB}}\ddot{\mathbf{x}}_0 - \mathbf{f}_t) \quad (3.35)$$

で求められ，ベースの制御入力 \mathbf{u}_B は

$$\mathbf{u}_B = \bar{\mathbf{M}}_{\text{BB}}\ddot{\mathbf{x}}_0^{\text{ref}} + \mathbf{f}_t + \hat{\mathbf{f}}_E \quad (3.36)$$

となり，Fig. 3.4 の外乱補償の構成は Fig. 3.5 となる．

Table 3.1: Physical parameters

	Base	Link 1	Link 2
Mass [kg]	26.04	4.25	1.23
Moment of inertia [kg m ²]	1.33	0.19	0.012
Link length (x_i) [m]	0.2	0.25	0.25
Link length (y_i) [m]	0.81	0.04	0.04
Link width [m]	0.42	0.12	0.12
Added mass (x_i) [kg]	72.7	1.31	0.1
Added mass (y_i) [kg]	6.28	3.57	2.83
Added moment of inertia [kg m ²]	1.05	0.11	0.06
Drag coefficient (x_i)	1.2	0	0
Drag coefficient (y_i)	1.2	1.2	1.2

3.3 実験

ここでは、3.2 節の制御法の有用性を、Fig. 3.1 の水中ロボットを用いた実験により検証する。

3.3.1 実験システムの構成

まず、実験で用いた Fig. 3.1 の水中ロボットの物理パラメータを Table 3.1 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、関節速度型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 3.1 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 [48]。

つぎに、Fig. 3.6 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

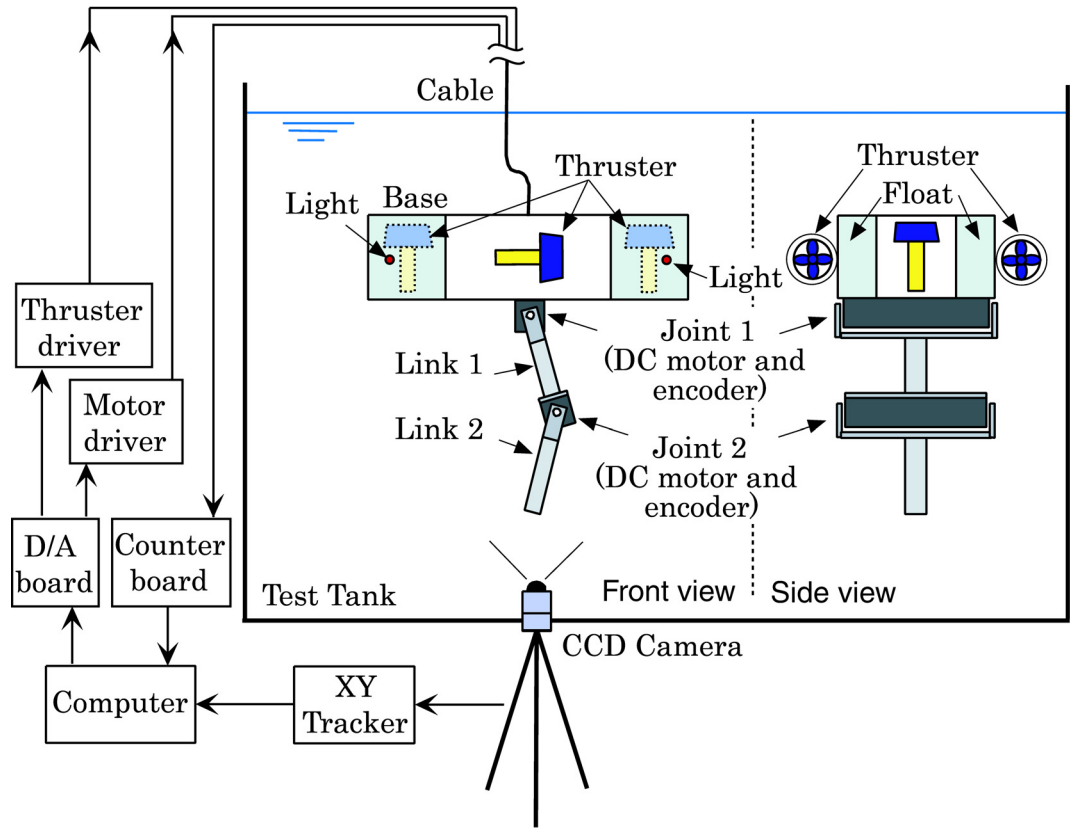


Fig. 3.6: Configuration of the experimental system

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トドライバとモータドライバに与え，ロボットを駆動する．

さて，ロボットベース駆動機器であるスラストは，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 [49] 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，スラスト電源供給用ドライバへの入力電圧とスラスト推力との関係を実験的に求める．なお，ベース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る．

スラスト推力の計測法の手順は以下の通りである．

1. Fig. 3.7(a) に示すように，歪ゲージを貼り付けた金属板の先端に対して，おもりにより負荷をかけ，歪ゲージ出力のブリッジボックス，増幅器を介した電圧値とおもり質量との関係を求める．
2. Fig. 3.7(b) に示すように，金属板の先端にスラストを取り付けた装置を水槽に設置し，歪ゲージ増幅器出力電圧とスラストドライバへの入力電圧との関係を求める．
3. 1 と 2 の結果より，スラストドライバへの入力電圧とおもり質量，すなわち推力との関係を求める．

手順 1 により得られた実験結果を Fig. 3.8 に示す．図より，歪ゲージ増幅器出力はおもり質量と線形関係にあることがわかる．そこで，この結果と手順 2 で得られる結果より，手順 3 のスラストドライバへの入力電圧と推力との関係を求めた結果を Fig. 3.9 に示す．なお，図中の CW および CCW は，それぞれスラストのプロペラの正回転および逆回転を表す．図より，スラストドライバへの入力電圧 v [V] を，スラスト推力 F [N] との関係を線形範囲で 2 次近似 (平均誤差 0.033 [N] ($v > 0$), 0.023 [N] ($v < 0$)) した

$$F = \begin{cases} 1.341v^2 - 1.363v - 0.026 & (1.2 \leq v \leq 4) \\ -0.763v^2 - 0.835v + 0.019 & (-4 \leq v \leq -1.2) \end{cases} \quad (3.37)$$

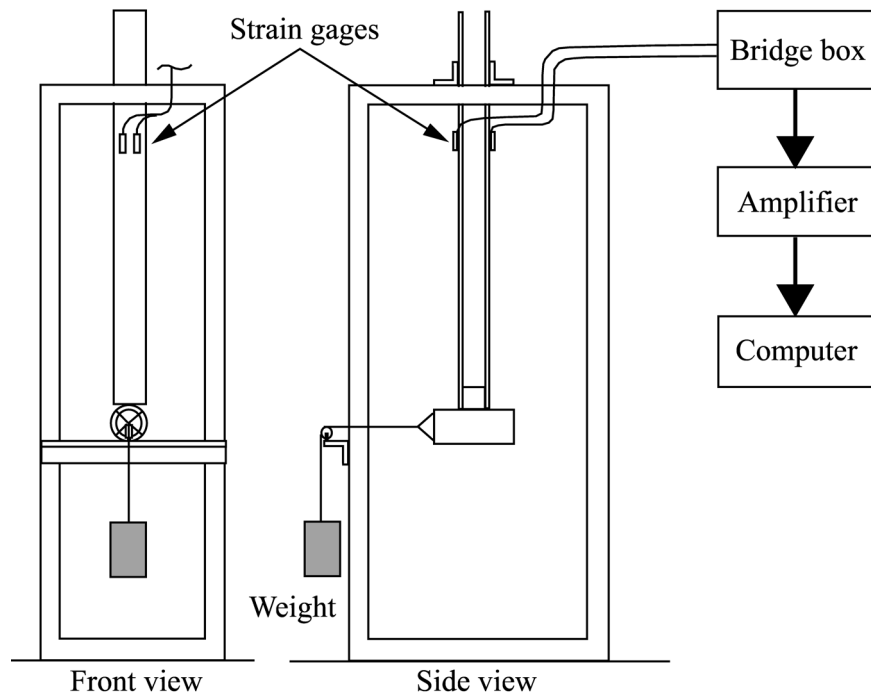
に基づいて求め，スラストドライバに入力する．また，ベース制御入力と Fig. 3.2 のスラスト推力の関係は

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_0 & C_0 & -S_0 \\ S_0 & S_0 & C_0 \\ -R & R & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ \tau_0 \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

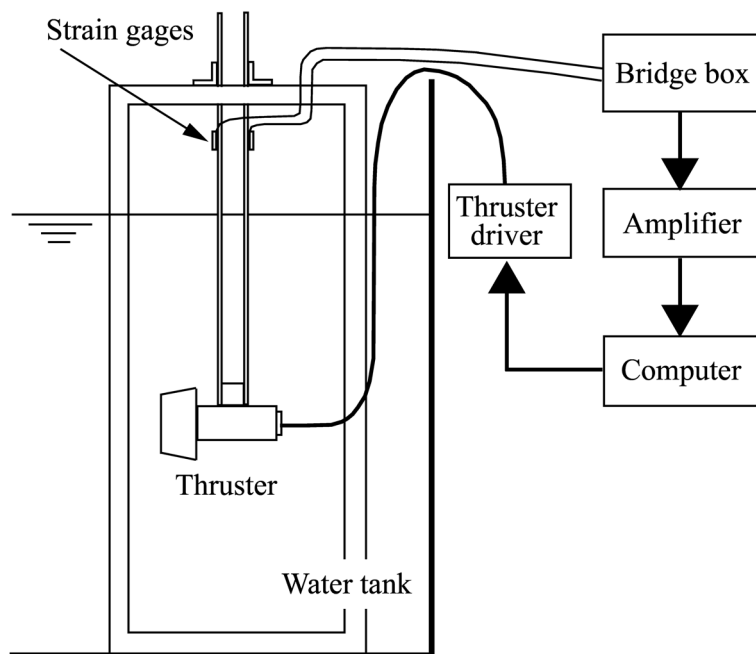
となる．ただし， $C_0 = \cos \phi_0$ ， $S_0 = \sin \phi_0$ であり， F_3 [N] は 2 基の水平方向スラストの合力となるので，水平方向スラスト 1 基の推力は $F_3/2$ [N] となる．

3.3.2 制御実験

実験は，以下の条件で，外乱補償なしの場合とありの場合について行った．ベースは初期状態を保ち，手先は初期位置から x 方向に -0.6m ， y 方向に 0.15m 離れた



(a) Strain gage and mass weight



(b) Strain gage and thrust of thruster

Fig. 3.7: Experimental apparatus for thrust measurement

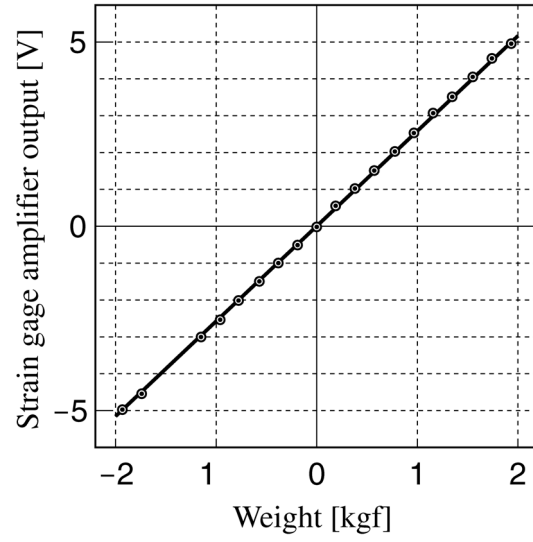


Fig. 3.8: Relationship between weight and strain gage amplifier output

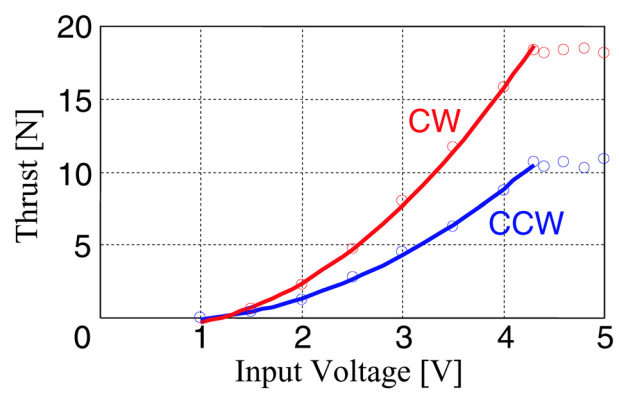


Fig. 3.9: Relationship between input voltage and thrust

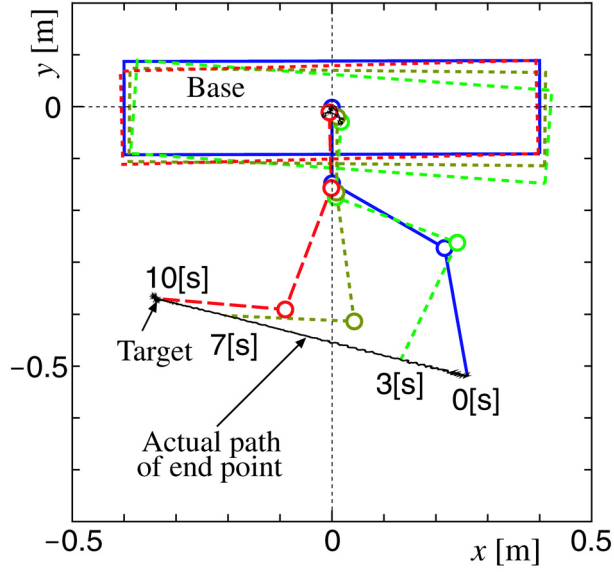


Fig. 3.10: Robot motion without disturbance observer

ターゲットまで直線軌道で移動させる．位置と速度のフィードバックゲインは，それぞれ $\mathbf{K}_p = \text{diag}\{100, 100, 100, 100, 100\}$ と $\mathbf{K}_v = \text{diag}\{10, 10, 10, 20, 20\}$ に設定した．また，外乱補償で用いたフィルタの時定数は $T = 1$ [s] である．

まず，外乱補償なしの場合の実験結果のロボットの挙動および時間履歴を，それぞれ Fig. 3.10 と 3.11 に示す．なお，Fig. 3.11 は上から手先希望加速度，手先位置誤差，関節角速度入力，ベース位置・姿勢誤差，ベース入力を示している．

Fig. 3.10 からわかるように，実験開始時点にベース変動が生じるようロボットの初期状態を設定しているため，Fig. 3.11 のベース位置・姿勢誤差は実験開始直後若干大きくなっているが，その後初期状態を保持するよう制御されていることがわかる．また，マニピュレータ手先位置誤差も，実験開始直後ベース変動の影響を若干受けているが，目標軌道に追従しているのが図より読み取れる．

つぎに，外乱補償ありの場合の実験結果のロボットの挙動および時間履歴を，それぞれ Fig. 3.12 と 3.13 に示す．なお，Fig. 3.13 も外乱補償なしの Fig. 3.11 と同様に，上から手先希望加速度，手先位置誤差，関節角速度入力，ベース位置・姿勢誤差，ベース入力を示している．さらに，推定値の時間履歴を Fig. 3.14 に示す．

実験開始直後のベース変動，すなわち位置・姿勢誤差は，外乱補償なしの Fig. 3.11 と比較して，外乱補償ありの場合は Fig. 3.13 より十分抑制されており，このこと

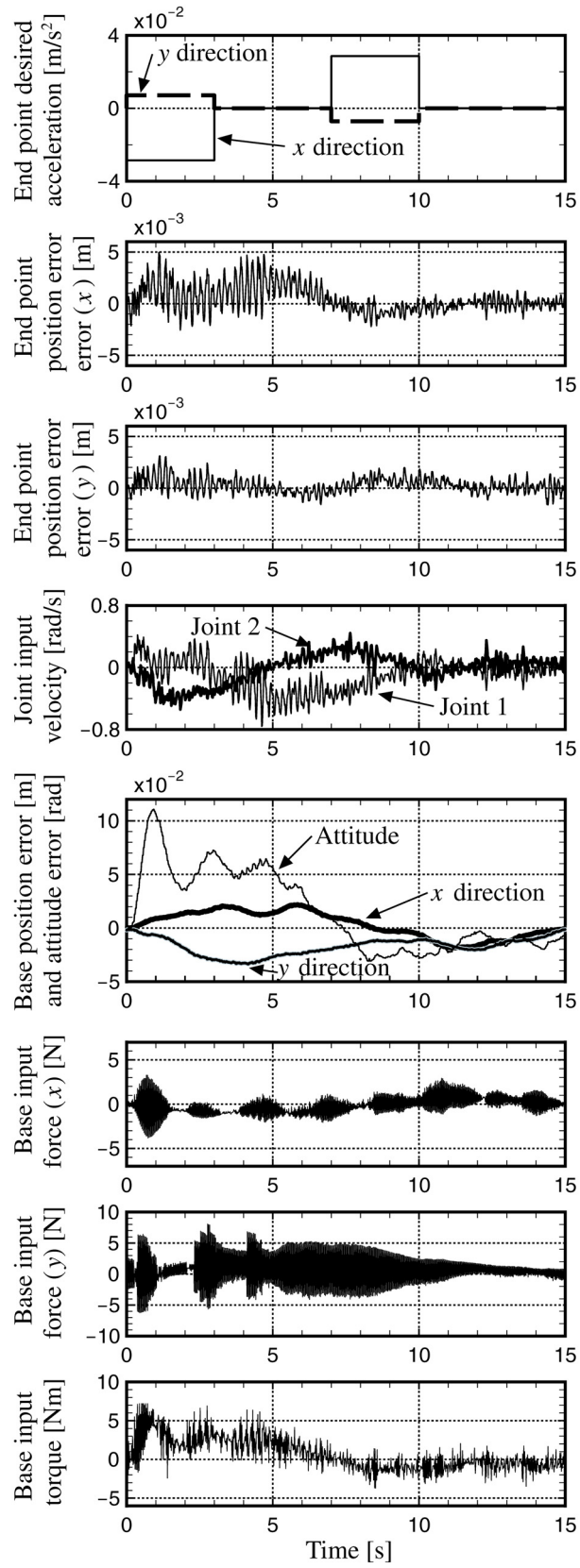


Fig. 3.11: Experimental result without disturbance observer

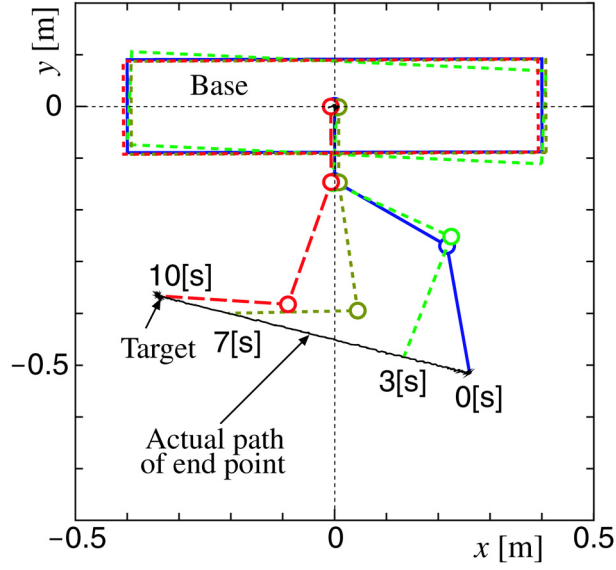


Fig. 3.12: Robot motion with disturbance observer

は Fig. 3.12 の挙動図からも読み取れる．また，全般的に，Fig. 3.14 のベース外乱推定により，Fig. 3.13 の外乱補償ありのベース制御入力の変動が，外乱補償なしの Fig. 3.11 よりも十分抑制されている．その結果，手先位置誤差も小さくなっているのも Fig. 3.11 と 3.13 より読み取れる．

なお，外乱補償ありの場合は，Fig. 3.5 よりベース加速度が必要であり，実験では位置・姿勢角の2階後退差分近似を用いている．しかしながら，2階後退差分近似に起因する加速度情報のノイズの影響も外乱補償のフィルタにより十分抑制できていると考えられる．

以上より，UVMS に対する分解加速度制御法，特に外乱補償を付加した分解加速度制御法が有用であることが確認できる．

3.4 まとめ

本章では，推進機構であるスラスタをロボットベースに実装し，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の制御法を開発した．まず，ロボットに作用する流体抗力の3次元モデルおよび対象とする水中ロボットの数学モデルを導出した．つぎに，ロボットベースとマニピュレータ手先を同時に

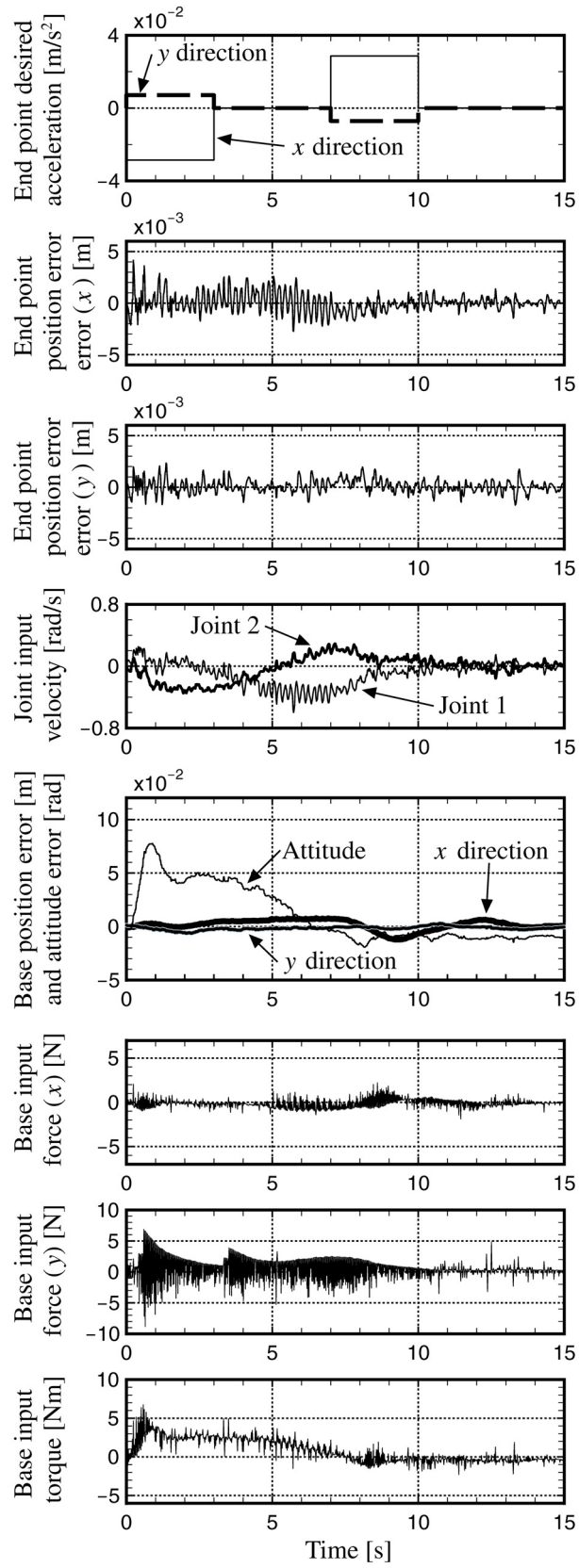


Fig. 3.13: Experimental result with disturbance observer

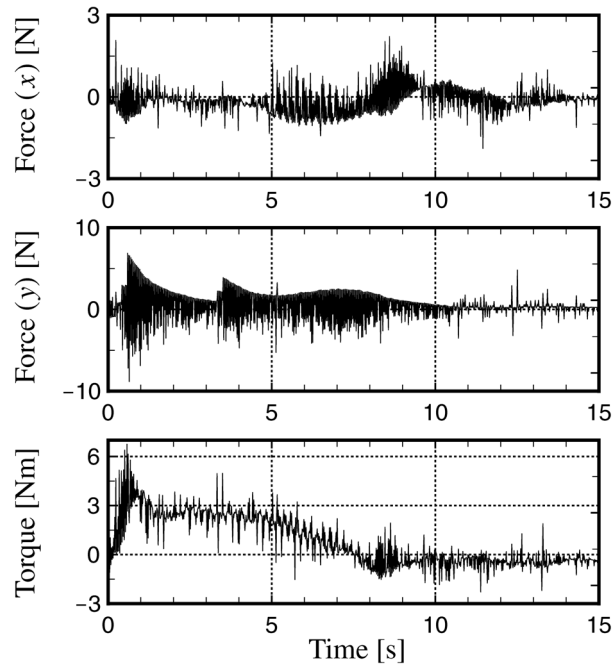


Fig. 3.14: Estimated disturbance

制御可能な分解加速度制御法および，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，外乱補償制御法を提案した．さらに，スラスタのモデルを実験により求めるとともに，制御実験により，提案制御法の有用性を示した．

第4章 UVMSの離散時間分解加速度制御

第3章では、2リンクマニピュレータを搭載した水中ロボットに対する、連続時間分解加速度制御法を提案し、実験によりその有用性を示した。本章では、一般にデジタルコンピュータがコントローラとして使用されることを考慮し、離散時間分解加速度制御法を提案する。まず、3次元空間で運動する n リンクマニピュレータを搭載した水中ロボットの数学モデルを導出するとともに、離散時間系の分解加速度制御法を提案する。つぎに、第3章で提案した外乱補償制御法は離散時間制御系にも簡単に適用可能であるため、ここでは、マニピュレータの可操作度を用いた特異姿勢回避の一方法を提案する。さらに、第3章で用いた水中ロボットによる基本制御法および特異姿勢回避法の適用実験により、離散時間制御法が第3章の連続時間制御法と同等の制御性能を有するとともに、特異姿勢回避法が有用であることを示す。

4.1 モデリング

本章で対象とする、 n リンクマニピュレータを搭載した水中ロボットのモデルをFig. 4.1に示す。

つぎに、本章で用いる仮定とおもな記号の多くは第2章および第3章で示しているが、ここでは n リンクマニピュレータを搭載した水中ロボットを対象としているので、改めて示す。

【仮定】

- A1. 各リンクはすべて剛体とする。
- A2. 各リンクの質量中心と付加質量中心は一致する。
- A3. 周囲の流体は静止しているものとする。
- A4. 重力と浮力はベースおよび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。

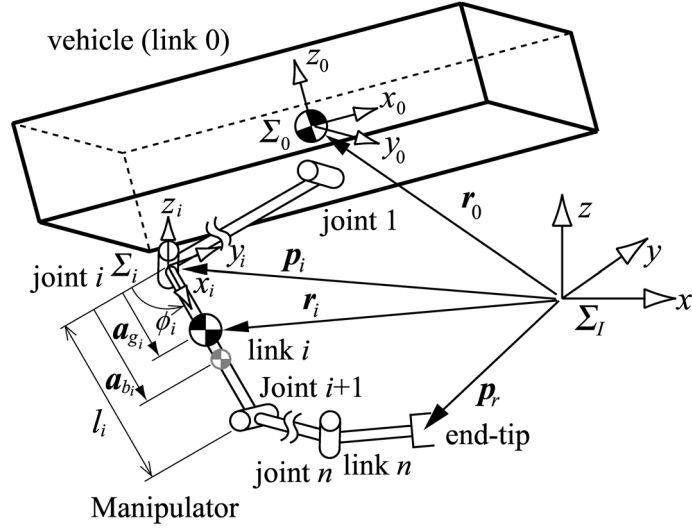


Fig. 4.1: n -link underwater robot model

【記号】

n : マニピュレータ関節数

Σ_I : 地上などに固定した基準座標系

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

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

iR_j : Σ_j から Σ_i への座標変換行列 ($\in \mathbf{R}^{3 \times 3}$)

r_0 : Σ_I に関する Σ_0 原点の位置ベクトル ($\in \mathbf{R}^{3 \times 1}$)

r_i : Σ_I に関するリンク i の質量中心位置ベクトル ($\in \mathbf{R}^{3 \times 1}$)

p_i : Σ_I に関する関節 i の位置ベクトル ($\in \mathbf{R}^{3 \times 1}$)

p_e : Σ_I に関するマニピュレータ手先位置ベクトル ($\in \mathbf{R}^{3 \times 1}$)

ψ_0 : Σ_I に関する Σ_0 のロール・ピッチ・ヨー角表現の姿勢ベクトル

ψ_e : Σ_I に関するマニピュレータ手先のロール・ピッチ・ヨー角表現の姿勢ベクトル

ω_i : Σ_I に関する Σ_i の角速度ベクトル

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

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

ϕ_i : 相対関節角度

ϕ : 関節角度ベクトル ($= [\phi_1, \dots, \phi_n]^T$)

ω_i : 関節角速度 ($= \dot{\phi}_i$)

ω_i : 関節 i の角速度ベクトル

\mathbf{x}_0 : 作業変数ベクトル ($= [\mathbf{r}_0^T, \boldsymbol{\psi}_0^T]^T$)

\mathbf{x}_e : 作業変数ベクトル ($= [\mathbf{p}_e^T, \boldsymbol{\psi}_e^T]^T$)

$\boldsymbol{\nu}_0$: 作業変数ベクトル ($= [\mathbf{v}_0^T, \boldsymbol{\omega}_0^T]^T$)

$\boldsymbol{\nu}_e$: 作業変数ベクトル ($= [\mathbf{v}_e^T, \boldsymbol{\omega}_e^T]^T$)

l_i : リンク i の長さ

a_{g_i} : 関節 i からリンク i の質量中心までの長さ

a_{b_i} : 関節 i からリンク i の浮心までの長さ

${}^i\mathbf{l}_i$: Σ_i に関する関節 $(i+1)$ の位置ベクトル ($= [l_i, 0, 0]^T$)

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

m_i : リンク i の質量

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

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

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

\mathbf{E}_j : j 次の単位行列

さて、運動学関係式は Fig. 4.1 の幾何学的関係より、式 (3.1) と同様にして、次式となる。

$$\boldsymbol{\nu}_e = \mathbf{A}\boldsymbol{\nu}_0 + \mathbf{B}\dot{\boldsymbol{\phi}} \quad (4.1)$$

ただし、

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

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

である。

つぎに、流体中で物体が運動することにより生じる付加質量と付加慣性モーメントを含んだ、水中ロボット質量中心の並進運動量 $\boldsymbol{\eta}$ およびベース質量中心まわりの角運動量 $\boldsymbol{\mu}$ に関する関係式も、式 (3.3) と同様の次式となる。

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\eta} \\ \boldsymbol{\mu} \end{bmatrix} = \mathbf{C}\boldsymbol{\nu}_0 + \mathbf{D}\dot{\boldsymbol{\phi}} \quad (4.2)$$

ただし,

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

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_{11} & \mathbf{d}_{12} & \cdots & \mathbf{d}_{1n} \\ \mathbf{d}_{21} & \mathbf{d}_{22} & \cdots & \mathbf{d}_{2n} \end{bmatrix}$$

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

$$\mathbf{d}_{2i} = \sum_{j=i}^n \left\{ \mathbf{I}_{T_j} \mathbf{k}_i + (\tilde{\mathbf{r}}_j - \tilde{\mathbf{r}}_0) \mathbf{M}_{T_j} \tilde{\mathbf{k}}_i (\mathbf{r}_j - \mathbf{p}_1) \right\}$$

である.

また, 漸化的ニュートン・オイラー法により, 運動方程式は次式となる.

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\dot{\boldsymbol{\zeta}} + \mathbf{N}(\mathbf{q}, \boldsymbol{\zeta})\boldsymbol{\zeta} + \mathbf{f} = \mathbf{u} \quad (4.3)$$

ただし, $\mathbf{q} = [\mathbf{x}_0^T, \boldsymbol{\phi}^T]^T$, $\boldsymbol{\zeta} = [\boldsymbol{\nu}_0^T, \dot{\boldsymbol{\phi}}^T]^T$ 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, $\mathbf{u} = [\mathbf{f}_0^T, \boldsymbol{\tau}_0^T, \boldsymbol{\tau}_m^T]^T$ は入力であり, \mathbf{f}_0 と $\boldsymbol{\tau}_0$ はベースの力とトルク, $\boldsymbol{\tau}_m$ はマニピュレータ関節トルクである.

なお, ベースおよびマニピュレータ手先の角速度ベクトル $\boldsymbol{\omega}_0$ および $\boldsymbol{\omega}_e$ はロール・ピッチ・ヨー角 $\boldsymbol{\psi}_0 = [\psi_{r_0}, \psi_{p_0}, \psi_{y_0}]^T$ および $\boldsymbol{\psi}_e = [\psi_{r_e}, \psi_{p_e}, \psi_{y_e}]^T$ を用いて

$$\boldsymbol{\omega}_* = \mathbf{S}_* \dot{\boldsymbol{\psi}}_* \quad (* = 0, e) \quad (4.4)$$

で表現できる. ただし,

$$\mathbf{S}_* = \begin{bmatrix} \cos \psi_{p_*} \cos \psi_{y_*} & -\sin \psi_{y_*} & 0 \\ \cos \psi_{p_*} \sin \psi_{y_*} & \cos \psi_{y_*} & 0 \\ \sin \psi_{p_*} & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

である. したがって, \mathbf{q} と $\boldsymbol{\zeta}$ の関係は

$$\boldsymbol{\zeta} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\psi_0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{E}_n \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} \quad (4.6)$$

となる. ただし,

$$\mathbf{S}_{\psi_0} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_3 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{S}_0 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

である.

4.2 制御系の構成

ここでは、Fig. 4.1 のロボットに対して、まず、ベースとマニピュレータ手先を同時に制御する、ディジタル型の分解加速度制御系の構成法を示す。また、マニピュレータの特異姿勢を回避する方法も示す。

4.2.1 離散時間分解加速度制御

まず、式 (4.1) と (4.2) を時間微分して整理すると次式を得る。

$$\mathbf{W}(t)\boldsymbol{\alpha}(t) = \boldsymbol{\beta}(t) + \mathbf{f}(t) - \dot{\mathbf{W}}(t)\mathbf{v}(t) \quad (4.8)$$

ただし、

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} + \mathbf{E}_6 & \mathbf{D} \\ \mathbf{A} & \mathbf{B} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\alpha} = \begin{bmatrix} \dot{\nu}_0 \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \dot{\nu}_0 \\ \dot{\nu}_e \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{s}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{v} = \begin{bmatrix} \nu_0 \\ \dot{\phi} \end{bmatrix}$$

である。

式 (4.8) 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、

$$\mathbf{W}(k)\boldsymbol{\alpha}(k-1) = \frac{1}{T} [\boldsymbol{\nu}(k) - \boldsymbol{\nu}(k-1) + T\mathbf{f}(k) - \{\mathbf{W}(k) - \mathbf{W}(k-1)\}\mathbf{v}(k)] \quad (4.9)$$

となる。ただし、 $\boldsymbol{\beta}(k)$ と $\dot{\mathbf{W}}(k)$ は後退差分近似しており、また、 $\boldsymbol{\nu} = [\nu_0^T, \nu_e^T]^T$ である。

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

$$\boldsymbol{\alpha}_d(k) = \frac{1}{T} \mathbf{W}^{-1}(k) [\boldsymbol{\nu}_d(k+1) - \boldsymbol{\nu}_d(k) + \boldsymbol{\Lambda}\mathbf{e}_\nu(k) + T\mathbf{f}(k)] \quad (4.10)$$

ただし、

$$\mathbf{e}_\nu(k) = \boldsymbol{\nu}_d(k) - \boldsymbol{\nu}(k) \quad (4.11)$$

であり、また、 $\boldsymbol{\nu}_d(k)$ は $\boldsymbol{\nu}(k)$ の目標値、 $\boldsymbol{\Lambda} = \text{diag}\{\lambda_i\}$ ($i = 1, \dots, 12$) は速度フィードバックゲイン行列である。

式 (4.9) と (4.10) より次式の誤差方程式を得る。

$$\begin{aligned} T\mathbf{W}(k)\mathbf{e}_\alpha(k-1) &= \mathbf{e}_\nu(k) - \mathbf{e}_\nu(k-1) + \boldsymbol{\Lambda}\mathbf{e}_\nu(k) \\ &\quad - T\{\mathbf{f}(k) - \mathbf{f}(k-1)\} + \{\mathbf{W}(k) - \mathbf{W}(k-1)\}\mathbf{v}(k) \end{aligned} \quad (4.12)$$

ただし、

$$\mathbf{e}_\alpha(k) = \boldsymbol{\alpha}_d(k) - \boldsymbol{\alpha}(k) \quad (4.13)$$

である．ここで，1 サンプル周期間において， $\mathbf{W}(k)$ と $\mathbf{f}(k)$ の変化が小さい，すなわち $\mathbf{W}(k) \approx \mathbf{W}(k-1)$ と $\mathbf{f}(k) \approx \mathbf{f}(k-1)$ を仮定すると，式 (4.12) は次式となる．

$$T\mathbf{W}(k+1)\mathbf{e}_\alpha(k) = \{(q-1)\mathbf{E}_{12} + \mathbf{A}\}\mathbf{e}_\nu(k) \quad (4.14)$$

ただし， q はシフト演算子である． $\mathbf{W}(k)$ 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 (4.14) 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， $\nu(k)$ の目標値 $\nu_d(k)$ を次式で定義する．

$$\nu_d(k) = \frac{\mathbf{S}_{0e}}{T} \{\mathbf{x}_d(k) - \mathbf{x}_d(k-1) + \mathbf{\Gamma}\mathbf{e}_x(k-1)\} \quad (4.15)$$

ただし，

$$\mathbf{e}_x(k) = \mathbf{x}_d(k) - \mathbf{x}(k) \quad (4.16)$$

で， $\mathbf{x}_d(k)$ は $\mathbf{x}(k) = [\mathbf{x}_0^T(k), \mathbf{x}_e^T(k)]^T$ の目標値，また，

$$\mathbf{S}_{0e} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\psi_0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{S}_{\psi_e} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{S}_{\psi_e} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_3 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{S}_e \end{bmatrix}$$

であり，さらに， $\mathbf{\Gamma} = \text{diag}\{\gamma_i\}$ ($i=1, \dots, 12$) は位置誤差フィードバックゲインである．

式 (4.11) と (4.15) より次式の誤差方程式を得る．

$$T\mathbf{e}_\nu(k) = \mathbf{S}_{0e} \{\mathbf{E}_{12} - (\mathbf{E}_{12} - \mathbf{\Gamma})q^{-1}\}\mathbf{e}_p(k) \quad (4.17)$$

ただし， $\nu(k)$ は後退差分近似している．式 (4.17) 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．

以上の制御系の構成を図示すると Fig. 4.2 となる．

4.2.2 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．一般のマニピュレータに対する分解加速度制御法の適用はマニピュレータが特異姿勢とならない範囲での作業に限定され，4.2.1 項の制御法も同様である．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

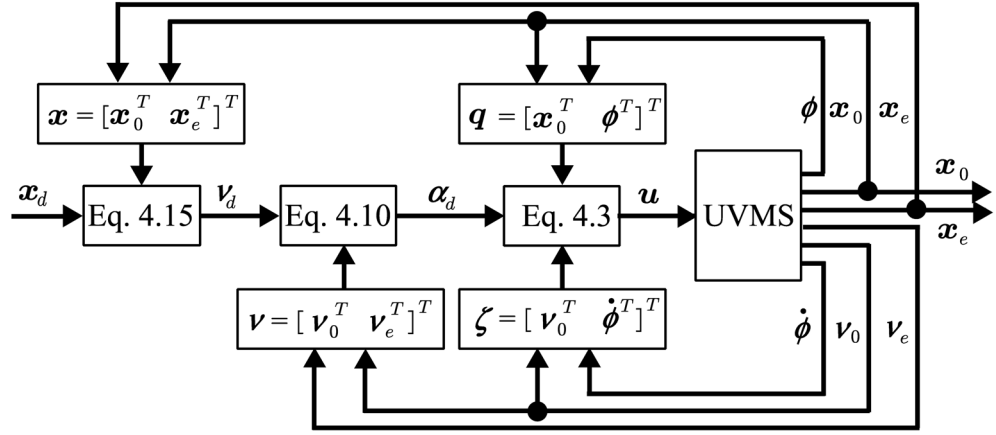


Fig. 4.2: Configuration of control system

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提案する．

マニピュレータのヤコビ行列 $\mathbf{J}(k)$ の行列式を $J(k) = \det \mathbf{J}(k)$ 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 より大きく小さ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．

$$\dot{\mathbf{v}}_{0_d}(k) = \begin{cases} \mathbf{v}_{e_d}(k) & (k_1 \leq k < k_1 + n_a) \\ \mathbf{0} & (\text{otherwise}) \\ -\mathbf{v}_{e_d}(k) & (k_2 \leq k < k_2 + n_a) \end{cases} \quad (4.18)$$

ただし， n_aT は加速時間である．

4.3 実験

ここでは，4.2節で構成した制御系の有用性を，第3章で用いた実験装置により検証する．

まず，デジタル型分解加速度制御法の基本性能を検証するため，特異姿勢を考慮しない制御実験（基礎制御実験）として，ベースの位置・姿勢を初期状態で保持する場合とベースも移動させる場合の2通りを行った．

実験条件はつぎの通りである．まず，マニピュレータ手先の目標軌道は，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とし，ターゲット位置はベースの位置・姿勢を初期状態で保持する場合は初期手先位置から x 方向に -0.60 [m]， z 方向に 0.15 [m]，また，ベースも移動させる場合は x 方向に -0.60 [m]， z 方向に -0.15 [m] に設定した．サンプリング周期は $T = 1/60$ [s] とし，ロボットの初期姿勢は $\phi_0 = -90$ [deg]， $\phi_1 = 60$ [deg]， $\phi_2 = -50$ [deg]，また，フィードバックゲイン Λ および Γ は

$$\Lambda = \text{diag}\{0.60, 0.60, 0.25, 0.25, 0.25\}$$

$$\Gamma = \text{diag}\{0.30, 0.30, 0.25, 0.25, 0.25\}$$

に設定した．さらに，ベースも移動させる場合のベースの目標軌道は初期位置から z 方向にのみ -0.25 [m] 移動させる直線軌道とした．

ベースの位置・姿勢を初期状態で保持する場合とベースも移動させる場合の実験結果を，それぞれ Fig. 4.3 と 4.4 に示す．Fig. 4.3 と 4.4 より，ベースの位置・姿勢を初期状態で保持する場合に対して，ベースも移動させる場合はベース移動中のマニピュレータ手先位置誤差が若干大きくなっているのが読み取れる．しかしながら，両者とも第 3 章の連続時間制御系の結果である Fig. 3.11 と同程度の制御性能が得られており，構成したデジタル型分解加速度制御系の有用性が確認できる．

つぎに，特異姿勢を考慮した制御系の実験を行った結果について示す．なお，基本的な実験条件は基礎制御実験と同じである．ただし，ベースの基本的な位置・姿勢は基礎制御実験のベースの位置・姿勢を初期状態で保持する場合と同じであるが，手先目標軌道は基礎制御実験のベースも移動させる場合に合わせている．したがって，ベースを移動させずにマニピュレータ手先の軌道追従を行わせた場合には特異姿勢となる条件である．そこで，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，可減速時間は $n_a = 60$ ，すなわち 1 [s] に設定した．

実験結果のロボットの挙動，手先位置誤差，ヤコビ行列の行列式 $J(k)$ の絶対値，ベース目標加速度およびベース位置・姿勢誤差を Fig. 4.5 に示す．図より，特異姿勢回避のためベースが移動している区間においてベース位置・姿勢誤差が若干大きくなり，それにともないマニピュレータ手先位置誤差も若干大きくなっているのが読み取れる．しかしながら，全般的な制御性能は基礎制御実験の結果である Fig. 4.3 および 4.4 と同様であり，提案した特異姿勢回避法の有用性が確認できる．

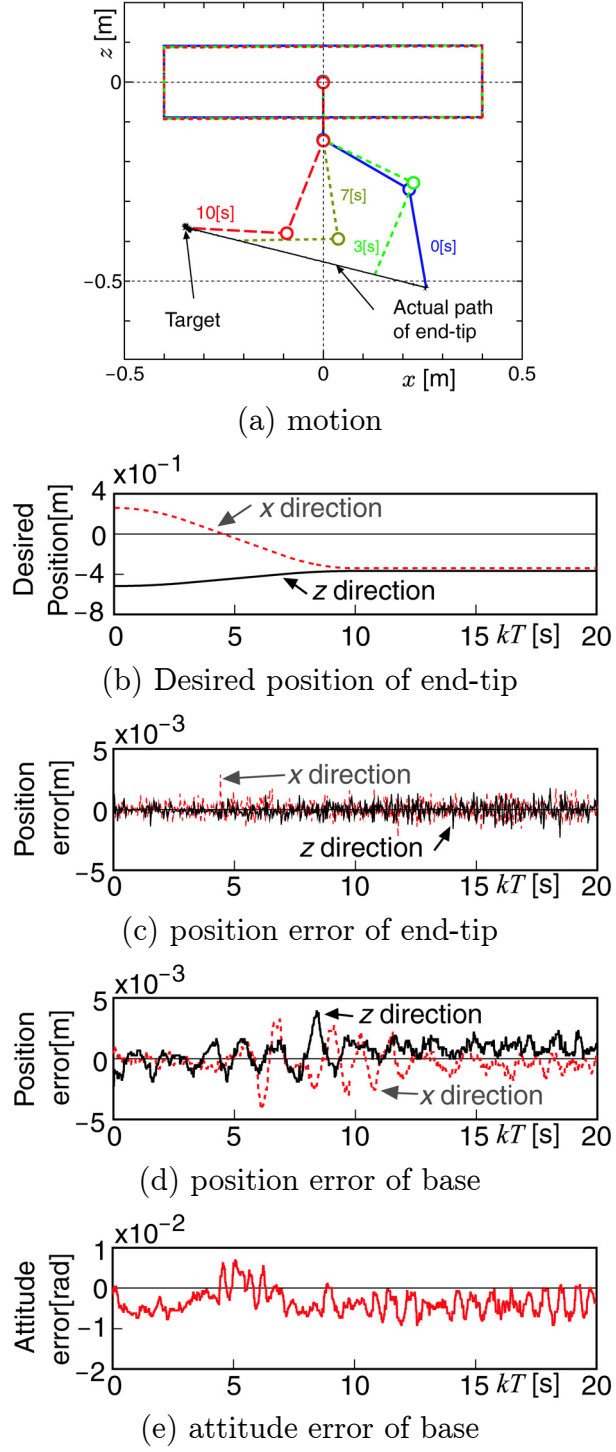


Fig. 4.3: Experimental result (1)

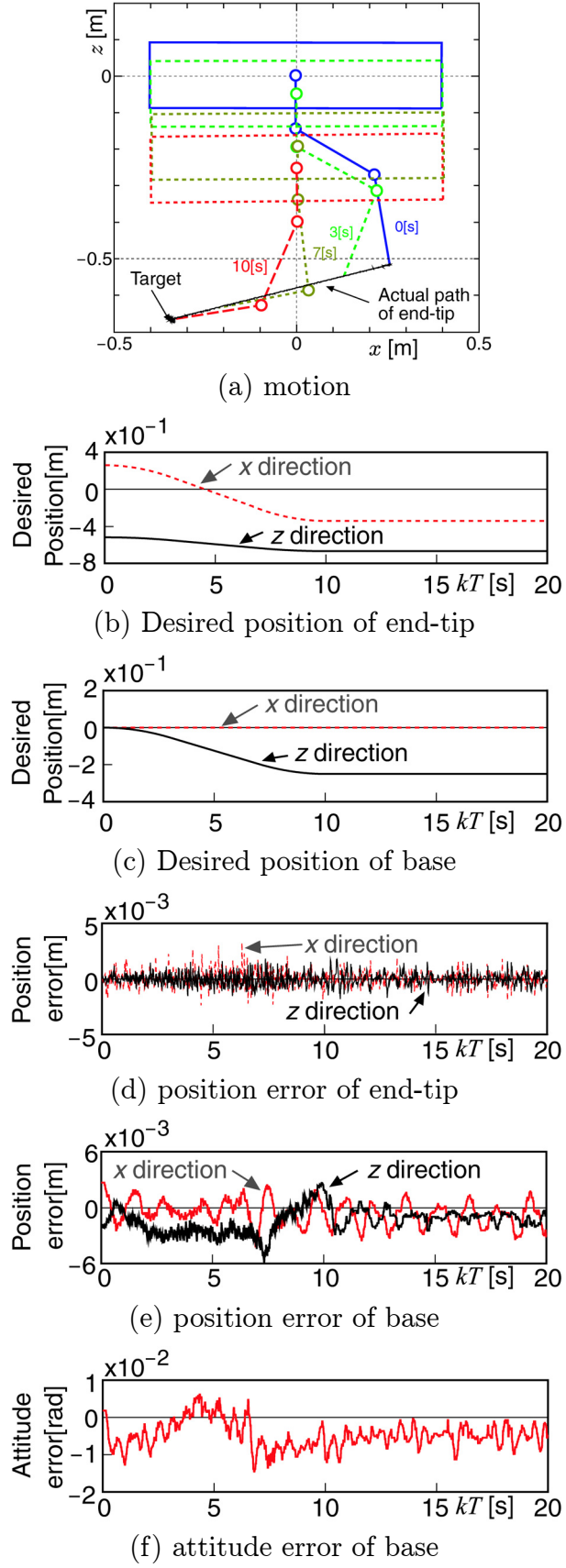
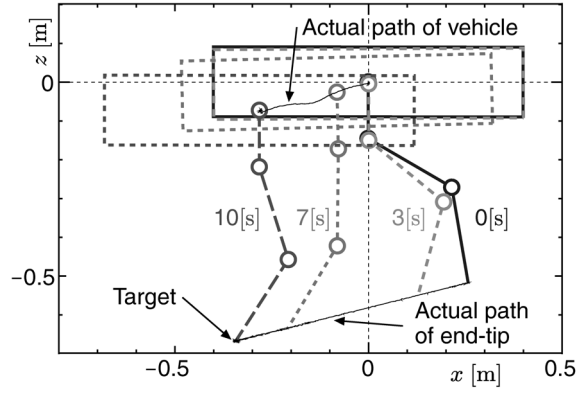
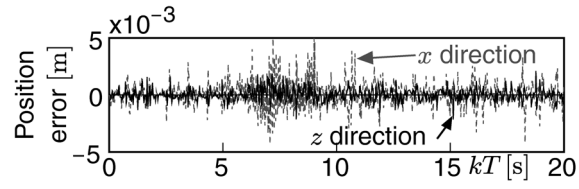


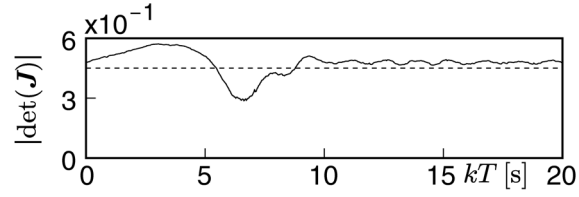
Fig. 4.4: Experimental result (2)



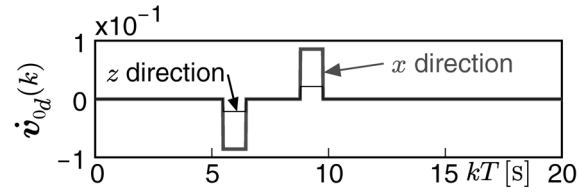
(a) motion



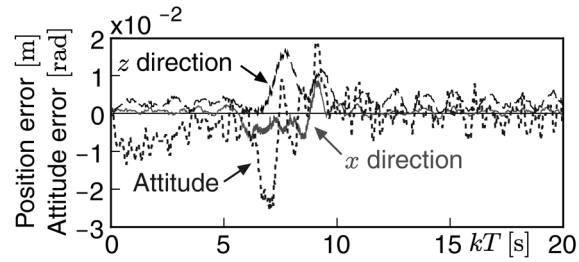
(b) position error of end-tip



(c) absolute value of $J(k)$



(d) desired linear acceleration of base



(e) position and attitude error of base

Fig. 4.5: Experimental result with singular configuration avoidance method

4.4 まとめ

本章では，3次元空間で運動する n リンクマニピュレータを搭載した水中ロボットの数学モデルを導出するとともに，離散時間分解加速度制御法を提案した．まず，3次元空間で運動する水中ロボットの数学モデルを導出し，つぎに，離散時間系の分解加速度制御法ならびに，マニピュレータの特異姿勢回避の方法を提案した．さらに，第3章で用いた水中ロボットによる制御実験により，提案制御法の有用性を示した．

第5章 結 論

本研究では、マニピュレータを搭載した自律型水中ロボットに対する、連続時間および離散時間分解加速度制御法を提案するとともに、これまでほとんど行われていなかった実験による検証を行った。以下では、本研究で得られた成果を要約するとともに、今後取り組むべき課題を挙げて結論とする。

第2章では、UVMSに対する分解加速度制御法の有用性確認の第一歩として、ロボットベースに推進機構が実装されておらず、かつ、重力・浮力の影響を受けない、水平2次元面内で運動する2リンクマニピュレータを搭載した水中ロボットを対象とした制御法の開発を行った。まず、分解加速度制御法開発に必要なとなるロボットベースとマニピュレータ手先の速度関係およびロボットベースに関する運動量を定式化するとともに、ロボットの運動方程式を導出した。つぎに、マニピュレータ手先位置のみを制御する分解加速度制御法を提案した。さらに、導出した運動方程式の妥当性をシミュレーションと開ループ実験との比較により示すとともに、制御実験により提案制御法の有用性を確認した。

第3章では、第2章で得られた結果に基づき、推進機構であるスラストをロボットベースに実装し、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に対する制御法を開発した。まず、ロボットに作用する流体抗力の3次元モデルおよび対象とする水中ロボットの数学モデルを導出した。つぎに、ロボットベースとマニピュレータ手先を同時に制御可能な分解加速度制御法を提案するとともに、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、外乱補償制御法を提案した。さらに、スラストのモデルを実験により求めるとともに、分解加速度制御法および外乱補償制御法の実験を行い、提案制御法の有用性を確認した。

第4章では、一般にディジタルコンピュータがコントローラとして使用されることを考慮し、離散時間系の分解加速度制御法を開発した。まず、3次元空間で運動する n リンクマニピュレータを搭載した水中ロボットの数学モデルを導出するとともに、離散時間分解加速度制御法を提案した。つぎに、第3章で提案した外乱補償制御法は離散時間制御系にも簡単に適用可能であるため、ここでは、マニピュレー

タの特異姿勢を回避する一方法を提案した．さらに，第3章で用いた水中ロボットを用いた離散時間分解加速度制御法および特異姿勢回避法の適用実験を行い，離散時間制御法が第3章の連続時間制御法と同等の制御性能を有するとともに，特異姿勢回避法が有用であることを確認した．

以上より，マニピュレータを搭載した水中ロボットに対して，本論文で提案した連続時間および離散時間分解加速度制御法の有用性を実験的に確認した．

今後は，より実用的な環境を想定し，次のような課題に対する制御法開発および実験的検証を行っていく必要がある．

(1) 周囲流体に流れがある場合

実環境ではほとんどの場合流体は静止していない．そのため，水中ロボットの運動量方程式ならびに運動方程式において，速度に関する項に流体速度を付加した分解加速度制御法の有用性検証，または流れを考慮した新たな制御法開発が必要である．

(2) マニピュレータ手先による物体操作に伴う外部とのインタラクション

マニピュレータが外部との接触を持つ作業を行う際には，外部の壁や構造物，物体などから反力・反モーメントを受け，水中ロボットでは，その外力によりロボットベースが移動する．したがって，マニピュレータ手先の位置・力制御法開発が必要である．そのためには，ベース搭載のスラストによる反力の相殺やマニピュレータの冗長性利用，また，操作対象と自身を破壊しないような力制御やインピーダンス制御法などの開発が望まれる．

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りました九州工業大学工学部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、有益なご助言と熱心なご討論をいただきました九州工業大学工学部小林敏弘教授ならびに芹川聖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、適切なご指導をいただきました九州工業大学工学部相良慎一助教授に心よりの感謝をいたします。また、本研究の共同研究者として何かとお世話になりました元加藤研究室修了生の望月寛己君、相良研究室修了生の谷川竹司君、山田真五君、壇上孝博君、ならびに現在博士後期課程1年の矢藤孝君に心よりの感謝をいたします。さらに、平成13年にご逝去された加藤了三先生（元九州工業大学工学部教授）には、生前に私を社会人学生として受け入れてくださることを快承していただき、加えて懇切なご指導とご鞭撻を賜りました。ここに謹んで感謝と哀悼の意を表します。特に加藤先生亡き後、ご指導に腐心してくださいました相良慎一助教授にはあらためて感謝とお礼を申し上げます。また、遠方のためなかなか来室できない私に対して何かと細かい点でお手伝いをしてくださった相良研究室の卒業生と現役学生の皆様に心よりお礼申し上げます。神奈川工科大学在学時の恩師で恩人でもあり、本学での社会人学生としてのきっかけも与えてくださいました、現電気通信大学共同研究センター副センター長の田口幹助教授に心よりの感謝をいたします。また、私が以前勤務していた石川島播磨重工業株式会社において社会人学生を希望するにあたり、業務以外の事であるにもかかわらず私の意を汲んでくださり骨をおってくださいました和栗利春課長（当時）と榊原茂典部長（当時）に深く感謝いたします。最後に、永きに渡り社会人と学生という二足の草鞋の生活をしている私に対して常に暖かい目で応援をしてくださいました両親に感謝いたします。そして、結婚してから現在に至るまで気苦労ばかりかけている私に常に叱咤激励で応援してくれた妻の奈巳と娘・優妃に心からの感謝とお礼を捧げる次第です。

平成19年1月

田村 正和

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] 山本 欣市, 柿倉 正義 (編著) : “極限作業ロボット”, 工業調査会, 1992.
- [5] T. I. Fossen : *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley & Sons, 1995.
- [6] G. Antonelli : *Underwater Robots*, Springer, 2003.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 吉川 恒夫 : ロボット制御基礎論, コロナ社, 1988.

- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] J. Yuh (ed.) : *Underwater Robotic Vehicles: Design and Control*, TSI Press, 1995.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] T. R. Kane, P. W. Likens and D. A. Levinson : “Spacecraft Dynamics”, McGraw-Hill Inc., 1983.

- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] N. Sarkar and T. K. Podder : “Coordinated Motion Planning and Control of Autonomous Underwater Vehicle-Manipulator Systems Subject to Drag Optimization”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 26, No. 2, pp. 228 – 239, 2001.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.

- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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ティ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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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第 73 巻 726 号 C 編 (掲載決定), 8 ページ, 2007.
- [42] 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.

- [43] 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.
- [44] 元良 誠三 (監修) : 船体と海洋構造物の運動学, 成山堂書店, 1982.
- [45] J. N. Newman : *Marine Hydrodynamics*, The MIT Press, 1977.
- [46] 文献 [6], pp. 17 – 20.
- [47] 日本機械学会編 : 機械工学便覧 A3 力学・機械力学, 丸善, pp. 131 – 132, 1986.
- [48] 文献 [5], pp. 431 – 452.
- [49] 文献 [5], pp. 94 – 97.
- [50] 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.