

## 精度と安定性の両立を目的とした力制御

藤木, 拓人

<https://hdl.handle.net/2324/6787599>

---

出版情報 : Kyushu University, 2022, 博士 (工学), 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :



博士論文

精度と安定性の両立を目的とした力制御

藤木 拓人

機械工学専攻

# 目次

<b>第1章 序論</b>	<b>3</b>
1.1 研究の背景・目的	3
1.2 柔らかさを実現する制御	4
1.2.1 ハードウェアによる柔らかさの実現	4
1.2.2 ソフトウェアによる柔らかさの実現	5
1.3 本研究の目的と目標	8
1.4 研究の概要	8
<b>第2章 力制御の組み合わせによる応答周波数の変化</b>	<b>9</b>
2.1 緒言	9
2.2 直列接続型力制御の制御構造の提案	10
2.2.1 一自由度系におけるダイナミクス	10
2.2.2 直接的力制御	11
2.2.3 インピーダンス制御	11
2.2.4 アドミッタンス制御	13
2.2.5 力制御の組み合わせ	14
2.2.6 アドミッタンス・インピーダンス制御	15
2.3 一自由度系でのシミュレーション	16
2.3.1 シミュレーション条件	16
2.3.2 シミュレーション結果	19
2.3.3 シミュレーション結果に対する考察	22
2.4 一自由度実験機における応答性に関する実験	25
2.4.1 実験装置および実験条件	27
2.4.2 一自由度実験結果および考察	31
2.5 一自由度系での安定解析	34
2.5.1 制御対象および比較する各力制御則の説明	34
2.5.2 インパルス応答に対する理論的解析	37
2.5.3 バネによる外力を受ける系における伝達関数	40
2.5.4 周波数応答	43
2.6 結言	47

<b>第3章 異方剛性設計によるタスクへの適応</b>	<b>53</b>
3.1 緒言	53
3.2 二次元におけるアドミッタンスインピーダンス制御	54
3.2.1 二次元におけるインピーダンス制御およびアドミッタンス制御	54
3.2.2 二次元におけるアドミッタンス・インピーダンス制御	56
3.3 シミュレーションでのなぞりタスクの実行	57
3.3.1 ダイナミクス	57
3.3.2 シミュレーション条件	58
3.3.3 異方剛性の設定	59
3.3.4 二次元シミュレーション結果および考察	61
3.4 結言	65
<b>第4章 まとめと今後の展望</b>	<b>66</b>
4.1 まとめ	66
4.2 今後の課題	67
<b>謝辞</b>	<b>69</b>
<b>参考文献</b>	<b>70</b>

# 目 次

2.1	インピーダンス制御のブロック線図 . . . . .	12
2.2	インピーダンス制御を含む制御系全体のブロック線図 . . . . .	12
2.3	アドミッタンス制御のブロック線図 . . . . .	13
2.4	アドミッタンス制御および位置制御器ならびに制御対象を含むブロック線図	13
2.5	提案するアドミッタンス・インピーダンス制御および制御対象を含むブロッ ク線図 . . . . .	16
2.6	制御対象の概略図 . . . . .	17
2.7	低剛性環境 ( $k_e = 10$ ) における制御対象の応答 . . . . .	20
2.8	中剛性環境 ( $k_e = 300$ ) における制御対象の応答 . . . . .	20
2.9	高剛性環境 ( $k_e = 3200$ ) における制御対象の応答 . . . . .	21
2.10	アドミッタンス制御およびインピーダンス制御とアドミッタンス・インピー ダンス制御の関係を示すブロック線図 . . . . .	26
2.11	一自由度の実験機の画像 . . . . .	29
2.12	一自由度の実験機の概略図 . . . . .	29
2.13	制御対象の変位の時間変化 . . . . .	33
2.14	制御対象に作用する力の時間変化 . . . . .	33
2.15	一自由度系へのバネによる外力を想定した場合のブロック線図 . . . . .	40
2.16	環境剛性が低剛性 ( $k_e = 10$ ) の場合の各制御則のナイキスト線図 . . . . .	48
2.17	環境剛性が中剛性 ( $k_e = 300$ ) の場合の各制御則のナイキスト線図 . . . . .	48
2.18	環境剛性が高剛性 ( $k_e = 3200$ ) の場合の各制御則のナイキスト線図 . . . . .	49
2.19	環境剛性が低剛性 ( $k_e = 10$ ) の場合のアドミッタンス・インピーダンス制御 のナイキスト線図 (1) . . . . .	49

2.20	環境剛性が中剛性 ( $k_e = 300$ ) の場合のアドミッタンス・インピーダンス制御のナイキスト線図 (1)	50
2.21	環境剛性が高剛性 ( $k_e = 3200$ ) の場合のアドミッタンス・インピーダンス制御のナイキスト線図 (1)	50
2.22	環境剛性が低剛性 ( $k_e = 10$ ) の場合のアドミッタンス・インピーダンス制御のナイキスト線図 (2)	51
2.23	環境剛性が中剛性 ( $k_e = 300$ ) の場合のアドミッタンス・インピーダンス制御のナイキスト線図 (2)	51
2.24	環境剛性が高剛性 ( $k_e = 3200$ ) の場合のアドミッタンス・インピーダンス制御のナイキスト線図 (2)	52
3.1	二次元モデルにおけるインピーダンス制御のブロック線図	54
3.2	二次元モデルにおけるアドミッタンス制御のブロック線図	55
3.3	二次元モデルにおけるアドミッタンス・インピーダンス制御のブロック線図	56
3.4	二次元モデルの概略図	58
3.5	剛性楕円の概念および目標軌道の概略図	60
3.6	手先の $x$ 方向の時間変化	62
3.7	手先の $z$ 方向の時間変化	63
3.8	各制御則の力応答の時間変化	64

# 表 目 次

2.1 シミュレーションにおける各制御則の機械特性値 . . . . .	18
2.2 提案手法のシミュレーションにおける最適パラメータ . . . . .	25
2.3 実験における各制御則での機械特性値 . . . . .	30
2.4 バネによる外力が作用する系での伝達関数 . . . . .	42
2.5 ナイキスト線図における各制御則の機械特性 . . . . .	43

# 第1章

## 序論

### 1.1 研究の背景・目的

自動車産業から食品産業まで、さまざまな分野で作業の自動化・ロボット化が進んでいる [1],[2]. 自動車の組み立てや溶接など従来では人が行っていた作業が機械やロボットに代わっていき、生産効率の向上や人件費などのコストダウン、長時間の作業等に貢献している。その一方で、現在のロボットの技術では達成できない配線の接続や細かい梱包などの複雑な作業では、人による労働力が必要であるのが現状である。工場で稼働するロボットは、生産性の向上のために高速かつ単純作業を繰り返すように設計されており、自動車の組み立てや溶接といった大きな駆動力がいる作業に伴ってロボットも大型のものが用いられる。さらに、工場内では、ロボットは高重量かつ高速で稼働しており、人との接触に対する安全性の確保のために安全柵が導入されている。また、食品業界では、製造工程の大半をロボットが行っているが、柔らかい食品の把持や盛り付けは人が行っている。これは、ロボットの把持部への入力設計が難しく、柔らかいものを壊さずに把持する技術が確立されていないためである。アイリスオーヤマのつくば工場では、産業用ロボットや無人搬送機を導入することで工場の自動化を行っている。つくば工場ではおもに LED 照明を生産しており、製造から出荷までの工程を自動化している。工場での実質的な作業員は約 50 名程度であり、一つのラインに一人の作業員がいれば稼働可能である。LED 照明は重量も大きくなく複雑な配線等はないため、工場の自動化に向いている。また、ダイヘンでは自立搬送台車を開発しており、工場の自動化に貢献している。工場内の障害物等の情報をもとに、最適経路を作成することで物資を目的地まで搬送するものである。リフト機能も備わっており、重量物を作業台に移す人にとっては高負荷な作業も実現することができ、人の労働力に代わる労働力として貢献している。このように、工場の自動化に関する

様々な取り組みがなされる中で、完全な自動化を考えた際の課題としては、現在の技術では実現可能なタスクが限られており、多品種生産に向かないという点である。現状の工場ラインでは、配線や組み立て作業には人が介在する形で作業が行われており、作業の切り分けが行われている。また、産業用ロボットの分野では、ロボットが高速・高重量で移動するため、人とロボットの間に安全策を施すことで事故を回避している。これに対して、人とロボットが近くで作業することができたら、単純作業を繰り返すロボットの調整が簡単になり、ロボットの作業の異変にも素早く気づくことができ、不良品の生産やラインを止めることがなくなり、生産効率の向上が見込める。このように、人とロボットが近くで作業できることによるメリットを考え、人とロボットが協調作業できる人協働ロボットが開発されている [3][4]。人協働ロボットに求められる機能としては、構造的な安全性と接触を検知する機構が挙げられる。また、動作時には常にロボットを監視する必要があり、カメラを用いる場合には環境の整備が必要でコストがかかってしまう。さらに、接触を検知した場合には、ロボットを強制的に停止させる必要があり、停止させることによる生産効率の低下が考えられる。これまで様々な協働ロボットが開発されてきたが、工場に導入されたものは多くない。生産効率を保ちつつ、より使いやすい協働ロボットを考えた際に、「接触しても停止する必要がない」ロボットを作成することで解決できると考えられる。そのために考えられることとして、接触した場合に「柔らかい動き」を実現することで、人やものと接触した際にも安全性が保障されると考えられる。この「柔らかい動き」を常に実行できる人協働ロボットの研究および開発が進められることで、安全柵を用いる必要がなくなり、コストダウンにもつながる。さらに、人とロボットが近くで作業することで、これまで判明していなかった人の作業技術が、ロボットによって実現可能であったという発見も期待できる。

## 1.2 柔らかさを実現する制御

### 1.2.1 ハードウェアによる柔らかさの実現

前節で述べたように、人協働ロボットを一般的な工場に導入するにあたって必要なこととして、接触に対する安全性が考えられる。柔らかさとして代表的なものは、ソフトロボ

ティクスのような構造的に柔らかい構造を持つロボットの開発である。接触時の安全性だけでなく、柔らかいワークを扱うために、高分子材料と空気圧を利用して柔らかいエンドエフェクタを作動させる研究が行われている [5][6][7]。ロボット自体を柔らかくすることで、特定のタスクに特化したロボットを作成することができ、人ではできないような動作を実現することもできる。さらに、高分子材料を用いることで軽量かつ安価に作成できるため、大きな駆動力が必要ではなく、モータなどの金属を用いたアクチュエータではなく人工筋肉や空気圧アクチュエータといった軽量のアクチュエータを用いることができる。Rendaらは、柔らかい素材を用いてタコの足を模したソフトロボットを開発し、屈曲や特定の長さへのリーチング動作などの複雑な動作を可能にする運動学モデルを提案している [8]。Giannacciniらは、把持物の形状に追従するケーブル駆動のソフトグripperを開発し、様々な対象物に適用できる可能性を示した [9]。これらは、ある特定の対象物をある程度の精度で把持する目的で設計されており、産業分野での細かな作業における精度についての議論は行われていない。また、その柔らかさ故にエンドエフェクタの開閉しにくいものも多く、正確な制御は難しい。

### 1.2.2 ソフトウェアによる柔らかさの実現

前項でハードウェアによる柔らかさについて述べたが、制御設計というソフトウェアの観点からの柔らかさについての研究がなされている。柔らかい制御を実現する制御則を構築した場合には、エンドエフェクタの位置や速度だけでなく、その接触力をロバストにかつ安全に制御することができる。また、既存のグripperを用いる場合でも、その把持力を精密に制御できれば柔らかいワークを扱う場合にも有効である。具体的に接触時(衝突、把持含む)について考えると、接触における力を制御することで安全性を確保できると考えられる。力を制御することを考えた場合には、力制御が代表的なものとしてあげられる。力制御の分野では、これまで直接的力制御、インピーダンス制御、アドミッタンス制御など、様々なタイプの力制御器が提案されている [10][11]。しかし、これらの力制御器を産業分野で一般的な用途に使用するためには、ロバスト性、安定性、精度の面でまだ改善の余地がある。このような従来之力制御の中で、アドミッタンス制御やインピーダンス制御は、未知の物体を傷つけることなく安定に取り扱うことを実現できる可能性があるた

め、広く研究されている [12][13][14].

インピーダンス制御は、1985年に Hogan によって提案された力制御であり、制御の面において機械的な要素を取り入れた研究である [15]. 一般的にインピーダンス制御は入力された加速度、速度、エンドエフェクタの変位に応じた所望の機械的インピーダンスパラメータに基づいて、エンドエフェクタの出力としての力を制御する. 一方で、アドミッタンス制御は、1987年に Kosuge らによって提案された力制御であり、「位置制御ベースインピーダンス制御」として発表された [16]. 一般的にアドミッタンス制御は力センサで検出された接触力に応じて、エンドエフェクタの位置、速度、加速度を所望の機械的アドミッタンスパラメータで制御する. インピーダンス制御では、マニピュレータ自身のダイナミクスが所望の機械的特性を実現するための外乱の一つとなるため、計算トルク法などの非線形補償が用いられることが多い. しかし、摩擦などのモデル誤差により、制御精度が低下しやすい [17, 18]. また、エンドエフェクタの変位と速度が入力であるため、その変位と速度が発生しない場合には力が発生しない. すなわち、特異点回避とバックドライバビリティが重要になる. 一方で、アドミッタンス制御では、剛体との接触などで力センサが急激に大きな力を検出した場合、接触力に基づいて導出した所望の位置・速度が発散してしまう可能性がある. このような場合、マニピュレータの挙動は不安定になる. また、入力が接触力であるため、コントローラは力センサで検出された力に対してのみ反応し、力センサで検出できない接触力には反応できない. 力センサが使用できない場合、外乱オブザーバで外力を推定することは有効な方法の一つであるが、正確なモデルが必要である. 一般に、硬い環境との接触ではアドミッタンス制御よりインピーダンス制御の方が比較的安定で、柔らかい環境との接触ではアドミッタンス制御の方が比較的正確だと言われている. しかし、接触環境が未知で物理的、幾何学的に変化しやすい場合、どちらを使うか事前に決めることは難しく、どちらかの方法で所望の機械特性を実現することは困難である.

この課題に対し Ott らはアドミッタンス制御とインピーダンス制御を並列に組み合わせ、環境に応じて切り替えながら使用可能な周波数帯域を広げる並列型の力制御を提案している [24]. Ott らは一自由度のシミュレーションを通して剛性の変化する環境への適応的な力制御を提案しており、安定性の議論および多軸のマニピュレータの複数関節を用いて

の実機検証を行っている。しかし、2つの制御器を高速に切り替える必要があるため、入力が不連続になり、不安定になる可能性があり、環境や求める機械特性によっては、必ずしも有効であるとは言えない。力制御と位置制御の組み合わせとして、Anderson は力/位置ハイブリッド制御とインピーダンス制御を組み合わせたハイブリッドインピーダンス制御を提案し、二次元シミュレーションでペグインホールを成功させた [25]。この制御では、ハイブリッド制御における位置制御と力制御の部分空間の区別と、インピーダンス制御における機械的特性を利用している。また、力制御部分空間と位置制御部分空間を使い分けるために、選択行列を用いている。しかし、主にハイブリッドコントローラにおけるインピーダンスと入力加速度の設計に焦点を当て、動作中のプロキシの望ましい軌道を設計する方法については記述していない。

環境の剛性が既知の状態であれば、Ott らの提案した並列型力制御が有効であると考えられるが、スイッチングによる不安定化を考慮した場合には、人協働ロボットへの導入は困難であると考えられる。しかし、Ott らの提案した「力制御の組み合わせ」を用いることで剛性が変化する環境への適応性が高まったことは確かである。アドミッタンス制御とインピーダンス制御の持つそれぞれの利点を活かすことができる力制御を確立することができれば、人協働ロボットの工場への導入障壁を取り払うことができ、より効率的に作業を行うことができる可能性がある。さらに、工場の自動化にとどまらず、学術分野における貢献も見込める。学術分野では力制御の研究が広く行われているが、速度と力の関係を基にしたアドミッタンス制御とインピーダンス制御が主に用いられている。本研究で提案する力制御はアドミッタンス制御とインピーダンス制御を直列に接続した「直列接続型力制御」である。この直列接続型力制御を提案することで、力制御についての研究をさらに活発化させることができる。制御構造としてはアドミッタンス制御とインピーダンス制御を直列に接続するといった簡易なものとなっており、設計パラメータもアドミッタンス制御およびインピーダンス制御よりも多くあるため、様々なタスクに対しての適応性および自由度がある。アドミッタンス制御は「速度(または位置)制御ができるモータを用いて力制御を実現したい」という発想のもと用いられているため、位置制御器に「トルク制御」であるインピーダンス制御を用いたことが高い新規性を持つと考えられる。そのため、ア

ドミッタンス制御とインピーダンス制御の両方の利点を実現できる可能性があるとして、学術分野に大きく貢献できると考えられる。

### 1.3 本研究の目的と目標

前項で「ソフトウェアによる柔らかさの実現」について、力制御を組み合わせることで人とロボットの共同作業における安全性を確保することができることについて述べた。本研究では、制御対象が外部から力を受けた場合に危険な振動を起こさないような制御器設計を目標とし、以下の項目について述べる。

1. 基礎研究としてバネによる外力の作用する環境で、従来の力制御 (アドミッタンス制御, インピーダンス制御) で振動的になる場合でも振動が軽減されるような力制御を提案する。
2. 実機への導入を想定して、力センサの遅れやモータの制限のかかるような系での制御則比較を基に、実機でのロバスト性について示す。
3. 異方剛性の利用による、複数の方向に対しての追従性および安定性を持つ力制御であることを示す。

### 1.4 研究の概要

本研究では、位置精度と安定性を兼ね備える力制御の提案を行う。第二章では一般的な力制御の例としてインピーダンス制御およびアドミッタンス制御について触れ、制御則や制御構造に触れることで提案するアドミッタンス・インピーダンス制御の新規性および有用性について、一自由度のシミュレーションおよび実験を通して示す。第三章はアドミッタンス・インピーダンス制御の持つ設計パラメータの多さをもとに、異方剛性を実現することで、接触面に押し付けながら面をなぞる「なぞりタスク」をもとに制御則の有用性を示す。第四章はまとめと今後の展望となる。

## 第2章

# 力制御の組み合わせによる応答周波数の変化

### 2.1 緒言

第一章で述べたように、複数の力制御を組み合わせることにより実行可能なタスクが増加する。アドミッタンス制御は位置制御ベースの力制御であるため高い軌道追従性を持っている一方で、突発的な力の入力による仮想物体の振動的な挙動に対して、高ゲインな位置制御器の影響で実際の制御対象が過度に追従することにより不安定化してしまう。インピーダンス制御は力制御ベースの力制御であるため設計者の意図する力応答を実現することが可能である一方で、力制御特有の摩擦による制御精度の低下への対策としての計算トルク法といったダイナミクスの補償が必要であり、モデル化誤差による制御そのものへの影響を排除することができない。そのため、それぞれの力制御はタスクに応じて選択的に使用するのが理想であり、接触する環境が柔らかい場合にはアドミッタンス制御を、硬い場合にはインピーダンス制御を使用するのが望ましい。また、接触安定性を重視する場合と軌道追従性を重視する場合には、機械アドミッタンスや機械インピーダンスといった設計者の設定するパラメータを適切な値に調整する必要がある。しかし、ロボットのタスク実行中に不意の衝突による急激な接触力の変化や、一つのタスクの中で複数の剛性のワークとの接触が予想される場合には、単一の力制御を用いることを考えると、その制御則のメリットを最大限に発揮することができない。高い位置精度を求めてアドミッタンス制御を使用する際に硬いワークとの接触がある場合には、アドミッタンス制御の持つ仮想ダイナミクスが発散し、制御対象であるロボット自体も不安定化してしまう。また、硬いワークとの接触を考慮してインピーダンス制御を用いた場合には、理想の機械インピーダ

ンスを持つ物体としてのふるまいを実現するために、精度の高いモデル補償と摩擦補償が必要であり、制御するロボットの構造が代わった場合には再度モデル化をする必要がある。これらの問題について、解決すべき要因として以下の二点があげられる。

1. 接触する環境の剛性変化に対するロバスト性
2. 制御対象のモデル化誤差や摩擦などの外的要因のモデル化の精度に対するロバスト性

上記の二点を解決する力制御を提案することで、柔剛様々なワークに対してどのようなロボットでも安定かつ高精度な動きを実現することができる。本章ではこの二点の解決のために、アドミッタンス制御とインピーダンス制御を直列に接続した「アドミッタンス・インピーダンス制御」を提案し、アドミッタンス制御とインピーダンス制御の持つ利点をどちらも実現可能な制御則の確立を目指す。

## 2.2 直列接続型力制御の制御構造の提案

### 2.2.1 一自由度系におけるダイナミクス

本章では制御則の直感的な理解のために一自由度系での議論を行う。実際の産業分野において、制御対象はシリアルリンクおよびパラレルリンクのロボットであり、制御対象が複数の自由度を持つことによって様々なタスクの実行が可能になる。しかし、構造が複雑になることでダイナミクスは複雑になり、正確なモデリングが困難な非線形性が発生してしまう。そのため、まずは一自由度での制御則の議論を行うことで、制御対象の非線形性を排除し問題を簡略化する。本章で用いる一自由度系のダイナミクスを式(2.1)で示す。

$$m\ddot{x} = F + F_{\text{ext}} + F_f \quad (2.1)$$

ここで、 $m$  は制御対象の質量であり、 $x$  は制御対象の位置、 $F$  は制御対象への入力、 $F_f$  は系に作用する摩擦力であり、 $F_{\text{ext}}$  は系に作用する外力である。本研究では、力制御を行っている間は系の質量は変化しないと定数として扱っている。また、摩擦力についてはクーロン摩擦および粘性摩擦を仮定している。

## 2.2.2 直接的力制御

力制御には、力センサにより力を計測して目標とする力に近づける通常の力制御と、速度と力を用いて力を制御する力制御がある。直接力をフィードバックする力制御は式(2.2)のように目標とする力と系に作用する外力の差をもとに入力を決定するものである。

$$F = F_d + K_f(F_d - F_{\text{ext}}) \quad (2.2)$$

通常の力制御は入力が力であるため力センサを備えている必要があり、センサのダイナミクスによる時間遅れや、力センサ自体の精度などに制御精度が左右されてしまう。また、入力を力のみとする場合には、力センサが破損してしまった場合には入力が発散してしまい、ロボットが不安定な挙動をしてしまう可能性がある。このような問題を踏まえて、実機投入を考えた力制御として速度と力を用いた力制御が研究されており、インピーダンス制御やアドミッタンス制御などがある[15][16]。インピーダンス制御は力制御ベースの力制御と呼ばれており、位置および速度の偏差に対して設計者の意図した目標の慣性、粘性、剛性といった機械特性に基づいて力を出力する。アドミッタンス制御は位置制御ベースの力制御と呼ばれており、設計者の意図した機械特性を持つ仮想的な物体を仮定し、その動きに対して位置制御で追従するというものである。直接力をフィードバックする力制御と異なり、目標となる力に対してダイナミクスを介して応答することで、機械的な知識を基に制御系を設計することができ、接触時の安定性を保証することや軌道追従性を高めるといったタスクに応じた多様な設計を行うことができる。また、インピーダンス制御については出力が力になるため、力センサが破損した場合にも制御対象が急激に変化することはなく、実機での力制御を考えた場合には有用である。

## 2.2.3 インピーダンス制御

本項では、速度と力を用いた力制御であるインピーダンス制御について詳しく述べる。インピーダンス制御とは入力が速度(位置)であり、出力が力である力制御である。図2.1、図2.2にインピーダンス制御のブロック線図、制御対象を含むシステム全体のブロック線図を示す。図2.1において、 $x, x_0$ は制御対象の現在位置と目標位置(目標イ

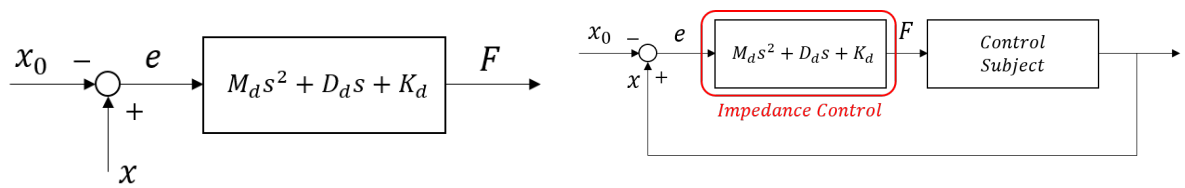


図 2.2: インピーダンス制御を含む制御系全

図 2.1: インピーダンス制御のブロック線図 体のブロック線図

ンピーダンスの平衡点) を表している. 現在位置と目標位置の差をもとに力を生成して操作対象に入力する. また, インピーダンス制御は目標とする機械インピーダンスを決定することにより, 決定したダイナミクスを持つ系と等しい動きを実現するものである. 式 (2.3) のように目標インピーダンスを決定した場合, ロボットは設定した慣性と粘性と弾性を持つバネマスダンパと等しい動きをする.

$$M_d(\ddot{x} - \ddot{x}_0) + D_d(\dot{x} - \dot{x}_0) + K_d(x - x_0) = F_{\text{ext}} \quad (2.3)$$

ここで,  $M_d, D_d, K_d$  は, 設計者の決定する慣性, 粘性, 弾性であり,  $x, x_0$  は制御対象の現在位置と目標位置,  $F_{\text{ext}}$  は系に作用する外力である. 式 (2.3) のような目標運動をロボットが実現するためには, 式 (2.1), (2.3) より, 入力として式 (2.4) のような入力が必要になる.

$$\begin{aligned} F &= m\ddot{x} - F_{\text{ext}} - F_f \\ &= m\ddot{x} - \{M_d(\ddot{x} - \ddot{x}_0) + D_d(\dot{x} - \dot{x}_0) + K_d(x - x_0)\} - F_f \end{aligned} \quad (2.4)$$

インピーダンス制御は一般的に, 高剛性環境との接触に対して安定であることが知られている. 目標のインピーダンスを変化させることで, 現在位置と目標位置の偏差に対して柔らかな応答を得ることができる. しかし, 式 (2.4) から分かるように, 摩擦力  $F_f$  のモデリングは困難であり入力としての力  $F$  が実現したい目標インピーダンスを実現する力に達しない問題が生じる. また, インピーダンス制御の入力は速度 (位置) であるため, 速度 (位置) の変化がない場合には目標インピーダンスに応じた力を出力することができない. さらに現在位置と目標位置の偏差が生じていた際にも, 入力よりも静止摩擦力の方が大きくなってしまい目標位置に到達できないことがある. これは, 目標の機械インピーダンスを大きくすることによって対処可能であるが, 目標の機械インピーダンスを大きくすると入力が大きくなり, インピーダンス制御の特徴である柔らかい応答を得られないとい

う問題が生じてしまう。また、実機投入を考えた際には加速度のフィードバックは実現的でなく、 $\ddot{x}$ の項を排除するために  $M_d = m$  となるように目標粘性を設計する場合に、制御対象の実際の質量を正しく見積もる必要があり、複雑な系の場合にはモデル化誤差が制御精度に影響を及ぼしてしまう。

## 2.2.4 アドミッタンス制御

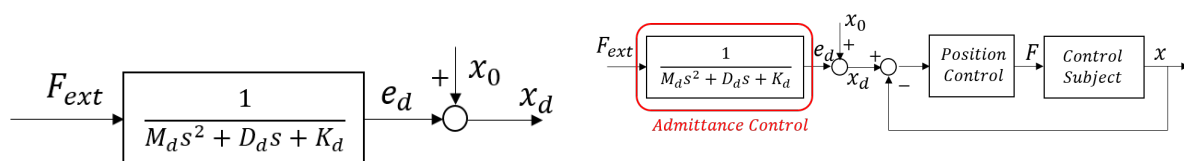


図 2.3: アドミッタンス制御のブロック線図

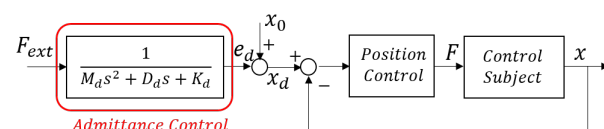


図 2.4: アドミッタンス制御および位置制御器ならびに制御対象を含むブロック線図

本項では、速度と力の関係を用いる力制御であるアドミッタンス制御について述べる。アドミッタンス制御とは入力力が力であり、出力が速度 (位置) である力制御のことである。図 2.3, 2.4 にアドミッタンス制御のブロック線図と制御対象を含む全体のシステムのブロック線図を示す。図 2.3 において、入力である  $F_{\text{ext}}$  は系に作用する外力を表しており、出力である  $e_d$  は  $e_d = x_d - x_0$  を満たす値である。入力力が力であるため、前提として制御対象には力センサが取り付けられていると仮定する。アドミッタンス制御では、力センサにより得られた力をもとに式 (2.5) のような仮想的な物体の運動を考える。

$$M_d(\ddot{x}_d - \ddot{x}_0) + D_d(\dot{x}_d - \dot{x}_0) + K_d(x_d - x_0) = F_{\text{ext}} \quad (2.5)$$

$$F = k_p(x_d - x) - k_v \dot{x} \quad (2.6)$$

式 (2.5) において、 $M_d, D_d, K_d$  は設計者の決定する仮想的な物体の慣性、粘性、剛性である。また、 $x_d, x_0$  は仮想物体位置と平衡点であり、 $F_{\text{ext}}$  は系に作用する外力である。アドミッタンス制御は出力が速度 (位置) であるため、図 2.4 のように位置制御器が付随することが多い。位置制御器の一例を式 (2.6) に示す。 $k_p, k_v$  は位置に対するゲインと速度に対するゲインである。アドミッタンス制御では取り付けられた力センサから力を取得したのち、仮想物体のダイナミクスに外力が作用した際の速度 (位置) を求める。その後、求め

た仮想物体位置に追従するように位置制御器を用いて力に変換し、制御対象に入力するといった流れで制御を行っている。アドミッタンス制御の特徴としては、一般的には、外部との接触がない場合、もしくは低剛性環境との接触に関しては位置および速度の追従精度が高いことがある。一方で、高剛性環境との接触時に不安定な挙動を示すことや、力センサの測定可能な力以外の力がロボットに作用した場合、そのままロボットが動き続けてしまい危険であることなどのデメリットがある。

## 2.2.5 力制御の組み合わせ

前項までにインピーダンス制御とアドミッタンス制御のメリット、デメリットについて述べた。インピーダンス制御は高剛性環境に対して精度が良く、アドミッタンス制御は低剛性環境との接触に対して精度が良い。一方で、インピーダンス制御は低剛性環境において、摩擦の影響によって精度が低下、アドミッタンス制御は高剛性環境との接触時に振動的になってしまうという問題がある。理想的な制御器は、低剛性環境との接触に関してはアドミッタンス制御のように高精度で、高剛性環境との接触に関してはインピーダンス制御の応答をするような制御器である。しかし、どちらか一方の制御則のみ適用する場合、剛性が変化する環境に対してはベストのパフォーマンスを実現することは困難である。そこで、両制御則を組み合わせることを考える。組み合わせることにより剛性の変化する環境において、環境剛性に優位な制御を用いることで単一で使う場合よりも高い精度を実現することができる。

アドミッタンス制御とインピーダンス制御を組み合わせた制御として、Ottらはスイッチングにより制御則を切り替える手法を提案している [24]。位置制御器を含むアドミッタンス制御とインピーダンス制御を並列に配置し、スイッチング周期を決定して周期的に制御則を切り替えている。また、どちらの制御則をより用いるかを duty 比  $n$  を用いることにより決定している。Ottらが提案した手法により、段階的に剛性が変化している環境に対して、従来の単一でアドミッタンス制御およびインピーダンス制御を用いる場合よりも高精度の応答を得ることに成功している。しかし、スイッチングを用いていることにより、実機への導入を考えた際に不安定になる可能性がある。また、duty 比  $n$  についても、環境の剛性がどのように変化するか既知であるとして決定しているため、環境の剛性の変

化が未知である場合の適応性に欠けるという問題点がある。

また、Anderson らは力制御と位置制御を組み合わせたハイブリッド制御とインピーダンス制御を組み合わせたハイブリッドインピーダンス制御という制御則を提案している [25]。ハイブリッド制御は、シリアルリンクロボットのような複数の自由度を持つ制御対象に対して用いる制御であり、作業空間での目標とする力および位置をともに実現するためにどの自由度を用いるかを選択行列  $S$  を用いることで決定し「押し付けながら動かす」といった作業を可能にする制御則である。このハイブリッド制御に対して、環境と制御対象であるロボットの間の変位に着目し、バネマスダンパといった機械的なインピーダンスのモデルを導入することで、インピーダンス制御と位置制御を実現する自由度を選択行列を用いて決定するハイブリッドインピーダンス制御を提案している。Anderson らはこのハイブリッドインピーダンス制御を用いて、シミュレーションでのペグインホールを実現しており、力と位置の精度の両立を達成している。しかし、選択行列  $S$  の要素が明示的に示されておらず、タスクの目標軌道としても接触時の力を考慮したものではないため、力と位置の目標値をともに実現するために、選択行列の選定に制約が生じてしまうという問題点がある。

以上の先行研究より、スイッチングを用いることなく接触する環境の剛性変化に対するロバスト性を実現する制御器設計が必要であることと、接触時の力に対しても無理のない運動を実現することによる安全性の確保が必要であると考えられる。また、実際の産業用ロボットの現場への導入を考えた場合には、ユーザーフレンドリーな制御則である方が広く普及可能であるため、パラメータの調整をできるだけ最小限にできる制御則が好ましいと考えられる。

## 2.2.6 アドミッタンス・インピーダンス制御

前項で述べた力制御と位置制御の組み合わせおよび力制御同士の組み合わせを考えた場合、Ott らの提案したアドミッタンス制御とインピーダンス制御を並列に接続する力制御と同じように、アドミッタンス制御とインピーダンス制御を直列に接続する力制御への着想に至り、本研究では図 2.5 に示すような直列接続型の力制御則を提案する。以後、アドミッタンス・インピーダンス制御と呼称する。提案するアドミッタンス・インピーダンス

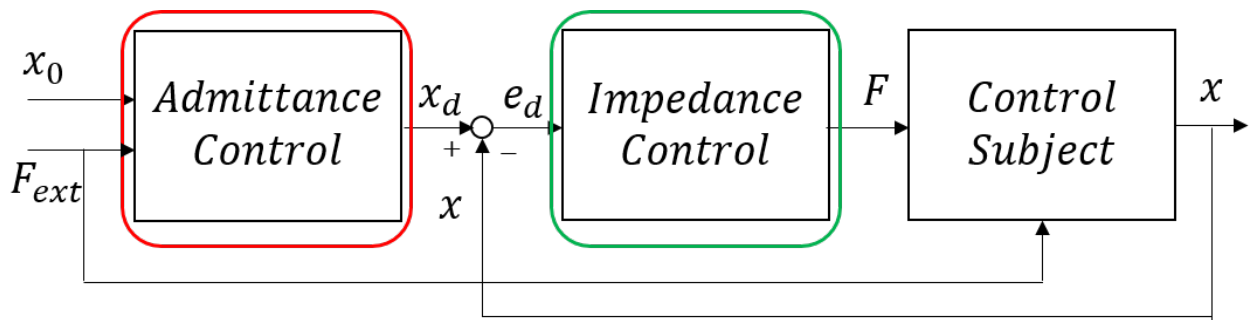


図 2.5: 提案するアドミッタンス・インピーダンス制御および制御対象を含むブロック線図

制御の特徴としては、図 2.5 に示すように、アドミッタンス制御とインピーダンス制御を直列に配置するものである。制御の流れとしては目標軌道  $x_0$  と系に作用する外力  $F_{ext}$  から仮想物体位置を算出し、仮想物体位置と現在位置との差をもとにしてインピーダンス制御の出力を決定するというものである。アドミッタンス・インピーダンス制御の特徴としては、Ott らの研究 [24] と異なり、アドミッタンス制御とインピーダンス制御を直列に用いることでスイッチングを回避しているという点である。これにより、実機に導入することを考えた際に不安定を回避できる可能性がある。また、直列に配置することによって、高剛性環境下でのアドミッタンス制御の振動的な応答をインピーダンス制御が吸収することによって、全体として安定で高精度な制御を行うことができる。低剛性環境においては、インピーダンス制御のみでは摩擦に負けてしまい目標値に到達できないのに対して、提案手法は目標値に対しての偏差が生じる場合にも力を検出することができるため、仮想物体位置を更新することによって目標値に到達することができる。

## 2.3 一自由度系でのシミュレーション

### 2.3.1 シミュレーション条件

本項では提案するアドミッタンス・インピーダンス制御の精度検証のために一自由度の系についてシミュレーションを行った。シミュレーションの条件に関しては Ott らの用いたものを参考に決定している [24]。Ott らの研究では一自由度の系に対して、アドミッタンス制御とインピーダンス制御を並列に接続した制御則を用いており、環境剛性に応じた duty 比  $n$  を用いてスイッチングを行っていた。その際に、 $n$  の値は環境剛性の変化が

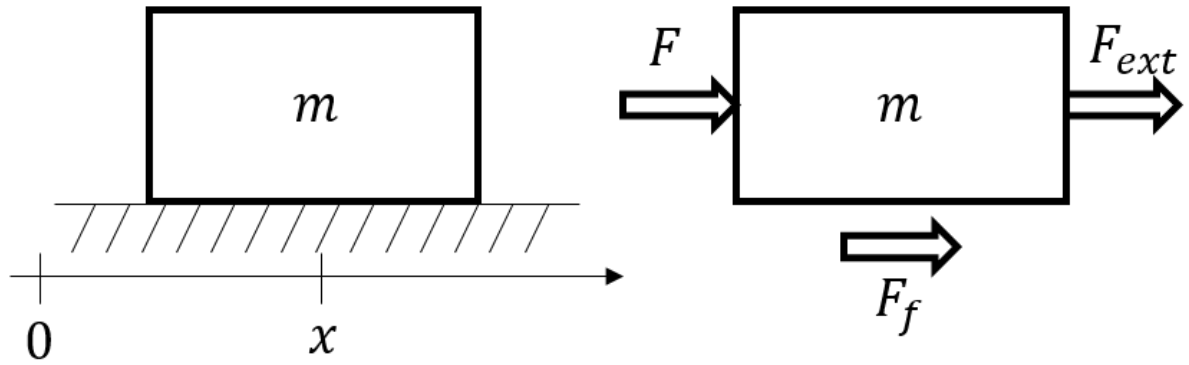


図 2.6: 制御対象の概略図

既知であるとして設計されており、環境剛性が低い場合にはアドミッタンス制御を、環境剛性が高い場合にはインピーダンス制御をより長い時間使用するように設計されていた。しかし、産業分野で使用するロボットを考えた場合には、金属同士の硬い環境との接触タスクでは安定性を保障するためにインピーダンス制御を前提として設計されるが、作業中の人との接触を考えた場合には柔らかい応答を目指すのがよいと考えられる。そこで、本項で行うシミュレーションでは、低剛性～高剛性までの環境変化に対して、目標とする機械特性を変化させることなく適応可能であることを示す。図 2.6 に本研究で用いる制御対象である一自由度系を示す。図 2.6 において、 $m$  は制御対象の質量、 $F, F_{\text{ext}}, F_f$  は制御対象への入力、系に作用する外力、摩擦力である。また、物体の位置の初期値を 0 であるとして、 $x$  で表している。図 2.6 より、制御対象のダイナミクスは式 (2.7) のようになる。

$$m\ddot{x} = F + F_{\text{ext}} + F_f \quad (2.7)$$

$$F_{\text{ext}} = -k_e(x - x_0) \quad (2.8)$$

$$F_f = -\text{sign}(\dot{x})(c_v|\dot{x}| + F_c) \quad (2.9)$$

本研究では、制御対象に作用する外力は式 (2.8) のようにバネにより与えられるものとしている。よって、式 (2.8), (2.9) において、 $k_e$  は系に作用する外力としてのばねのばね定数 (環境剛性の基準値)、 $c_v$  は粘性係数、 $F_c$  はクーロン摩擦、 $x_0$  は目標値 (平衡点) である。また、本研究では、制御対象に直接入力を与えられるとしており、外力によりモーメントは発生しないとしている。

次に、シミュレーションに用いる各制御則の入力を以下の式 (2.10)~(2.14) に示す。

- Impedance Control

$$F = \left( \frac{m}{M_d} - 1 \right) F_{\text{ext}} + m\ddot{x}_0 - \frac{m}{M_d}(D_d\dot{e} + K_d e) \quad (2.10)$$

- Admittance Control

$$M_d(\ddot{x}_d - \ddot{x}_0) + D_d(\dot{x}_d - \dot{x}_0) + K_d(x - x_0) = F_{\text{ext}} \quad (2.11)$$

$$F = k_p(x_d - x) - k_v\dot{x} \quad (2.12)$$

- Admittance Impedance Control

$$M_{d,a}\ddot{x}_d + D_{d,a}(\dot{x}_d - \dot{x}_0) + K_{d,a}(x_d - x_0) = F_{\text{ext}} \quad (2.13)$$

$$F = \left( \frac{m}{M_{d,i}} - 1 \right) F_{\text{ext}} + m\ddot{x}_d - \frac{m}{M_{d,i}}(D_{d,i}\dot{\hat{e}}_d + K_{d,i}\hat{e}_d) \quad (2.14)$$

表 2.1: シミュレーションにおける各制御則の機械特性値

Parameter		Value	Parameter		Value
Impedance Control	$m$	0.8	Proposed Control	$m$	0.8
	$M_d$	1.0		$M_{d,a}$	1.0
	$K_d$	50 or 100 or 200		$K_{d,a}$	50 or 100 or 200
	$D_d$	$2\zeta\sqrt{K_d M_d}$		$D_{d,a}$	$2\zeta\sqrt{K_{d,a} M_{d,a}}$
Admittance Control	$m$	0.8	$M_{d,i}$	1.0	
	$M_d$	1.0	$K_{d,i}$	$5 \times 10^3$ or $10^4$ or $2 \times 10^4$	
	$K_d$	50 or 100 or 200	$D_{d,i}$	$2\zeta\sqrt{K_{d,i} M_{d,i}}$	
	$D_d$	$2\zeta\sqrt{K_d M_d}$	$F_c$	3.0	
	$k_p$	$10^6$	$c_v$	1.0	
	$k_v$	$2\zeta\sqrt{k_p m}$	$\zeta$	0.7	

式 (2.10) , (2.14) における  $e, \hat{e}_d$  は  $e = x - x_0, \hat{e}_d = x - x_d$  を満たすものである。また、各制御則におけるパラメータを表 2.1 に示す。ここで、表 2.1 において減衰比  $\zeta$  を 0.7 にしているが、これは Ott らの研究 [24] で用いられている値を用いている。減衰比  $\zeta = 1.0$  の

場合には、系は臨界減衰を示し、 $\zeta = 1/\sqrt{2}$  の場合には系の整定時間が最小になる。そのため、系の応答性を高めるために $\zeta = 1/\sqrt{2} \approx 0.7$ を使用する。表 2.1 から分かるように、提案手法はアドミッタンス制御よりも位置制御器にあたるインピーダンス制御の機械特性を低くしている。アドミッタンス制御において位置制御器のゲインは、目標となる仮想物体の運動に近づくためには大きくする必要がある。しかし、位置制御器のゲインを大きくすると、ロボットが硬い物体に接触した際に仮想物体が振動し、その動きにロボットが追従することで不安定な挙動をしてしまうという問題点がある。そこで、提案するアドミッタンス・インピーダンス制御では環境との接触時に起きる振動を防ぐために、位置制御器として用いるインピーダンス制御の目標粘性および目標剛性を低くするとともに、目標の慣性を導入することで位相の遅れを補償することで精度の確保を行うことを考えた。

### 2.3.2 シミュレーション結果

本研究では、剛性を変化させる手法として制御対象に作用する外力のばね定数である  $k_e$  を変化させる。高剛性、中剛性、低剛性の実現にあたって、Ott らの研究と同様に  $k_e = 3200, 300, 10$  の三通りにおいて制御対象の挙動を比較した。ロボットの初期値を  $x(0) = 0.1$  として、目標位置を  $x_0 = 0$  とした。シミュレーション開始時には、制御対象には目標位置に引っ張られるような外力が作用し、振動しながら目標位置に向かうことになる。また、本研究における参照軌道として、式 (2.15) を満たすような軌道  $x_{\text{ref}}$  を用いる。

$$M_d \ddot{x}_{\text{ref}} + D_d \dot{x}_{\text{ref}} + K_d (x_{\text{ref}} - x_0) = -k_e (x_{\text{ref}} - x_0) \quad (2.15)$$

図 2.7~2.9 に、環境剛性を  $k_e = 10 \sim 3200$  まで変化させた際の系の軌道を示す。シミュレーションでは実機での運用を考慮して、得られる力情報に  $T_d = 2.0[\text{ms}]$  の時間遅れを導入している。図 2.7~2.9 から分かるように提案するアドミッタンス・インピーダンス制御は従来のアドミッタンス・インピーダンス制御よりも精度が高いことが分かる。

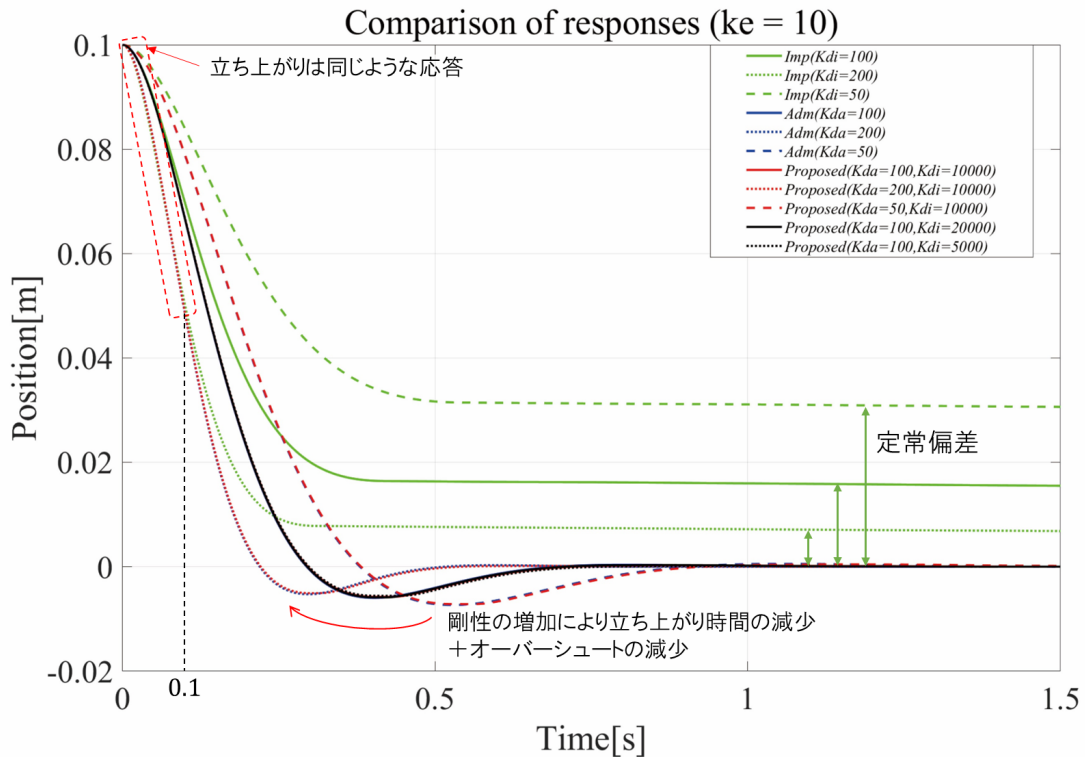


図 2.7: 低剛性環境 ( $k_e = 10$ ) における制御対象の応答

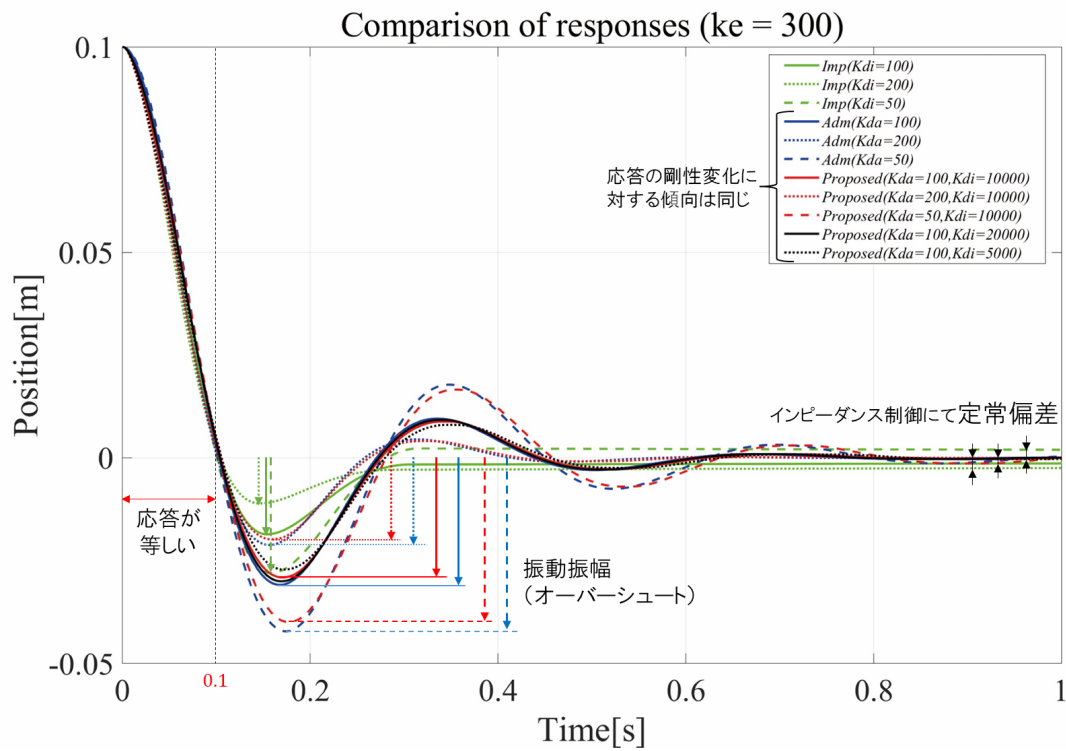


図 2.8: 中剛性環境 ( $k_e = 300$ ) における制御対象の応答

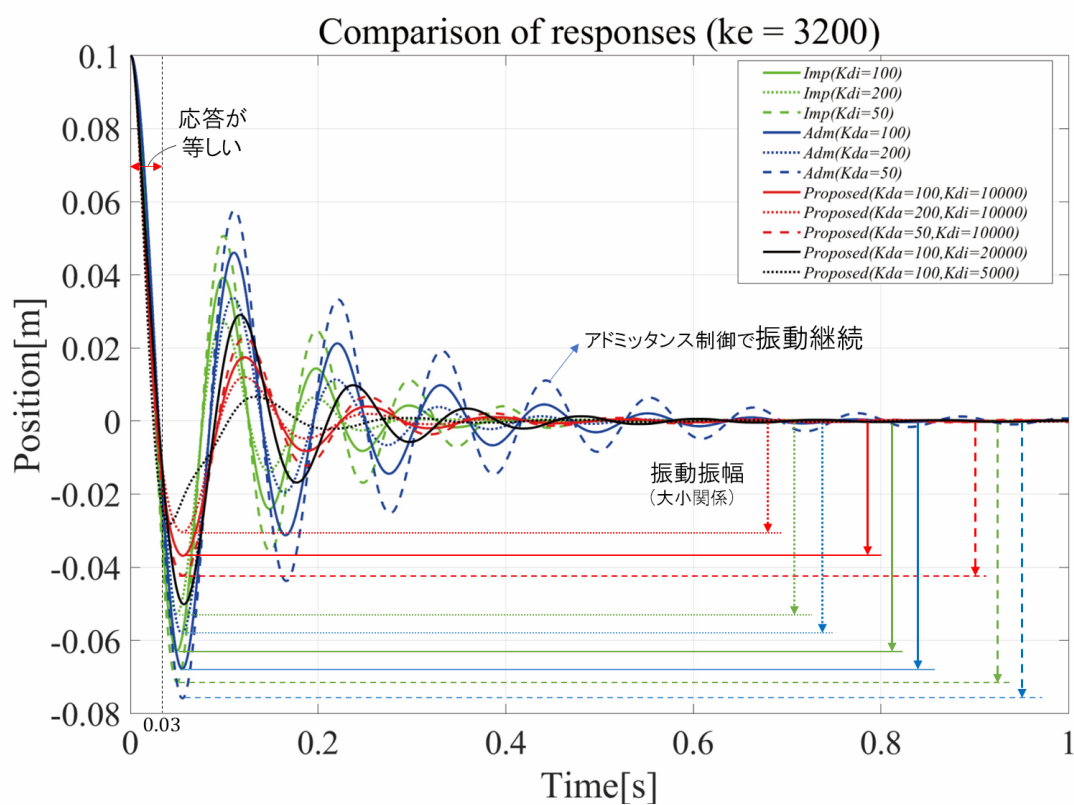


図 2.9: 高剛性環境 ( $k_e = 3200$ ) における制御対象の応答

### 2.3.3 シミュレーション結果に対する考察

本項では前項のシミュレーション結果に対する考察を行う。

- 低剛性環境 ( $k_e = 10$ ) での応答

図 2.7 から分かるように、インピーダンス制御は目標剛性 ( $K_{d,i}$ ) が大きくなるほど、平衡点 ( $x = 0$ ) との差が小さくなり偏差が減少している。これは、インピーダンス制御の機械特性が位置および速度に対するフィードバックゲインになっているため、 $K_{d,i}$  の増加に伴い位置精度が向上しているためである。また、偏差が減少するとともに立ち上がり時間が減少しており、制御対象の目標位置 (平衡点) への応答の速さの向上も確認できる。しかし、目標剛性を  $K_{d,i} = 200$  に増加させた場合でも、定常偏差が残っている。これは、インピーダンス制御の出力が力であることに起因しており、系に作用する摩擦により本来出力されるべき力  $F$  が減少しているためである。アドミッタンス制御および提案手法 (アドミッタンス・インピーダンス制御) における目標剛性が  $K_{d,a} = 200$  の場合の応答と比較した時、 $t=0.1[s]$  までは、三つの制御則はほぼ同じ応答を示している (図 2.7 点線参照) ことも、摩擦によるインピーダンス制御の偏差の発生を裏付けることができる。インピーダンス制御の目標剛性 ( $K_{d,i}$ ) の変化に対する応答の傾向から、目標剛性を大きくすることによって偏差が減少するのが分かるが、剛性を増加させることによって本来実現したい柔らかさが失われてしまうため望ましくない。次に、アドミッタンス制御と提案手法において、アドミッタンス側の目標剛性 ( $K_{d,a}$ ) が等しい場合には、インピーダンス側の目標剛性 ( $K_{d,i}$ ) を  $10^4$  のオーダーで変化させた場合にも応答がほぼ等しいことが分かる。これは、提案手法のインピーダンス側の目標剛性が十分に大きく、アドミッタンス制御の位置制御器と同じ役割を果たしているためである。アドミッタンス制御は目標とする仮想物体の動きを実現するため、位置制御器を高ゲインに設定するが、硬い環境との接触による過大な反力の影響で仮想物体が振動的になり制御対象が不安定化してしまう。しかし、低剛性環境との接触においては仮想物体が振動的になる可能性が低いいため、提案手法がアドミッタンス制御と等しい応答をすることは、高い位置精度を実現するためには望ましいことである。また、アドミッタンス制御および提案手法のアドミッタンス側の目標剛性が増加することによってオーバーシュートが減少し、立ち上がり時間が減少した理由としては、本項のシミュレーションでは目標粘性と目標剛性の関係を表 2.1 に示すよう

な  $D_{d,a} = 2\zeta\sqrt{K_{d,a}M_{d,a}}$  としているため、剛性の増加が立ち上がり時間の減少だけでなくオーバーシュートの減少にも貢献するためである。

- 中剛性環境 ( $k_e = 300$ ) での応答

図 2.8 から分かるように、三つの制御則の目標剛性 ( $K_{d,i}, K_{d,a}$ ) が等しい場合 (図 2.8 における実線, 破線, 点線同士を比較), 振動振幅としてはインピーダンス制御が最も小さい。これは、アドミッタンス制御における位置制御器および提案手法におけるインピーダンス制御が振動する仮想物体位置に追従するのに対して、インピーダンス制御単体の場合には摩擦により振動振幅自体が減少したためであると考えられる。振動軽減という観点では望ましい結果であるが、本来インピーダンス制御で実現したい目標の機械特性 ( $M_{d,i}, D_{d,i}, K_{d,i}$ ) を実現する入力としての力  $F$  は出力できていない。また、インピーダンス制御において、目標剛性を増加させた場合にも、定常偏差が残っている。これは、平衡点付近では式 (2.8) で表される外力としてのバネ力が減少し、制御対象に作用する入力としての力  $F$  と系に作用する力  $F_{\text{ext}}$  と摩擦力  $F_f$  が釣り合うことで平衡点まで到達できないことが原因であると考えられる。一方で、アドミッタンス制御と提案手法は、低剛性環境での結果同様、同一目標剛性における応答がほぼ等しくなっている。また、インピーダンス制御と比較した際に、アドミッタンス制御および提案手法では振動振幅が大きくなっている。これは、式 (2.12), (2.14) で示される位置制御器およびインピーダンス制御が高ゲインであるため、インピーダンス制御で確認された摩擦による影響が無視されたことで振動が軽減されなかったためであると考えられる。振動振幅が大きいことは、実際の作業現場で用いる際には望ましくないことであるが、式 (2.11), (2.13) で表される仮想物体の動きを実現できていることに関しては望ましい結果である。また、インピーダンス制御では問題となった摩擦による定常偏差に対して、アドミッタンス制御および提案手法では多少の振動はあるものの、定常偏差なく平衡点に収束できている。さらに、目標剛性を増加させることで振動振幅を軽減することができるため、定常偏差と振動軽減を両立することができる。

- 高剛性環境 ( $k_e = 3200$ ) での応答

図 2.9 から分かるように、三つの制御則の目標剛性 ( $K_{d,i}, K_{d,a}$ ) が等しい場合 (図 2.8 における実線、破線、点線同士を比較)、振動振幅としては提案手法が最も小さい。これは、提案手法において、低剛性および中剛性環境では振動する仮想物体に対して、位置制御器としてのインピーダンス制御が高精度で追従したことにより制御対象が振動的な応答を示したのに対して、高剛性環境では制御対象に作用する外力が大きくなることで、式 (2.13) で表される仮想物体の速度  $x_d$  が大きくなり、式 (2.14) で表されるインピーダンス制御の目標剛性および粘性 ( $K_{d,i}, D_{d,i}$ ) が位置制御器に用いる高いゲインと比較して柔らかさを実現する値になったからであると考えられる。低剛性および中剛性環境では仮想物体の動きに追従させることを優先させ、アドミッタンス制御と同じような動きを実現するような高い目標剛性および粘性 ( $K_{d,i}, D_{d,i}$ ) を設定したが、高剛性環境に対してはインピーダンス側の目標粘弾性がアドミッタンス制御の位置制御器の位置制御および速度制御ゲインに比べて小さいことで、仮想物体の大きな振動に対してもあえて低い追従性を実現することで制御対象の振動振幅を抑えることができた。すなわち、アドミッタンス制御で算出された仮想物体位置  $x_d$  に対して、式 (2.3) のような目標インピーダンスを持つ系のダイナミクスを介して最終的な出力  $F$  が制御対象に加えられるため、仮想物体が振動した場合にも、インピーダンス側のダイナミクスにより振動を吸収でき、安定した動作が可能であることが示された。しかし、図 2.9 から分かるように、提案手法 (図 2.9 内赤線) では、アドミッタンス制御およびインピーダンス制御単体で用いる場合の応答と比較して遅れが生じており、これは、仮想物体の運動を実現する位置制御器としてのインピーダンス制御の目標粘弾性がアドミッタンス制御に比べて低いためである。外力による振動を軽減することと遅れを軽減することはトレードオフの関係にあり、柔剛様々な環境との接触が考えられるタスクや軌道追従タスクなど、実行したいタスクに対して目標の機械特性を調整する必要がある。

図 2.7~2.9 を通して、提案手法の最適なパラメータセットとして表 2.2 を例に考える。表 2.2 に示す各パラメータは、図 2.7~2.9 における赤の点線を示している。図 2.7 のような低剛性環境に対しては、アドミッタンス制御と同様に立ち上がり時間を減少させ定常偏差の生じない応答を実現することができ、図 2.8 のような中剛性環境では、振動は生じてい

表 2.2: 提案手法のシミュレーションにおける最適パラメータ

Parameter	Value	Parameter	Value
$M_{d,a}$	1.0	$M_{d,i}$	1.0
$D_{d,a}$	$2\zeta\sqrt{K_{d,a}M_{d,a}}$	$D_{d,i}$	$2\zeta\sqrt{K_{d,i}M_{d,i}}$
$K_{d,a}$	200	$K_{d,i}$	$10^4$

るものの定常偏差がなく、わずかではあるもののアドミッタンス制御より振動振幅が小さい。最後に図 2.9 のような高剛性環境に対しては、遅れはあるものの、アドミッタンス制御およびインピーダンス制御を単体で用いる場合よりも振動を軽減することができている。このように、単一のパラメータを用いた場合でも、低剛性環境ではアドミッタンス制御と同等の位置精度を発揮し、高剛性環境ではインピーダンス制御よりも振動を軽減することができた。以上より本項では「接触する環境の剛性変化に対するロバスト性」を示すことができた。

## 2.4 一自由度実験機における応答性に関する実験

本項では前項で行った一自由度系におけるシミュレーション結果を基に、一自由度の実験機を用いて精度および安定性の検証について述べる。アドミッタンス制御およびインピーダンス制御、アドミッタンス・インピーダンス制御のブロック線図をまとめたものを図 2.10 に示す。

図 2.10 に示すように、アドミッタンス制御は位置制御ベースの力制御であり、インピーダンス制御およびアドミッタンス・インピーダンス制御は力制御ベースの力制御である。アドミッタンス制御では力センサによって計測された系に作用する外力  $F_{\text{ext}}$  を入力として仮想物体のダイナミクスを計算し、仮想物体速度(位置)を出力する。その計算された仮想物体速度( $\dot{x}_d$ )を実現するために高ゲインの位置制御器が用いられるが、一般的には速度制御のモータが用いられることが多い。すなわち、アドミッタンス制御は「速度制御を行うアクチュエータを用いて力制御をしたい」という望みを実現する力制御であり、「設計者の設定した目標アドミッタンスを持つ仮想物体に外力  $F_{\text{ext}}$  が作用した場合には、こ

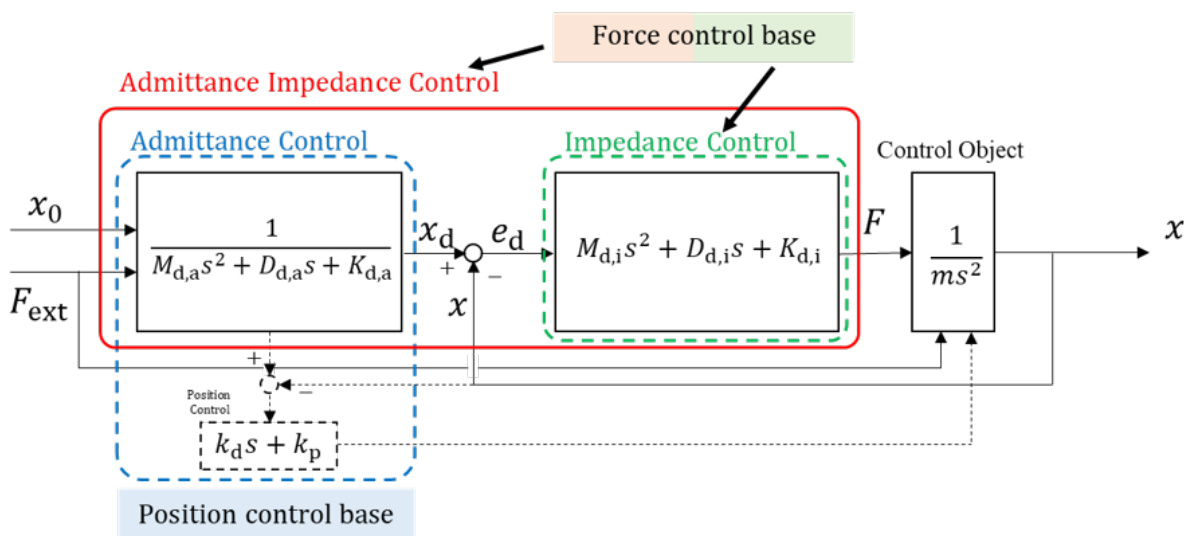


図 2.10: アドミッタンス制御およびインピーダンス制御とアドミッタンス・インピーダンス制御の関係を示すブロック線図

の位置に仮想物体がいる」ということを実現するものであるため、力そのものを制御できないアクチュエータでも見かけ上は柔らかい動きを実現することができる。一方で、インピーダンス制御およびアドミッタンス・インピーダンス制御は、制御対象に力を加えるアクチュエータが力を制御可能であることを前提に考えられている。インピーダンス制御では目標速度(位置) $\dot{x}_d$ と現在速度 $\dot{x}$ の差を入力とし、設定されたバネマスダンパ系に等しい変位が生じた場合に生じる力を出力としている。すなわち「目標軌道と制御対象の間に設計者の設定した目標インピーダンスを持つバネマスダンパ系が付加されている」ということであり、直感的にバネマスダンパの値を代えることで出力される力を直接変化させることができ、実際に制御対象に触れた場合にも柔らかい動きを実現することができる。具体的に、アクチュエータとしてモータ、モータの回転を並進方向の動きに変換するためにボールねじ、力の検出はロードセルを用いることを考える。インピーダンス制御は出力が力であるため、トルク制御が可能なモータを用いる必要があり、アドミッタンス制御は出力が速度(位置)であり、算出された仮想物体位置を仮想目標位置として精度よく制御する必要があるため、速度制御可能なモータを用いる必要がある。提案手法のアドミッタンス・インピーダンス制御は、アドミッタンス制御とインピーダンス制御を直列に接続したものであるが、前述のとおりアドミッタンス制御は速度制御がベースであり、インピー

ダンス制御はトルク制御がベースである。産業分野で稼働するロボットは複数の関節にモータ及び高減速比の減速機を備えていることが多く、モータの回転速度または回転角度を制御する電圧制御が用いられる。高減速比の減速機を用いることによって、モータから出力されるトルクを関節に伝達しやすくなり、出力軸(関節)の位置決め精度を高めることができる一方で、逆可動性が低下してしまうという問題点がある。そのため、入力速度であるインピーダンス制御を用いることは困難であるため、力制御を行う場合にはアドミッタンス制御が用いられる。速度制御を用いる場合の位置精度とトルク制御を用いる場合の位置精度を比較した場合、明らかに速度制御を用いた方が位置精度が高いため、トルク制御可能なモータを用いてアドミッタンス制御を行う研究は行われてこなかった。これまでの力制御の実用に関する流れの中で、前項で提案したアドミッタンス・インピーダンス制御は、トルク制御ベースのアドミッタンス制御であり、仮想物体位置実現のための位置制御器の位置精度を犠牲にしているように思われるが、図 2.7~2.9 のシミュレーション結果から、位置制御器をインピーダンス制御に変更した場合に、位置精度とトレードオフではあるが、制御対象が振動してしまい不安定化することを防ぐことができることが明らかになった。しかし、前項のシミュレーションはあくまで理想環境での応答を示しており、トルク制御を用いたアドミッタンス制御の持つ振動軽減効果が実機でも発揮できるかは明らかではない。また、アドミッタンス制御への入力としての力に対してむだ時間という形での遅れを導入しているものの、摩擦力等のモデル化誤差や制御対象のモデル化誤差(質量  $m$  等)を無視した理想的な環境での力制御を行っており、提案手法とアドミッタンス制御の差である位置制御器としての「トルク制御」の持つ影響を反映しきれていない。実際の作業空間では、力センサの遅れやモータのトルク制限、バックラッシといった実機特有の制御精度の悪化要因も存在する。本項ではこれらの要因に対して、提案するアドミッタンス・インピーダンス制御の持つ「制御対象のモデル化誤差や摩擦などの外的要因のモデル化の精度に対するロバスト性」を示す実験結果について述べる。

#### 2.4.1 実験装置および実験条件

一自由度の実験環境として、一軸のボールねじおよび駆動用のモータを取り付けた実験機を作成した。実験機の全体像を図 2.11, 2.12 に示す。図 2.11 に示すように、ボールね

じ (SKR3320B, THK) のステージ部分に力センサ (LMA-A-100N, 共和電業) を取り付けており, 力センサにバネによる外力が作用するように治具を取り付けている. 本研究で用いるバネのバネ定数は一つ当たり  $k_e = 100[\text{N/m}]$  であり, 等しいバネを 4 本配置しているので全体としては  $K_e = 400[\text{N/m}]$  となる. バネの引っ張り力だけでなく押しつけ力も実現するために 4 本のバネはそれぞれの自然長から伸ばした状態で配置している. ボールねじの駆動に用いるモータ (RE25, maxon motor) に取り付けられたギアヘッド (プラネタリギアヘッド 32A, maxon motor) の減速比は 28:1 であり, モータに取り付けられたエンコーダ (MR TypeML, maxon motor) から角度を計測する. 実験の流れは以下のようになっている.

- (1) 4 本のバネを治具に取り付けた際の平衡点を初期位置とする.
- (2) モータによる位置制御で 4 秒以内に実験開始位置 ( $x(0) = 0.10[\text{m}]$ ) まで移動.
- (3) 実験開始後 4 秒後に外力が作用した状態で平衡点まで力制御を行う.

本研究では制御装置としてデジタル信号処理システム (SEAGULL mini, MIS) を用いており, 制御周期は  $0.1[\text{ms}]$ , 制御プログラムは MATLAB で作成した.

実験に用いるアドミッタンス制御, インピーダンス制御, アドミッタンス・インピーダンス制御の制御則は式 (2.16)~(2.20) となっており, 目標の慣性, 粘性等の機械特性は表 2.3 に示す値を使用した.

• Impedance Control

$$F = \left( \frac{m}{M_d} - 1 \right) F_{\text{ext}} + m\ddot{x}_0 - \frac{m}{M_d}(D_d\dot{e} + K_d e) \quad (2.16)$$

• Admittance Control

$$M_d\ddot{x}_d + D_d\dot{x}_d + K_d(x_d - x_0) = F_{\text{ext}} \quad (2.17)$$

$$F = k_p(x_d - x) + k_v(\dot{x}_d - \dot{x}) \quad (2.18)$$

• Admittance Impedance Control

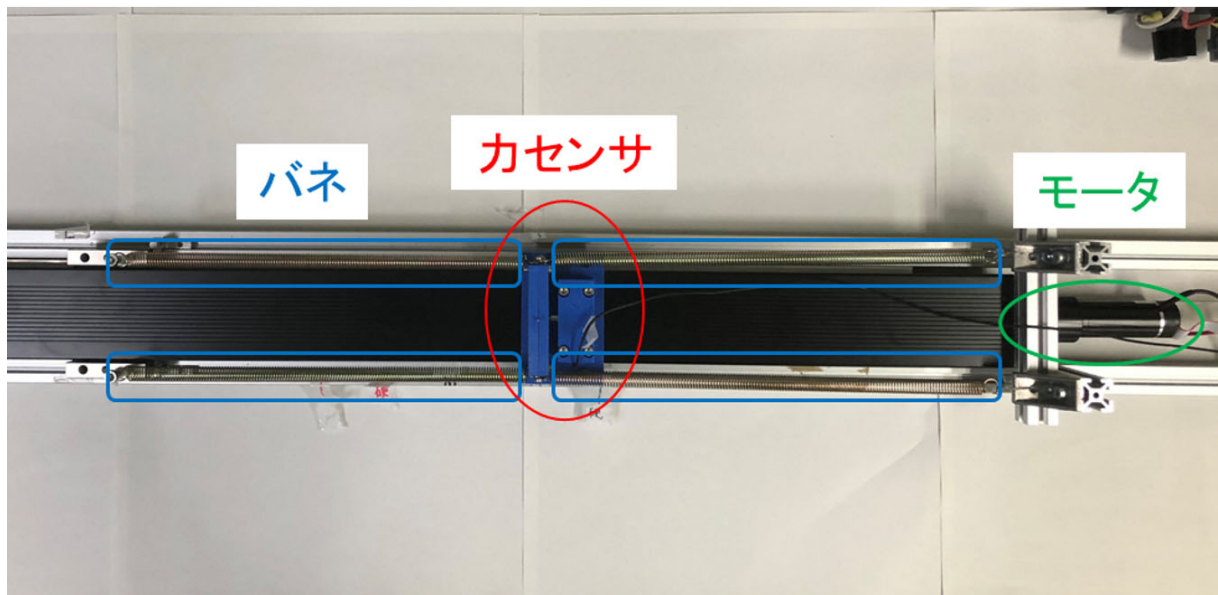


図 2.11: 一自由度の実験機の画像

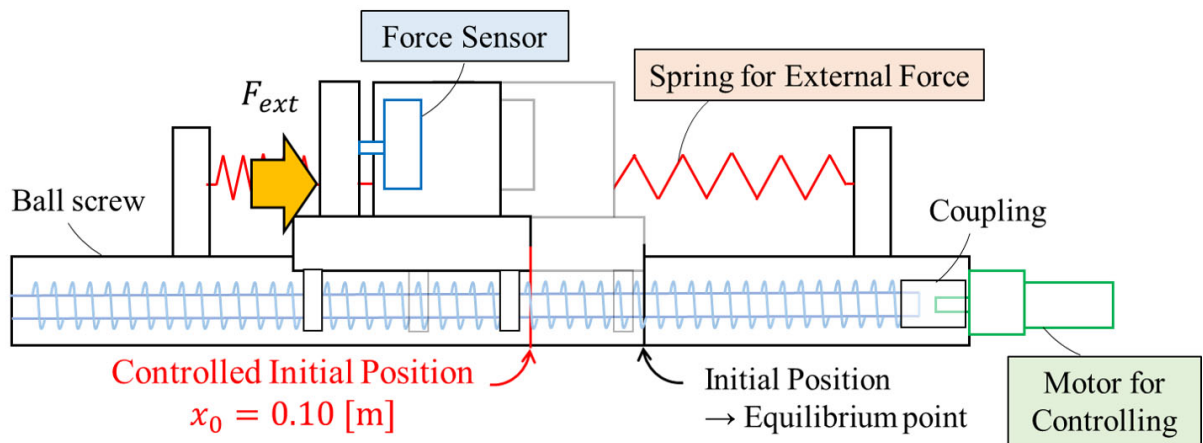


図 2.12: 一自由度の実験機の概略図

$$M_{d,a}\ddot{x}_d + D_{d,a}\dot{x}_d + K_{d,a}(x_d - x_0) = F_{\text{ext}} \quad (2.19)$$

$$F = \left( \frac{m}{M_{d,i}} - 1 \right) F_{\text{ext}} + m\ddot{x}_d - \frac{m}{M_{d,i}}(D_{d,i}\dot{\hat{e}}_d + K_{d,i}\hat{e}_d) \quad (2.20)$$

表 2.3: 実験における各制御則での機械特性値

Parameter		Value	Parameter		Value
Impedance Control	$m$	0.8	Proposed Control	$m$	0.8
	$M_d$	1.0		$M_{d,i}$	0.6
	$K_d$	200		$K_{d,i}$	$3 \times 10^4$
	$D_d$	$2\zeta\sqrt{K_d M_d}$		$D_{d,i}$	$2\zeta\sqrt{K_{d,i} M_{d,i}}$
Admittance Control	$m$	0.8		$M_{d,a}$	1.0
	$M_d$	1.0		$K_{d,a}$	200
	$K_d$	200		$D_{d,a}$	$2\zeta\sqrt{K_{d,a} M_{d,a}}$
	$D_d$	$2\zeta\sqrt{K_d M_d}$		$\zeta$	0.7
	$k_p$	$3 \times 10^4$			
	$k_v$	$2\zeta\sqrt{k_p m}$			

## 2.4.2 一自由度実験結果および考察

各制御則の変位及び力センサの計測値を図 2.13,2.14 に示す。図 2.13 から分かるように、初めの 4 秒間での位置制御で力制御の初期位置 ( $x(0) = 0.10[\text{m}]$ ) まで到達していないことが分かる。これはモータの最大トルクの問題であり、どの制御則においてもほぼ同じ値に収束したため問題はないと判断した。4[s] 以降の力制御に関しては、開始直後 (4 ~ 4.1[s] 付近) アドミッタンス制御と提案手法 (アドミッタンス・インピーダンス制御) でピークの出るような応答が得られた。これは力制御を始めた直後に与える仮想物体位置の初期位置が  $x_d = x(0) = 0.10[\text{m}]$  であるために、現在位置  $x$  が  $x_d$  に近づくような入力を与えられるからであると考えられる。本項の一自由度の実験では、このピークが原因で発散及び振動が起きているわけではないと判断したため、平衡点付近での挙動について考察を行う。図 2.13 の 4.1 ~ 5.0[s] から、アドミッタンス制御及び提案手法については平衡点付近までの応答性がほぼ等しいことが分かる。これらに対してインピーダンス制御は、 $x = 0.04[\text{m}]$  を下回ったあたりから緩やかな応答になっている。これは、アドミッタンス制御と提案手法の仮想物体のダイナミクス (式 (2.17),(2.19)) には外力としてバネの力しか作用していないため、摩擦の影響がない位置を出力し、式 (2.18),(2.20) のような位置制御器 (提案手法ではインピーダンス制御) のゲイン (提案手法では目標インピーダンス) が高いため、式 (2.17),(2.19) で表される摩擦の影響のない位置を実現できることに起因している。制御対象には実際にはボールねじの摩擦が作用しているが、仮想物体位置に追従するように位置制御される (提案手法では力制御) ため、インピーダンス制御のように摩擦の影響で立ち上がり時間が増加する可能性が低い。一方で、仮想物体の運動には力センサから得られるバネによる外力のみが作用するため、5.0[s] 以降のアドミッタンス制御のように、仮想物体の振動が制御対象にまで反映されてしまうというデメリットも確認された。表 2.3 から分かるように、アドミッタンス制御と提案手法では位置制御器のゲイン ( $k_p$ ) およびインピーダンス制御の目標剛性 ( $K_{d,i}$ ) をともに  $3 \times 10^4$  という高い値に設定しているため、仮想物体の振動が制御対象にまで反映されている。ここで、図 2.13 におけるアドミッタンス制御と提案手法の 5.0[s] 以降の挙動について、アドミッタンス制御では 5.0~13[s] まで振動が継続しているのに対して、提案手法では 5.0~6.3[s] までしか振動が発生していない。アドミッタンス制御と提案手法ではともに  $k_p = K_{d,i} = 3 \times 10^4$  として実験を行っているが、提案手法

では振動が継続することなく収束した。これは、式(2.20)で表されるインピーダンス制御の第一項の  $(m/M_{d,i} - 1)F_{\text{ext}}$  の影響が大きいと考えられる。表2.3より、本項の一自由度系での実験では、制御対象の質量  $m$  が0.8であるのに対して、インピーダンス側の目標慣性  $M_{d,i}$  を0.6と設定している。これにより、 $(m/M_{d,i} - 1)F_{\text{ext}} = (0.8/0.6 - 1)F_{\text{ext}} = 1/3F_{\text{ext}}$  となり、外力が作用している方向への入力を与えられる。すなわち、提案手法においては、外力  $F_{\text{ext}}$  に加えて、インピーダンス制御内でも仮想的なバネ力  $1/3F_{\text{ext}}$  が作用していることになる。そのため、アドミッタンス制御のように仮想物体が振動した場合でも、目標粘弾性 ( $D_{d,i}, K_{d,i}$ ) および仮想バネ力によって振動を吸収することができるため、振動が継続しなかったと考えられる。本研究の実験では外力としてバネによる力を与えたため、式(2.20)の第一項を「仮想バネ力」と称したが、系に作用する外力が衝突による撃力や不連続な力の場合には、制御対象の不安定化につながる可能性があるため、パラメータの調整には注意が必要である。次に5.1 ~ 13[s] から、インピーダンス制御には定常偏差が残っているのに対して、提案手法では定常偏差が発生していない。これは立ち上がり時間の議論と同じ理由で、式(2.20)の位置制御器のゲインに当たる目標粘弾性  $K_{d,i}, D_{d,i}$  を大きく設定することで摩擦の影響を軽減できるからである。式(2.16)より、インピーダンス制御は平衡点との間にバネマスダンパ系を置いたような制御になっていることが分かる。そのため、現在位置と平衡点との差が大きい場合には入力が大きくなるが、差が小さい場合には入力が小さくなってしまふ。提案手法では式(2.20)のように、平衡点との差ではなく、アドミッタンス側の出力である仮想物体位置との差を入力としているため、平衡点付近でも力センサから得られた外力を基に目標軌道が生成される。そのため、仮想物体の振動による仮想目標位置としての  $x_d$  が振動することで、静止摩擦による局所平衡点に陥りづらくなる。一自由度の実験結果より、本項では「制御対象のモデル化誤差や摩擦などの外的要因のモデル化の精度に対するロバスト性」を示すことができた。

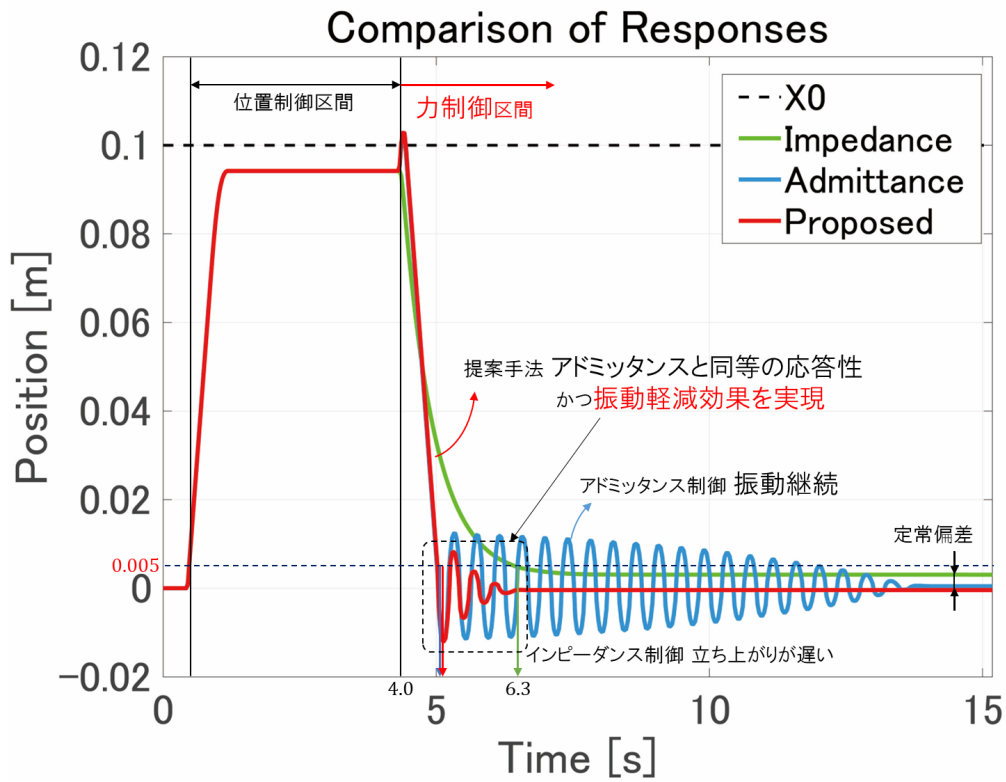


図 2.13: 制御対象の変位の時間変化

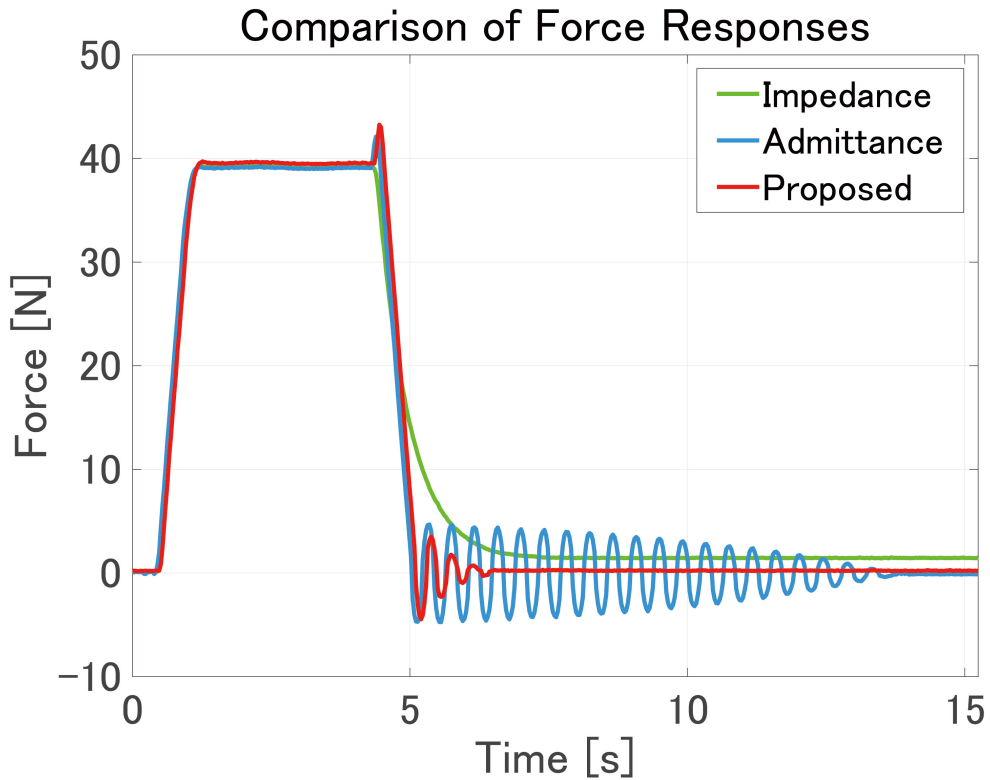


図 2.14: 制御対象に作用する力の時間変化

## 2.5 一自由度系での安定解析

本節では、前節までのシミュレーションで用いた図 2.6 に示すような線形一自由度質点モデルに対しての力制御を考え、各制御則における伝達関数を導出するとともに、伝達関数の極における機械特性値 ( $M_{d,a}$ ,  $D_{d,a}$  等) の及ぼす影響について示す。前節までで、アドミッタンス・インピーダンス制御の有用性について、シミュレーションおよび実験を通して示した。しかし、そのどちらにおいても目標インピーダンス ( $M_{d,i}$ ,  $D_{d,i}$ ,  $K_{d,i}$ ) および目標アドミッタンス ( $M_{d,a}$ ,  $D_{d,a}$ ,  $K_{d,a}$ ) は試行錯誤的に決定されており、設計指針については示されていない。本項では、各制御則の伝達関数をもとにナイキスト線図を作成することで、定性的ではあるが、目標の機械特性の変化による安定性の変化にふれ、機械特性設計におけるポイントについて示す。

### 2.5.1 制御対象および比較する各力制御則の説明

まず初めに、制御対象の運動方程式は次式で表されるものとする。

$$m\ddot{x} = F + F_{\text{ext}} \quad (2.21)$$

ここで  $m$  は質量、 $x$  は位置、 $F$  は入力としての力、 $F_{\text{ext}}$  は系に作用する外力を表している。前節のシミュレーションおよび実験においては摩擦をモデル化してダイナミクスに加えていたが、簡単のために摩擦は考慮していない。アドミッタンス・インピーダンス制御と比較するために、従来のインピーダンス制御およびアドミッタンス制御の制御則、制御対象のダイナミクスを含めた系について説明する。

- インピーダンス制御

インピーダンス制御において、制御対象の目標機械特性を実現するダイナミクスは次式で表される。

$$M_d(\ddot{x} - \ddot{x}_0) + D_d(\dot{x} - \dot{x}_0) + K_d(x - x_0) = F_{\text{ext}} \quad (2.22)$$

式 (2.22) より，インピーダンス制御の目標としては，制御対象に加わる外力に対して目標のバネマスダンパ系の応答の実現であり，式 (2.22) に含まれる目標慣性  $M_d$ ，目標粘性  $D_d$ ，目標剛性  $K_d$  が設計パラメータとなる．次に，式 (2.22) で表された目標機械特性を実現するための入力を求める．式 (2.21) に示された制御対象の運動方程式より，制御入力  $F$  は次式のように表される．

$$F = m\ddot{x} - F_{\text{ext}} \quad (2.23)$$

式 (2.23) を入力とする場合，制御対象の加速度  $\ddot{x}$  を計測する必要があるが，実際には加速度は計測が困難であるため，前節のシミュレーション同様，式 (2.22) を用いて加速度  $\ddot{x}$  を次式で置き換える．

$$\ddot{x} = \frac{1}{M_d}F_{\text{ext}} + \ddot{x}_0 - \frac{1}{M_d}(D_d\dot{e} - K_de) \quad (2.24)$$

ここで  $e = x - x_0$  である．よって，式 (2.22) および式 (2.23) より，インピーダンス制御の入力は次式で与えられる．

$$F = \left(\frac{m}{M_d} - 1\right)F_{\text{ext}} + m\ddot{x}_0 - \frac{m}{M_d}(D_d\dot{e} + K_de) \quad (2.25)$$

式 (2.25) は式 (2.23) および式 (2.24) から導出される式であり，式 (2.21) に対して用いた場合には，式 (2.22) のような目標インピーダンスを持つ物体の運動を実現することは明らかである．

- アドミッタンス制御

アドミッタンス制御において，仮想物体のダイナミクスを式 (2.26) に示す．

$$M_d(\ddot{x}_d - \ddot{x}_0) + D_d(\dot{x}_d - \dot{x}_0) + K_d(x_d - x_0) = F_{\text{ext}} \quad (2.26)$$

ここで  $e_d = x_d - x_0$  であり， $x_d$  は式 (2.26) より得られる目標位置を表す．制御対象に作用する外力  $F_{\text{ext}}$  が，式 (2.26) で表された仮想物体に対して作用した際の運動方程式を解くことにより，ロボットの目標位置や速度を算出する．前節同様，一般的なアドミッタ

ス制御の表現である位置制御器として仮想物体の目標位置  $x_d$  を入力として力  $F$  を出力する式 (2.27) を用いた.

$$F = k_p (x_d - x) - k_v \dot{x} \quad (2.27)$$

式 (2.27) を式 (2.21) に代入すると, アドミッタンス制御を用いた際の制御対象の運動方程式は次式で表される.

$$m\ddot{x} + k_v \dot{x} + k_p (x - x_d) = F_{\text{ext}} \quad (2.28)$$

- アドミッタンス・インピーダンス制御

本研究で提案するアドミッタンス・インピーダンス制御は, 式 (2.29),(2.30) のような入出力関係になる.

### Admittance control part

$$M_{d,a}\ddot{x}_d + D_{d,a}\dot{x}_d + K_{d,a}(x_d - x_0) = F_{\text{ext}} \quad (2.29)$$

### Impedance control part

$$F = \left( \frac{m}{M_{d,i}} - 1 \right) F_{\text{ext}} + m\ddot{x}_d - \frac{m}{M_{d,i}} \left( D_{d,i}\dot{\hat{e}}_d + K_{d,i}\hat{e}_d \right) \quad (2.30)$$

ここで  $\hat{e}_d = x_d - x$  である. 目標アドミッタンス ( $M_{d,a}$ ,  $D_{d,a}$ ,  $K_{d,a}$ ) および目標インピーダンス ( $M_{d,i}$ ,  $D_{d,i}$ ,  $K_{d,i}$ ) は, 定数として設計者が与える. 制御対象への入力である式 (2.30) を式 (2.21) に代入することで, 式 (2.31) を得る.

$$M_{d,i}(\ddot{x} - \ddot{x}_d) + D_{d,i}(\dot{x} - \dot{x}_d) + K_{d,i}(x - x_d) = F_{\text{ext}} \quad (2.31)$$

式 (2.31) から分かるように, アドミッタンス・インピーダンス制御はインピーダンス制御の目標となる運動の目標値がアドミッタンス制御の出力である仮想物体位置になっている. また, 式 (2.29) のように, 仮想物体位置  $x_d$  は目標アドミッタンスを持つ仮想物体の外力に対する応答であるので, アドミッタンス側のバネマスダンパとインピーダンス側のバネマスダンパが連成するような形になっていることが分かる.

## 2.5.2 インパルス応答に対する理論的解析

式(2.29),(2.30)より,提案するアドミッタンス・インピーダンス制御では,アドミッタンス制御と同様に外力を基に目標仮想物体位置  $x_d$  を算出するが,  $x_d$  と  $x$  の差である  $e_d$  をインピーダンス制御の入力とする. これにより,インピーダンス制御による機械インピーダンスの影響を応答に反映させることが可能になり,高剛性環境との接触時に問題となるアドミッタンス制御の振動を抑制する効果が期待できる.本項ではアドミッタンス・インピーダンス制御の,入力を系に作用する外力,出力を制御対象の位置とした場合の伝達関数を導出し,伝達関数のインパルス応答についての議論を行う.伝達関数の導出にあたり,インピーダンス制御と制御対象を含む系およびアドミッタンス制御の仮想物体の伝達関数の二通りに分けて導出し,それらを連立することによって,アドミッタンス・インピーダンス制御の一自由度系を含む伝達関数を導出する.

- インピーダンス制御および一自由度系

インピーダンス制御において,式(2.25)で表される入力としての力  $F$  が,式(2.21)で表される一自由度系に入力された場合には,式(2.22)が満たされるので,インピーダンス制御を用いた際の一自由度系の伝達関数は,式(2.22)をラプラス変換して,

$$F_{\text{ext}}(s) = (M_i s^2 + D_i s + K_i)(X - X_0) \quad (2.32)$$

ここで,  $M_i, D_i, K_i$  はインピーダンス制御を単体で用いた場合の目標インピーダンスであり,  $X = \mathcal{L}[x(t)], X_0 = \mathcal{L}[x_0(t)], F_{\text{ext}}(s) = \mathcal{L}[F_{\text{ext}}(t)]$  である.

- アドミッタンス制御

アドミッタンス制御において,式(2.26)で表される仮想物体のダイナミクスは,入力が系に作用する外力  $F_{\text{ext}}$  であり,仮想物体位置(速度) $x_d$  が出力とすると,式(2.26)を  $x_0 = 0$  としてラプラス変換して,

$$(M_a s^2 + D_a s + K_a)X_d = F_{\text{ext}}(s) \quad (2.33)$$

$$X_d = \frac{1}{M_a s^2 + D_a s + K_a} F_{\text{ext}}(s) \quad (2.34)$$

ここで,  $M_a, D_a, K_a$  はアドミッタンス制御を単体で用いた場合の目標アドミッタンスであり,  $X_d = \mathcal{L}[x_d(t)]$  である.

- アドミッタンス・インピーダンス制御

アドミッタンス・インピーダンス制御は, インピーダンス制御の入力としての目標位置(速度) $x_0$  をアドミッタンス制御から得られる仮想物体位置(速度) $x_d$  とすればよいので, 式(2.32) と (2.34) を連立して,

$$F_{\text{ext}}(s) = (M_{d,i}s^2 + D_{d,i}s + K_{d,i})(X - X_d) \quad (2.35)$$

$$F_{\text{ext}}(s) = (M_{d,i}s^2 + D_{d,i}s + K_{d,i}) \left( X - \frac{1}{M_{d,a}s^2 + D_{d,a}s + K_{d,a}} F_{\text{ext}}(s) \right) \quad (2.36)$$

式(2.36) を  $X$  について解くことにより, 式(2.37) のような伝達関数  $G_{\text{ai}}(s)$  が得られる.

$$X = \left( \frac{1}{M_{d,i}s^2 + D_{d,i}s + K_{d,i}} + \frac{1}{M_{d,a}s^2 + D_{d,a}s + K_{d,a}} \right) F_{\text{ext}}(s) = G_{\text{ai}}(s) F_{\text{ext}}(s) \quad (2.37)$$

式(2.37) で示したように, 伝達関数  $G_{\text{ai}}(s)$  はアドミッタンス・インピーダンス制御の伝達関数であり, 四次遅れ系になっているのが分かる.  $G_{\text{ai}}(s)$  の逆ラプラス変換により, 式(2.38) のようなインパルス応答を得ることができる.

$$y(t) = A_1 e^{\lambda_{a+} t} + A_2 e^{\lambda_{a-} t} + A_3 e^{\lambda_{i+} t} + A_4 e^{\lambda_{i-} t} \quad (2.38)$$

$$\lambda_{a+} = -\frac{D_{d,a}}{2M_{d,a}} + \frac{\sqrt{D_{d,a}^2 - 4K_{d,a}M_{d,a}}}{2M_{d,a}} \quad (2.39)$$

$$\lambda_{a-} = -\frac{D_{d,a}}{2M_{d,a}} - \frac{\sqrt{D_{d,a}^2 - 4K_{d,a}M_{d,a}}}{2M_{d,a}} \quad (2.40)$$

$$\lambda_{i+} = -\frac{D_{d,i}}{2M_{d,i}} + \frac{\sqrt{D_{d,i}^2 - 4K_{d,i}M_{d,i}}}{2M_{d,i}} \quad (2.41)$$

$$\lambda_{i-} = -\frac{D_{d,i}}{2M_{d,i}} - \frac{\sqrt{D_{d,i}^2 - 4K_{d,i}M_{d,i}}}{2M_{d,i}} \quad (2.42)$$

ここで  $A_1 \sim A_4$  は時間の関数であり, 機械特性 ( $M_{d,a}, D_{d,a}, \text{etc.}$ ) を含む形になっており, 系の応答性を決定する  $\lambda$  においても機械特性を含む形になっている. 式(2.38) の示す応答について, 以下の四つのパターンに場合分けを行う.

$$1. D_{d,a}^2 - 4K_{d,a}M_{d,a} < 0 \text{ かつ } D_{d,i}^2 - 4K_{d,i}M_{d,i} < 0$$

アドミッタンス側から得られる固有値である式(2.39),(2.40)の第二項の根号内およびインピーダンス側から得られる固有値である式(2.41),(2.42)の第二項の根号内がともに負であるため、式(2.38)で表されるインパルス応答は振動解となる。ただし、式(2.39)~(2.42)の第一項はすべて負であるため、振動が発生する場合にも減衰振動解となるため、応答の収束は補償される。

$$2. D_{d,a}^2 - 4K_{d,a}M_{d,a} > 0 \text{ かつ } D_{d,i}^2 - 4K_{d,i}M_{d,i} < 0$$

アドミッタンス側から得られる固有値である式(2.39),(2.40)の第二項の根号内は正である。すなわち、 $\lambda_{a+} < 0, \lambda_{a-} < 0$ が満たされるため、アドミッタンス側の応答は過減衰となる。一方で、インピーダンス側から得られる固有値である式(2.41),(2.42)の第二項の根号内は負である。よって、インピーダンス側の応答は減衰振動解である。結果として、式(2.38)で表されるインパルス応答は減衰振動解となることが予想されるが、減衰の速度や振動振幅についてはパラメータ次第である。

$$3. D_{d,a}^2 - 4K_{d,a}M_{d,a} < 0 \text{ かつ } D_{d,i}^2 - 4K_{d,i}M_{d,i} > 0$$

2.の場合と同様に、式(2.38)で表されるインパルス応答は減衰振動解となる。

$$4. D_{d,a}^2 - 4K_{d,a}M_{d,a} > 0 \text{ かつ } D_{d,i}^2 - 4K_{d,i}M_{d,i} > 0$$

アドミッタンス側から得られる固有値である式(2.39),(2.40)の第二項の根号内およびインピーダンス側から得られる固有値である式(2.41),(2.42)の第二項の根号内がともに正であるため、式(2.39)~(2.42)はすべて負になり、式(2.38)で表されるインパルス応答は過減衰解となる。すなわち振動が発生することなく収束する。

以上の四つの条件から、振動が起きないように力制御を行うためには、4.の条件である  $D_{d,a}^2 - 4K_{d,a}M_{d,a} > 0$  かつ  $D_{d,i}^2 - 4K_{d,i}M_{d,i} > 0$  を満たすパラメータを設定すればよい。具体的には、 $D_{d,a} > 2\sqrt{M_{d,a}K_{d,a}}$  かつ  $D_{d,i} > 2\sqrt{M_{d,i}K_{d,i}}$  を満たすようにパラメータを設計

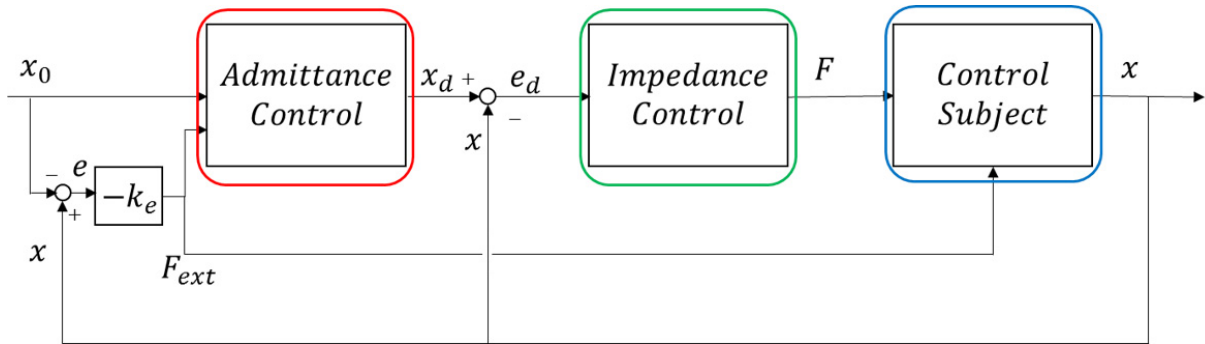


図 2.15: 一自由度系へのバネによる外力を想定した場合のブロック線図

すればよい。

### 2.5.3 バネによる外力を受ける系における伝達関数

これまでに外力を  $F_{\text{ext}}$  の形のままで式変形を行っていたが、Ott らの研究でも用いられていた [24] バネによる外力が系に作用する場合のナイキスト線図について考える。前節までのシミュレーションおよび実験において用いたバネによる外力のモデルを式 (2.43) に示し、図 2.15 にバネによる外力を考慮した場合のブロック線図を示す。

$$F_{\text{ext}} = -k_e(x - x_0) \quad (2.43)$$

外力を式 (2.43) としてモデル化したことにより、各制御則と制御対象を含む系のダイナミクスは式 (2.22), (2.28), (2.31) に式 (2.43) を代入し、以下の式 (2.44)~(2.46) で表される。

- インピーダンス制御

$$M_i(\ddot{x} - \ddot{x}_0) + D_i(\dot{x} - \dot{x}_0) + K_i(x - x_0) = -k_e(x - x_0) \quad (2.44)$$

- アドミッタンス制御

$$m\ddot{x} + k_v\dot{x} + k_p(x - x_d) = -k_e(x - x_0) \quad (2.45)$$

- アドミッタンス・インピーダンス制御

$$M_{d,i}(\ddot{x} - \ddot{x}_d) + D_{d,i}(\dot{x} - \dot{x}_d) + K_{d,i}(x - x_d) = -k_e(x - x_0) \quad (2.46)$$

インピーダンス制御を系に用いた場合の伝達関数は、式(2.44)をラプラス変換することで得られる。ここで、入力を平衡点 $x_0$ 、出力を制御対象の位置 $x$ とし、 $\ddot{x}_0 = \dot{x}_0 = 0$ とする。

- インピーダンス制御

$$(M_i s^2 + D_i s)X + K_i(X - X_0) = -k_e(X - X_0) \quad (2.47)$$

$$X = \frac{k_e + K_i}{G_i(s) + k_e} X_0 = G_I(s)X_0 \quad (2.48)$$

$$(2.49)$$

ここで、 $G_{i(s)}$  は  $G_i(s) = M_i s^2 + D_i s + K_i$  を満たす目標インピーダンスを係数にもつ伝達関数である。次に、アドミッタンス制御とアドミッタンス・インピーダンス制御は、伝達関数を導出する過程では中間変数として使用されている仮想物体位置 $x_d$ のラプラス変換 $X_d$ を消去する必要がある。アドミッタンス制御において、式(2.45)をラプラス変換した式と、式(2.26)を $\ddot{x}_0 = \dot{x}_0 = 0$ にてラプラス変換した式を連立することで、式(2.52)を得る

- アドミッタンス制御

$$m s^2 X = k_p(X_d - X) - k_v s X - k_e(X - X_0) \quad (2.50)$$

$$M_a s^2 X_d + D_a s X_d + K_a(X_d - X_0) = -k_e(X - X_0) \quad (2.51)$$

$$X = \frac{k_p(K_a + k_e) + G_a(s)k_e}{G_a(s)(m s^2 + k_p + k_v s + k_e) + k_e k_p} X_0 = G_A(s)X_0 \quad (2.52)$$

ここで、 $G_{a(s)}$  は  $G_a(s) = M_a s^2 + D_a s + K_a$  を満たす目標アドミッタンスを係数にもつ伝達関数である。アドミッタンス制御と同様に、アドミッタンス・インピーダンス制御を系に用いた際の伝達関数は、式(2.46)をラプラス変換した式と、式(2.29)をラプラス変換した式を連立することで、式(2.55)の形で得られる。

- アドミッタンス・インピーダンス制御

$$(M_{d,i}s^2 + D_{d,i}s + K_{d,i})(X - X_d) = -k_e(X - X_0) \quad (2.53)$$

$$M_{d,a}s^2 X_d + D_{d,a}s X_d + K_{d,a}(X_d - X_0) = -k_e(X - X_0) \quad (2.54)$$

$$X = \frac{G_{d,i}(s)(K_{d,a} + k_e) + G_{d,a}(s)k_e}{G_{d,a}(s)(G_{d,i}(s) + k_e) + k_e G_{d,i}(s)} X_0 = G_{AI}(s) X_0 \quad (2.55)$$

ここで、 $G_{d,a}, G_{d,i}$  は、アドミッタンス・インピーダンス制御におけるアドミッタンス側およびインピーダンス側の機械特性を係数にもつ伝達関数であり、式(2.56),(2.57)のような形である。

$$G_{d,a}(s) = M_{d,a}s^2 + D_{d,a}s + K_{d,a} \quad (2.56)$$

$$G_{d,i}(s) = M_{d,i}s^2 + D_{d,i}s + K_{d,i} \quad (2.57)$$

本項で導出したアドミッタンス制御、インピーダンス制御、アドミッタンス・インピーダンス制御の伝達関数を表2.4にまとめる。表2.4から分かるように、アドミッタンス制御の伝達関数  $G_A$  とアドミッタンス・インピーダンス制御の伝達関数  $G_{AI}$  を比較すると、 $G_A$  の分子の  $k_p$  に対してアドミッタンス・インピーダンス制御では  $G_{d,i}$  が用いられており、系の応答に関与するパラメータが増加している。また、分母の  $ms^2 + k_p + k_v s + k_e$  の項についても、 $G_{d,i}$  というインピーダンス側のパラメータが用いられることで、設計の自由度が増加している。Anderson らの研究 [25] で用いられたハイブリッドインピーダンス制御のように、「力制御を行う自由度と位置制御を行う自由度を選択する」という観点から、設計パラメータの増加により実現可能なタスクが増加し、モデル化誤差の影響による

表 2.4: バネによる外力が作用する系での伝達関数

Control law	Transfer function	Equation No.
Impedance Control	$G_I(s) = \frac{k_e + K_i}{G_i(s) + k_e}$	2.48
Admittance Control	$G_A(s) = \frac{k_p(K_a + k_e) + G_a(s)k_e}{G_a(s)(ms^2 + k_p + k_v s + k_e) + k_e k_p}$	2.52
Admittance + Impedance Control	$G_{AI}(s) = \frac{G_{d,i}(s)(K_{d,a} + k_e) + G_{d,a}(s)k_e}{G_{d,a}(s)(G_{d,i}(s) + k_e) + k_e G_{d,i}(s)}$	2.55
$G_i(s) = M_i s^2 + D_i s + K_i, G_a(s) = M_a s^2 + D_a s + K_a$ $G_{d,a}(s) = M_{d,a} s^2 + D_{d,a} s + K_{d,a}, G_{d,i}(s) = M_{d,i} s^2 + D_{d,i} s + K_{d,i}$		

位置精度の低下の防止の可能性がある．次項では式 (2.48),(2.52),(2.55) をもとに周波数領域での安定性の比較を行う．

## 2.5.4 周波数応答

前項で示した式 (2.48),(2.52),(2.55) において,  $s = i\omega$  を代入することで周波数応答を得る．また,  $\omega: -\infty \rightarrow \infty$  の極限をとることで, 図 2.16~2.24 のようなナイキスト線図を作成する．ナイキスト線図の作成のために用いた各制御則の機械特性を表 2.5 に示す．表 2.5

表 2.5: ナイキスト線図における各制御則の機械特性

	Impedance			Admittance				
Index	$M_i$	$D_i$	$K_i$	$M_a$	$D_a$	$K_a$	$k_p$	$k_v$
1	1.0	$2\zeta\sqrt{M_i K_i}$	100	1.0	$2\zeta\sqrt{M_a K_a}$	100	$10^6$	$2\zeta\sqrt{k_p m}$
2	1.0	$2\zeta\sqrt{M_i K_i}$	200	1.0	$2\zeta\sqrt{M_a K_a}$	200	$10^6$	$2\zeta\sqrt{k_p m}$
3	1.0	$2\zeta\sqrt{M_i K_i}$	$10^3$	1.0	$2\zeta\sqrt{M_a K_a}$	$10^3$	$10^6$	$2\zeta\sqrt{k_p m}$
Admittance+Impedance								
Index	$M_{d,a}$	$D_{d,a}$	$K_{d,a}$	$M_{d,i}$	$D_{d,i}$	$K_{d,i}$		
1	1.0	$2\zeta\sqrt{M_{d,a} K_{d,a}}$	100	1.0	$2\zeta\sqrt{M_{d,i} K_{d,i}}$	$10^4$		
2	1.0	$2\zeta\sqrt{M_{d,a} K_{d,a}}$	200	1.0	$2\zeta\sqrt{M_{d,i} K_{d,i}}$	$10^4$		
3	1.0	$2\zeta\sqrt{M_{d,a} K_{d,a}}$	$10^3$	1.0	$2\zeta\sqrt{M_{d,i} K_{d,i}}$	$10^4$		
4	1.0	$2\zeta\sqrt{M_{d,a} K_{d,a}}$	200	1.0	$2\zeta\sqrt{M_{d,i} K_{d,i}}$	$5 \times 10^3$		
5	1.0	$2\zeta\sqrt{M_{d,a} K_{d,a}}$	200	1.0	$2\zeta\sqrt{M_{d,i} K_{d,i}}$	$5 \times 10^4$		
6	1.0	$2\tilde{\zeta}\sqrt{M_{d,a} K_{d,a}}$	200	1.0	$2\tilde{\zeta}\sqrt{M_{d,i} K_{d,i}}$	$10^4$		
7	1.0	$2\hat{\zeta}\sqrt{M_{d,a} K_{d,a}}$	200	1.0	$2\hat{\zeta}\sqrt{M_{d,i} K_{d,i}}$	$10^4$		
8	1.0	$2\zeta\sqrt{M_{d,a} K_{d,a}}$	200	1.0	$2\hat{\zeta}\sqrt{M_{d,i} K_{d,i}}$	$10^4$		
9	1.0	$2\hat{\zeta}\sqrt{M_{d,a} K_{d,a}}$	200	1.0	$2\zeta\sqrt{M_{d,i} K_{d,i}}$	$10^4$		
$\zeta = 0.7, \tilde{\zeta} = 1.0, \hat{\zeta} = 1.2$								

における Index は図 2.16~2.24 の凡例にある各制御則の名称に続く数字に対応している．

- 三制御則間の比較

図 2.16~2.18 より、低剛性環境 ( $k_e = 10$ ) の場合、三つの制御では同じナイキスト線図が得られる。これは、伝達関数の導出の過程で摩擦や力センサの遅れといった環境による誤差を考慮していないため、インピーダンス制御特有の摩擦による精度低下が見られなかったためであると考えられる。

中剛性環境 ( $k_e = 300$ ) の場合、提案手法はアドミッタンス制御とインピーダンス制御と比較して高い安定性があることが分かる。図 2.17 より、各制御則の実線、破線、点線同士を比較した際に、三つの制御則で同じような軌道を描いているが、提案手法が最も不安定点  $(-1, 0)$  から遠い軌道を描いている。これは、アドミッタンス制御と比較すると位置制御器としてインピーダンス制御を用いることで最終段のバネマスダンパによる振動軽減が発揮されたことと、インピーダンス制御と比較すると、提案手法のアドミッタンス側のバネマスダンパのダイナミクスによる軌道の更新が行われることで局所平衡点に陥らないことに起因していると考えられる。また、三つの制御則を比較した際に、アドミッタンス制御は接触環境の剛性が高くなると不安定になる可能性が高くなることを本章で述べたが、この事実は図 2.17 でも見ることが出来る。

高剛性環境 ( $k_e = 3200$ ) の場合、最も不安定点に近いのはアドミッタンス制御であることがわかる。この結果は、アドミッタンス制御が高剛環境と接触すると不安定になるという事実と一致する。これは、高剛性環境との接触により急激な外力が発生した場合、仮想物体位置が振動してしまうためである。一方、インピーダンス制御のみとアドミッタンス・インピーダンス制御を比較した場合に、明らかにアドミッタンス・インピーダンス制御の安定性が高いことが分かる。アドミッタンスインピーダンス制御では、式 (2.55) から分かるように、分母の  $G_{d,i}(s)$  はインピーダンス側の機械特性を持つ伝達関数であり、慣性、粘性、剛性を自由に設計できるのに対して、アドミッタンス制御では仮想物体の運動を実現するために式 (2.27) で表される位置制御器のゲインを高くする必要がある。そのため、大きな外力が作用する高剛性環境では不安定点に近い軌道が得られる。また、アドミッタンス側では、位置制御側として分子の  $k_p$  のみが設計パラメータであるのに対して、アドミッタンス・イ

ンピーダンス制御では、式 (2.55) の分子における  $G_{d,i}(s)$  が設計パラメータであり、設計自由度が高いというメリットがある。すなわち、仮想物体の動きを硬くしても ( $G_{d,a}(s)$  の機械特性を大きくしても)、位置制御器のインピーダンス制御を柔らかくする ( $G_{d,i}(s)$  の機械特性を小さくする) ことにより、伝達関数が不安定になることを防ぐ可能性を示している。式 (2.52), (2.55) はともに四次遅れ系であるため、設定したパラメータによっては不安定になる可能性があるが、アドミッタンス・インピーダンス制御のナイキスト線図からわかるように不安定領域は非常に小さくなっている。図 2.16~2.18 を通して示されることとして、低剛性環境では位置精度を維持したまま安定性を確保でき、高剛性環境ではインピーダンス制御部のダイナミクスにより振動を抑制することで、不安定性を回避できることがわかる。

- アドミッタンス・インピーダンス制御における機械特性変化による安定性に関する考察

図 2.19~2.24 にアドミッタンス・インピーダンス制御のアドミッタンス側およびインピーダンス側の機械特性を変化させた場合のナイキスト線図を示している。図 2.19~2.21 では、アドミッタンス側とインピーダンス側の目標剛性 ( $K_{d,a}$  および  $K_{d,i}$ ) を変化させてナイキスト線図を作成している。図 2.19 より、低剛性環境 ( $k_e = 10$ ) の場合、目標剛性変化による大きな軌道の変化はなかった。図 2.20 より、中剛性環境 ( $k_e = 300$ ) の場合、点線同士 (Index3,5) を比較すると、Index5 の軌道の方が不安定点に近い軌道を描いている。これは、Index5 のインピーダンス側の目標剛性を高くしたことでアドミッタンス制御に近い制御になり、外力に対する不安定性が増加したことが原因であると考えられる。また、破線同士 (Index2,4) を比較すると、Index4 の方が不安定点より遠い軌道になっており、これは、Index4 ではインピーダンス側の目標剛性を低くしているためであり、仮想物体の振動を軽減させる効果が発揮されているためであると考えられる。次に、図 2.21 より、高剛性環境 ( $k_e = 3200$ ) で点線同士を比較すると、Index5 の方が不安定点に近い軌道になっている。これは、 $k_e = 300$  の場合と同様に、インピーダンス側の目標剛性が増加したことによりアドミッタンス制御に近い応答になり、不安定化するためである。破線同士を比較した場合には、 $k_e = 300$  の場合とは異なり、Index4 の方が不安定点に近い軌道となった。

外力が増加したことにより系の外力に対する応答が大きくなることによって、インピーダンス側の目標剛性を低くすることによる遅れが生じることが原因であると考えられる。

図 2.22~2.24 では、アドミッタンス側とインピーダンス側の目標粘性 ( $D_{d,a}$  および  $D_{d,i}$ ) を変化させてナイキスト線図を作成している。前項のインパルス応答において、式 (2.39)~(2.42) における議論で示した、 $D_{d,i} = 2\sqrt{K_{d,i}M_{d,i}}$  および  $D_{d,a} = 2\sqrt{K_{d,a}M_{d,a}}$  が設計のポイントであることを示すために、表 2.5 に示す複数の減衰比 ( $\zeta, \hat{\zeta}, \tilde{\zeta}$ ) にてナイキスト線図を作成した。図 2.22 より、Index2,9 では同じ軌道を描いた。これにより、低剛性環境では、アドミッタンス側の目標粘性 ( $D_{d,a}$ ) のみを変化させた場合には安定性に影響がないことが分かる。これは、Index2 の目標粘性である  $D_{d,a} = 2\zeta\sqrt{K_{d,a}M_{d,a}}$  の値で十分な粘性を確保できており、低剛性環境における精度を確保できているため変化がなかったと考えられる。また、Index6,7,8 では、Index2 の場合よりも不安定点から離れた軌道を描いており、粘性の増加による安定性の確保の可能性を示している。Index7,8 では、設計ポイントである減衰比  $\tilde{\zeta}$  よりも大きい減衰比  $\hat{\zeta}$  を用いているため、Index6 よりも不安定点から離れた軌道を得られたと考えられる。さらに、制御則のメリットとしてインピーダンス側の粘性を変化させられることがあり、Index6 と Index8 を比較した際に、Index8 のようにアドミッタンス側の目標粘性  $D_{d,a}$  を大きくし、インピーダンス側の目標粘性  $D_{d,i}$  を小さくすることで、Index6 よりも高い安定性を示すことができた。インパルス応答の議論では減衰比を  $\zeta > \tilde{\zeta}$  にした場合に安定であると述べたが、設計パラメータが複数あることにより、示したものは別の条件がある可能性があり、今後の研究で明らかにする必要がある。図 2.23 より、中剛性環境では低剛性環境と同じような傾向が得られた。図 2.24 より、高剛性環境では Index9 が最も不安定点に近い軌道となり、Index8 が最も離れた軌道となっている。さらに、高剛性環境では Index6,7 の軌道が不安定点に近くなっている。これは、Index6,7 は Index2 と比較して、インピーダンス側の粘性が大きくなっており、アドミッタンス制御に近い応答になるためであると考えられる。さらに、中剛性環境では同じ軌道が得られた Index7 と Index8 が、高剛性環境では異なる軌道が得られ、Index8 の安定性が最も高い理由としては、アド

ミッタンス・インピーダンス制御の持つ特徴である，インピーダンス制御のダイナミクスを介した力の出力が大きな要因であると考えられる．インピーダンス制御の設計パラメータは三つ，アドミッタンス制御の設計パラメータは，仮想物体の運動を高精度で実現する場合には，位置制御器を高ゲインに設定する必要があるため三つであるのに対して，アドミッタンス・インピーダンス制御ではアドミッタンス側三つとインピーダンス側三つの六つがあり，高い安定性を実現するための組み合わせを複数取ることができるのがメリットである．以上より，ナイキスト線図を基にした，アドミッタンス・インピーダンス制御の安定性を定性的に示すことができた．

## 2.6 結言

本章では，アドミッタンス制御とインピーダンス制御を直列に接続したアドミッタンス・インピーダンス制御について，一自由度系でのシミュレーションおよび実機検証，安定解析を基に位置精度と安定性を兼ね備える力制御であることを示した．制御則の着想としては，接触する環境情報が不明な場合でも安定かつ高精度な力制御の実現のために，力制御を組み合わせることが初めにあり，先行研究である Ott らの並列接続型力制御および Anderson らのハイブリッドインピーダンス制御では実現されなかった複数の環境剛性への適応を実現した．一自由度系に対するシミュレーションを基に，低剛性から高剛性に至るまで単一の機械特性でアドミッタンス制御およびインピーダンス制御と同等かそれ以上の性能を有していることを示した．また，実機での問題となる力センサの遅れやモータのトルク制限に対するロバスト性に関しても，一自由度の実験機を作成し実験を行うことで有用性を示した．さらに，一自由度の線形系ではあるが，周波数応答を基に作成したナイキスト線図から従来のアドミッタンス制御およびインピーダンス制御よりも広い安定領域を有することを示し，インパルス応答を基にした設計のポイントとなる減衰比 $\tilde{\zeta}$ を示した．次章では，アドミッタンス・インピーダンス制御の持つアドミッタンス側とインピーダンス側の機械特性の独立設計に注目して，「異方剛性」の設計による応答性の変化について示す．

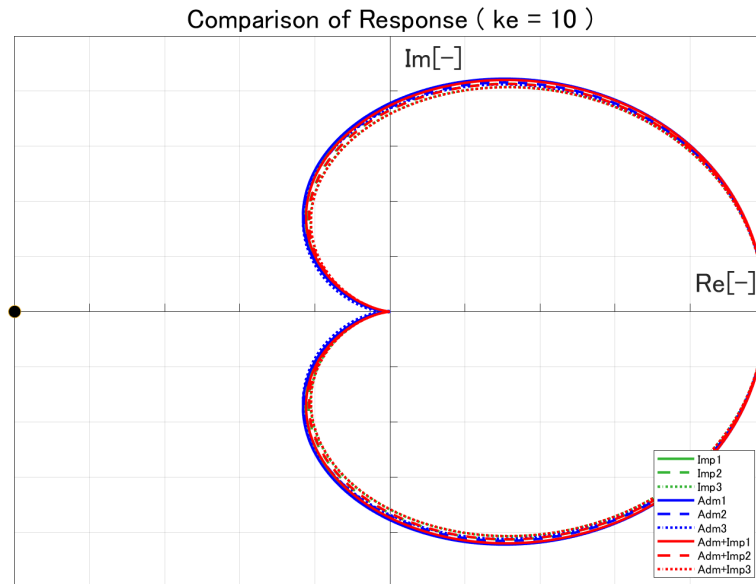


図 2.16: 環境剛性が低剛性 ( $k_e = 10$ ) の場合の各制御則のナイキスト線図

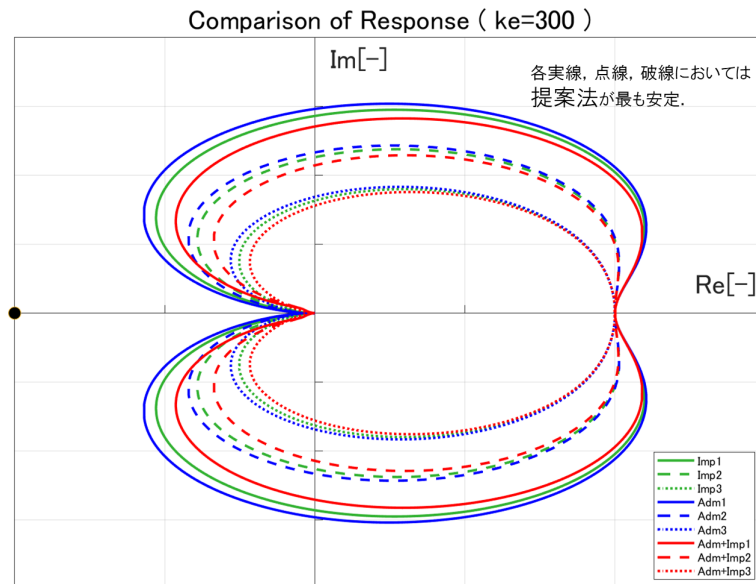


図 2.17: 環境剛性が中剛性 ( $k_e = 300$ ) の場合の各制御則のナイキスト線図

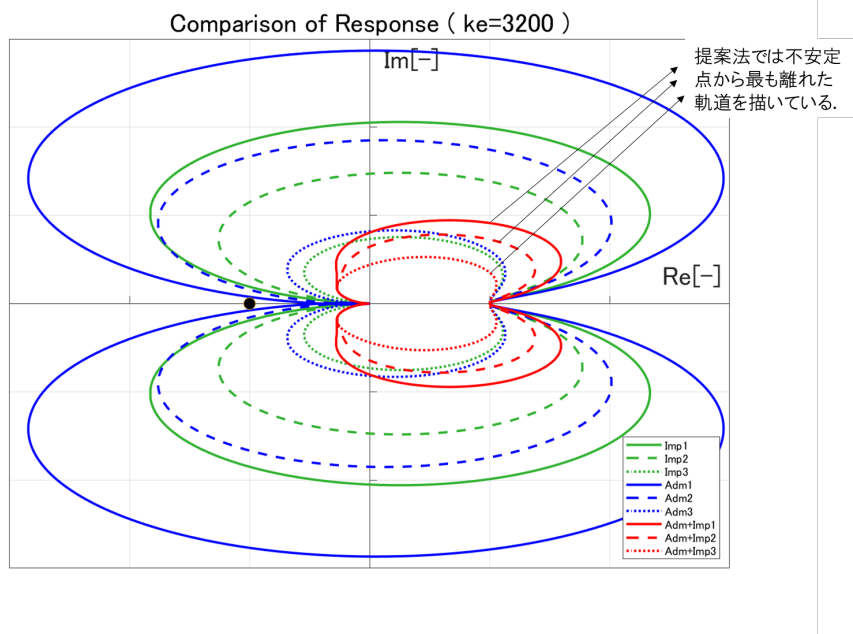


図 2.18: 環境剛性が高剛性 ( $k_e = 3200$ ) の場合の各制御則のナイキスト線図

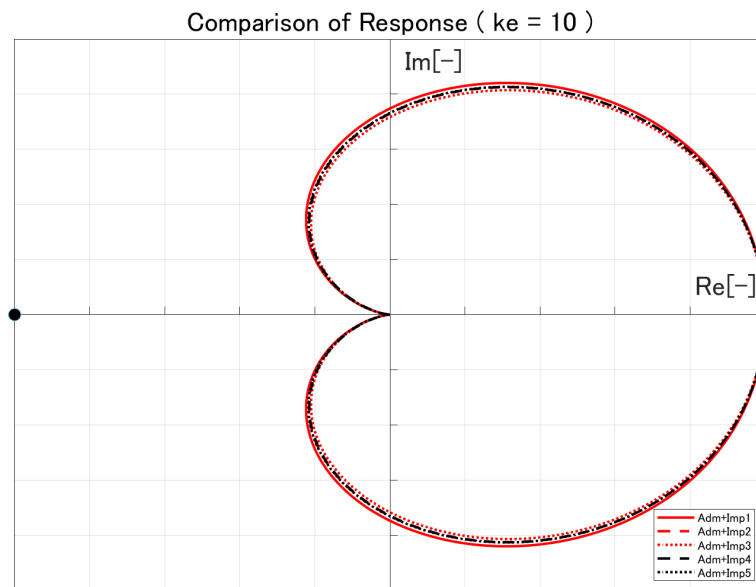


図 2.19: 環境剛性が低剛性 ( $k_e = 10$ ) の場合のアドミッタンス・インピーダンス制御のナイキスト線図 (1)

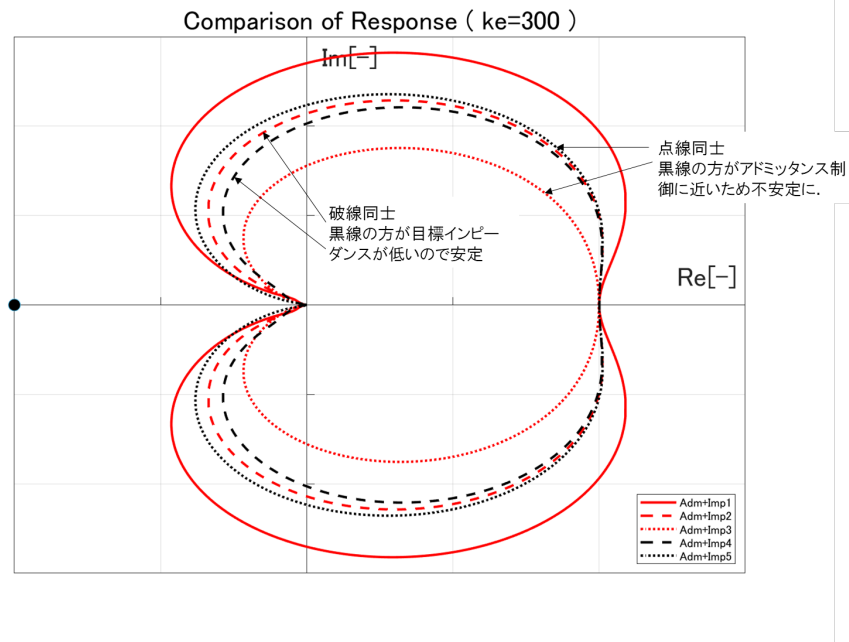


図 2.20: 環境剛性が中剛性 ( $k_e = 300$ ) の場合のアドミタンス・インピーダンス制御のナイキスト線図 (1)

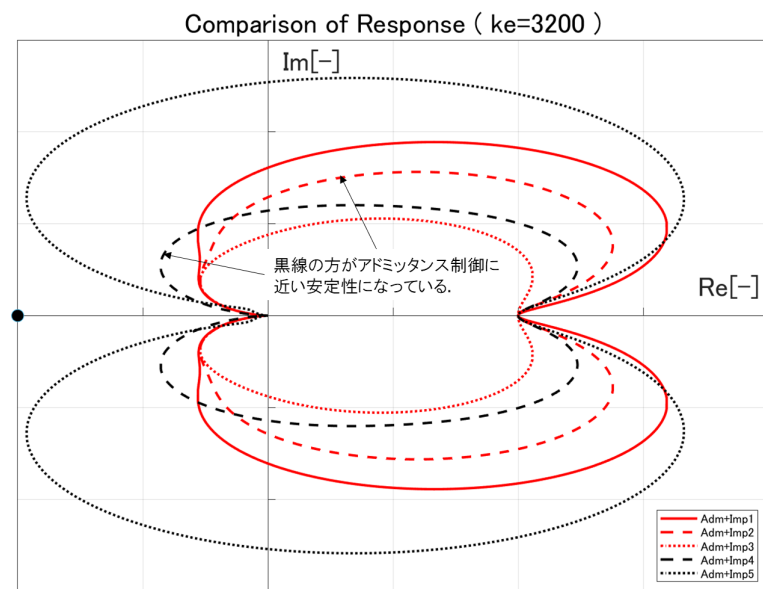


図 2.21: 環境剛性が高剛性 ( $k_e = 3200$ ) の場合のアドミタンス・インピーダンス制御のナイキスト線図 (1)

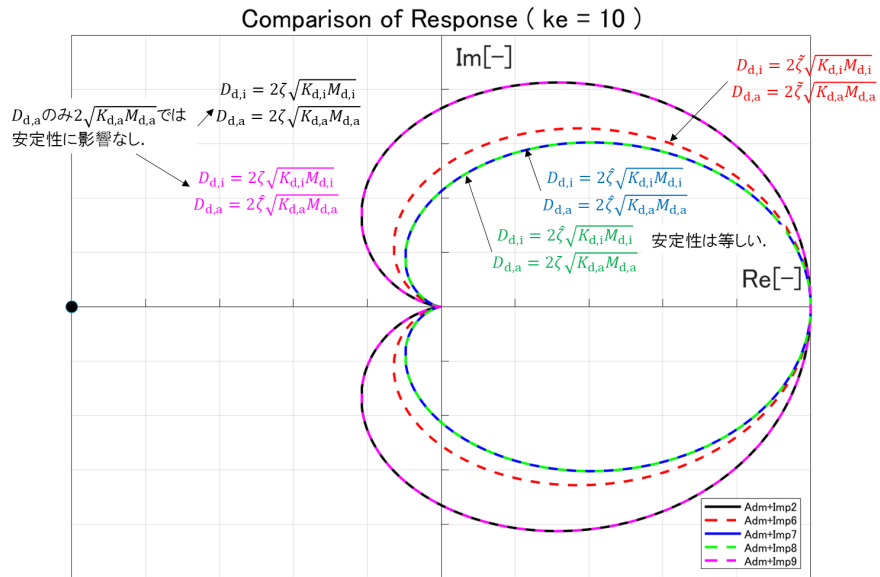


図 2.22: 環境剛性が低剛性 ( $k_e = 10$ ) の場合のアドミッタンス・インピーダンス制御のナイキスト線図 (2)

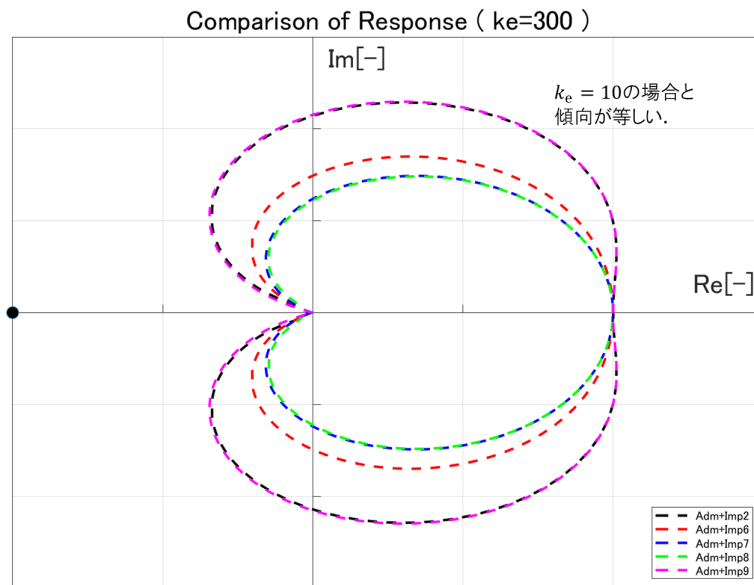


図 2.23: 環境剛性が中剛性 ( $k_e = 300$ ) の場合のアドミッタンス・インピーダンス制御のナイキスト線図 (2)

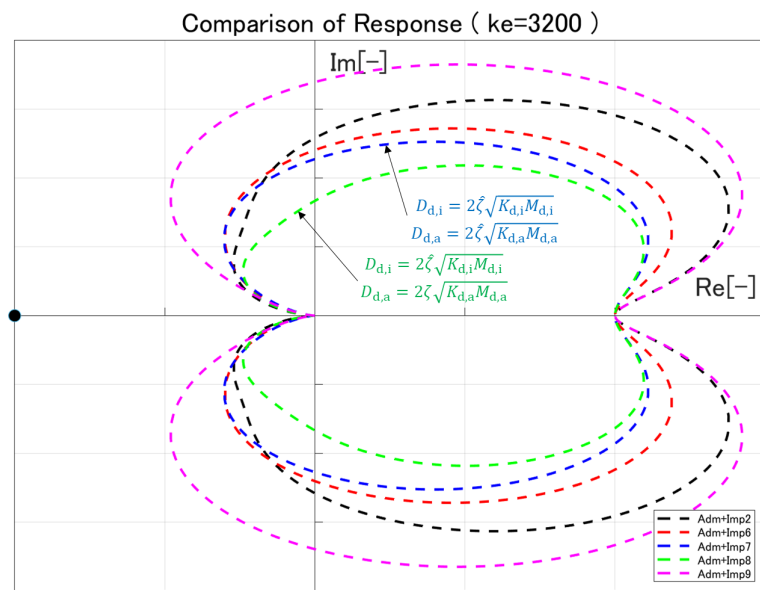


図 2.24: 環境剛性が高剛性 ( $k_e = 3200$ ) の場合のアドミッタンス・インピーダンス制御のナイキスト線図 (2)

## 第3章

# 異方剛性設計によるタスクへの適応

### 3.1 緒言

第二章でアドミッタンス制御とインピーダンス制御を直列に接続したアドミッタンス・インピーダンス制御について、一自由度のシミュレーションおよび実験を通して従来のアドミッタンス制御およびインピーダンス制御よりも高精度かつ安定な力制御であることを示した。しかし、産業分野で用いられるロボットは複数の関節を有しており、タスクに応じて目標剛性等の機械特性を設計する必要がある。また、Anderson らが提案した [25] ハイブリッドインピーダンス制御では力を制御する関節と位置を制御する関節を選択行列を用いることで決定していた。複数の自由度を持つことで、一方向には硬い制御を行い、他方向には柔らかく制御するといったタスクに応じた最適な制御を実現することができる。本章ではこの考え方に注目して、アドミッタンス・インピーダンス制御におけるアドミッタンス側とインピーダンス側の機械特性の独立設計によるタスクの実行を考える。異方剛性とは複数の方向に異なる剛性を実現することである [28][29]。本章では具体的なタスクとして、物体の表面をなぞる「なぞりタスク」を考える。なぞりタスクに必要な要因として、押し付け方向への継続的な力の入力と送り方向への継続的な速度の入力である。本章で述べる力制御は産業分野では金属表面のバリ取りなどで用いられることを想定している。第二章で述べたように、アドミッタンス制御は低剛性環境に、インピーダンス制御は高剛性環境に用いるのが望ましい。なぞりタスクは制御対象であるロボットとワークの接触を伴う作業であるため、ワークへの押し付け方向の制御にアドミッタンス制御を用いた場合には、金属のワークに対しては仮想物体位置が発散してしまい振動的な応答を示してしまう。そのため、押し付け方向の接触を伴う作業ではインピーダンス制御を用いることが望ましい。一方で、送り方向に関しては、インピーダンス制御を用いた場合には、ワー

クとロボットの摩擦による低精度化が生じる可能性があるため、アドミッタンス制御または位置制御を用いることが望ましい。現在の産業分野におけるなぞりタスクでは、接触力を一定に保ちつつ繰り返しなぞり作業を実現するために、押し付け方向はアドミッタンス制御を用いており、送り方向には位置制御を用いている。その際、押し付け方向のアドミッタンス制御は、発振しないように細かく目標粘性等の仮想ダイナミクスを調整している。人とロボットの協調作業を考慮した場合には、人とロボットの接触の際にロボットが柔らかい動作を行うことによる事故の防止の観点から、送り方向に対しても力制御を導入するのが望ましいと考えられるため、送り方向に対してもアドミッタンス制御を利用することを考える。アドミッタンス・インピーダンス制御では、アドミッタンス側とインピーダンス側の剛性をそれぞれ設計することができ、押し付け方向と送り方向に対して目標アドミッタンスおよび目標インピーダンスの柔剛を設計できるため、押し付け方向のアドミッタンス制御特有の跳ね返りを抑制するような目標インピーダンスを設計しつつ、送り方向のインピーダンス制御特有の摩擦による追従性を補完するような目標アドミッタンスを設計することで、精度と安全性を両立することができる。本章では第二章の安定解析にて示した目標アドミッタンスと目標インピーダンスの自由度をもとに、異方剛性を設計可能であるメリットを示すために、二次元におけるアドミッタンス・インピーダンス制御を「剛性楕円」の概念を導入することで提案し、シミュレーションにおいて有用性を示す。

## 3.2 二次元におけるアドミッタンスインピーダンス制御

### 3.2.1 二次元におけるインピーダンス制御およびアドミッタンス制御

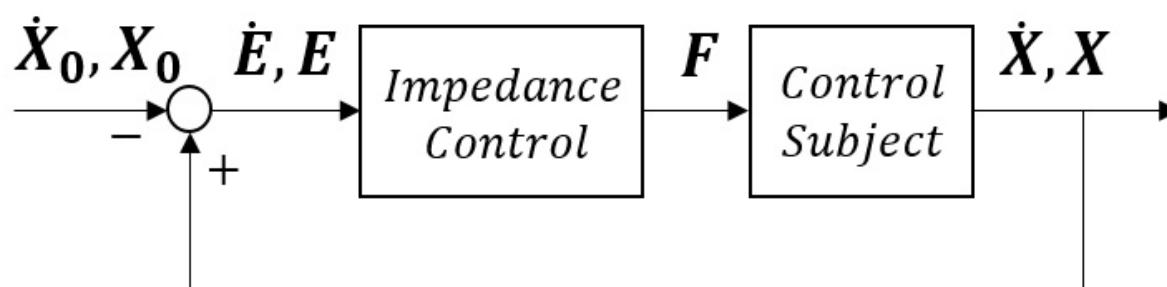


図 3.1: 二次元モデルにおけるインピーダンス制御のブロック線図

アドミッタンス・インピーダンス制御との比較のために用いるインピーダンス制御のブロック線図を図 3.1 に、制御則を式 (3.1) に示す. ここで、 $\mathbf{X}_0$  は手先の目標位置、 $\mathbf{X}$  は手先位置、 $\boldsymbol{\tau}$  はマニピュレータへの入力、 $\mathbf{E} = \mathbf{X} - \mathbf{X}_0$ 、 $\mathbf{J}$  はマニピュレータのヤコビアン、 $\mathbf{D}_i$ 、 $\mathbf{K}_i$  は設計者の与えるマニピュレータの目標粘性、剛性を表した行列である. インピーダンス制御では、この  $\mathbf{D}_i$ 、 $\mathbf{K}_i$  の設計により、マニピュレータの挙動を制御する.

$$\boldsymbol{\tau} = -\mathbf{J}^T \left( \mathbf{D}_i \dot{\mathbf{E}} + \mathbf{K}_i \mathbf{E} \right) \quad (3.1)$$

二次元でのインピーダンス制御を行う場合には、機械インピーダンス ( $\mathbf{M}_i, \mathbf{D}_i, \mathbf{K}_i$ ) を持つ物体の運動を実現するために、計算トルク法を用いることが多いが、モデル化による誤差による制御則への影響および制御対象であるロボットのダイナミクスに左右されないように、本章では用いていない. 次に、アドミッタンス制御のブロック線図を図 3.2 に、制御則を式 (3.2) に、位置制御器の制御則を式 (3.3) に示す. ここで、 $\mathbf{F}_{ext}$  は手先に加わる外力、 $\mathbf{X}_d$  はアドミッタンス制御における仮想物体位置、 $\mathbf{E}_d = \mathbf{X}_d - \mathbf{X}$ 、 $\mathbf{M}_a$ 、 $\mathbf{D}_a$ 、 $\mathbf{K}_a$  は設計者の与える仮想物体の慣性、粘性、剛性を表す行列である. また、 $k_d$ 、 $k_p$  は位置制御器の D ゲイン、P ゲインである.

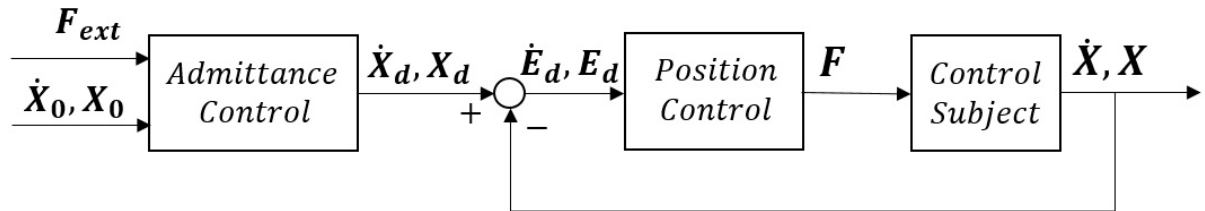


図 3.2: 二次元モデルにおけるアドミッタンス制御のブロック線図

$$\mathbf{M}_a(\ddot{\mathbf{X}}_d - \ddot{\mathbf{X}}_0) + \mathbf{D}_a(\dot{\mathbf{X}}_d - \dot{\mathbf{X}}_0) + \mathbf{K}_a(\mathbf{X}_d - \mathbf{X}_0) = \mathbf{F}_{ext} \quad (3.2)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}^T \left( k_d \dot{\mathbf{E}}_d + k_p \mathbf{E}_d \right) \quad (3.3)$$

式 (3.3) における P, D ゲインは、仮想物体の運動である式 (3.2) を実現するために高い値で設定される.

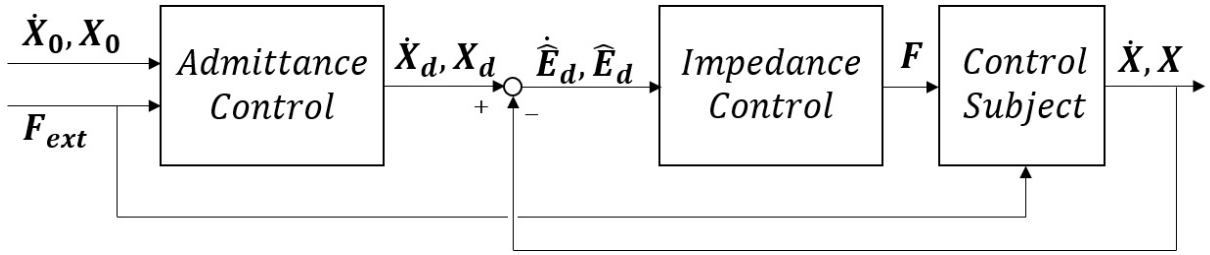


図 3.3: 二次元モデルにおけるアドミッタンス・インピーダンス制御のブロック線図

### 3.2.2 二次元におけるアドミッタンス・インピーダンス制御

第二章において，アドミッタンス制御，インピーダンス制御を単体で用いる場合より剛性の変化する環境に対して適応可能な制御則であるアドミッタンス・インピーダンス制御を提案した．アドミッタンス制御とインピーダンス制御を直列に配置することで，アドミッタンス制御の高剛性環境との接触時の不安定化とインピーダンス制御の低剛性環境での位置精度の問題を解決し，振動を抑制しつつも位置精度の良い制御則を提案した．一自由度系についてはシミュレーションおよび実験を通して，アドミッタンス・インピーダンス制御の性能について述べたが，アドミッタンス・インピーダンス制御に異方剛性の考え方をを用いることで，産業分野での実用を考慮した力制御を提案する．本研究で用いる二次元でのアドミッタンス・インピーダンス制御のブロック線図を図 3.3 に示す．ここで， $\hat{E}_d = X_d - X$  である．図 3.3 からわかるように，外力を入力としてアドミッタンス制御により設計者の与える機械アドミッタンスを持つ仮想物体のダイナミクスを介して仮想物体速度および位置を出力し，その速度および位置に対して機械インピーダンスを満たすような手先力をインピーダンス制御により出力する．また，式 (3.4),(3.5) に提案手法のアドミッタンス制御部分，およびインピーダンス制御部分の制御則を示す．

#### Admittance part

$$M_{d,a}(\ddot{X}_d - \ddot{X}_0) + D_{d,a}(\dot{X}_d - \dot{X}_0) + K_{d,a}(X_d - X_0) = F_{ext} \quad (3.4)$$

#### Impedance part

$$F = J^T (D_{d,i} \dot{\hat{E}}_d + K_{d,i} \hat{E}_d) \quad (3.5)$$

ここで、 $M_{d,a}$ 、 $D_{d,a}$ 、 $K_{d,a}$  はアドミッタンス制御における仮想物体の慣性、粘性、剛性、 $D_{d,i}$ 、 $K_{d,i}$  はインピーダンス制御における所望の手先粘性、剛性を表している。また、 $\hat{E}_d = X_d - X$  である。提案手法の特徴は、機械アドミッタンス ( $M_{d,a}$ 、 $D_{d,a}$ 、 $K_{d,a}$ ) と機械インピーダンス ( $D_{d,i}$ 、 $K_{d,i}$ ) を独立に設計できる点にある。アドミッタンス制御を用いる場合には、位置精度の確保のため最終段の位置制御器のゲインを高くする必要がある。そのため、低剛性環境との接触時や外力が作用しない場合には不安定な挙動を示さないが、高剛性環境との接触や突発的外力が作用した場合には、仮想物体位置の発散に伴う手先の不安定化が考えられる。この問題に対して、最終段の位置制御器をインピーダンス制御に置き換えることで、仮想物体位置の発散に対して、機械インピーダンスを満たすような力が出力されるため、手先の不安定化を防ぐことができる可能性がある。また、インピーダンス制御のみを用いる場合には、摩擦やモデル化できないダイナミクスの影響により位置精度の低下が考えられるが、提案手法ではアドミッタンス制御により摩擦等の外力を考慮した目標位置が用いられるため位置精度の向上が考えられる。本節では二次元へ拡張することにより可能になった異方剛性の考え方をもとに機械インピーダンス、機械アドミッタンスの設計を行う。

### 3.3 シミュレーションでのなぞりタスクの実行

#### 3.3.1 ダイナミクス

本節では、図 3.4 に示すような二次元モデルをもとに力制御の挙動を確認する。二次元モデルは 3 リンク 2 関節からなり、図 3.4 のようにマニピュレータの土台部分に慣性座標系  $\Sigma_0$  の原点を取り、図のように関節角度を  $q_1, q_2$  とした。マニピュレータの運動方程式を式 (3.6) に示す。

$$M_q \ddot{q} + h_q = \tau + J^T F_{\text{ext}} \quad (3.6)$$

ここで、 $M_q$  はマニピュレータの慣性行列、 $q = [q_1, q_2]^T$  はマニピュレータの関節角度、 $h_q$  は非線形項、 $\tau$  はマニピュレータの各関節への入力を成分に持つベクトル、 $J$  はヤコビアン、 $F_{\text{ext}}$  はマニピュレータの手先に作用する外力である。

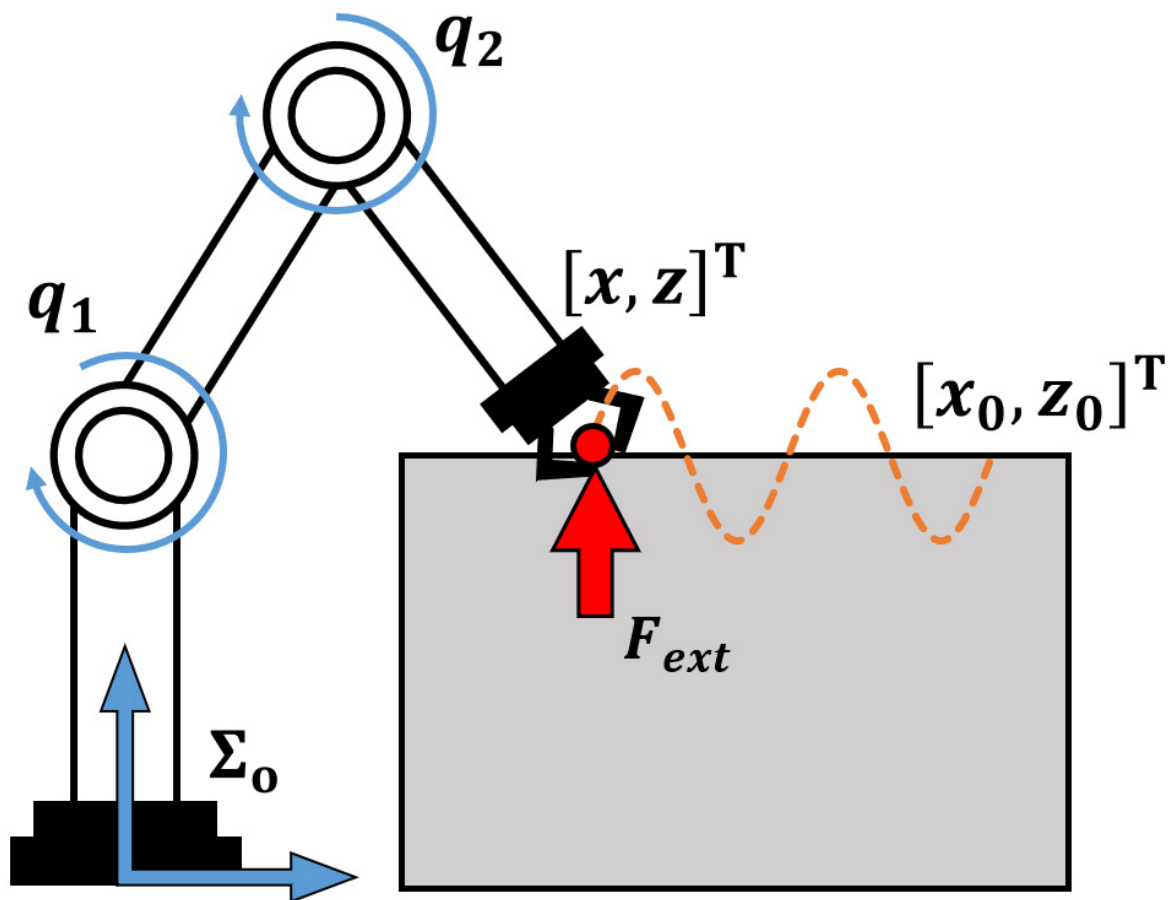


図 3.4: 二次元モデルの概略図

### 3.3.2 シミュレーション条件

図 3.4 に示すように、目標軌道として、あえてマニピュレータの手先が物体内部にめり込むような正弦波軌道を与える．具体的な軌道を式 (3.7) に示す．

$$\mathbf{X}_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \times t \\ b \sin(2\pi t/c) + z_s \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

ここで、 $z_s$  は慣性座標系における物体表面の  $z$  成分であり、 $a, b, c$  はそれぞれ、 $x$  方向の速度、 $z$  方向の振幅、正弦波の周期を表している．また、外力として、物体表面との接触における  $z$  方向への反力および  $x$  方向への摩擦力を仮定しており、式 (3.8) のような外力

を用いている.

$$\mathbf{F}_{\text{ext}} = \begin{bmatrix} -\mu K_z(z_s - z) \\ K_z(z_s - z) \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

ここで,  $\mu$  は動摩擦係数,  $K_z$  は物体表面の硬さを表すゲインとなっている. 式(3.8)のような外力が作用している場合に, 目標軌道への高い追従性と物体へのめり込みに対する安定性を兼ね備えた機械特性の設計が必要となる.

### 3.3.3 異方剛性の設定

本節では, 力制御の比較として, アドミッタンス制御, インピーダンス制御, アドミッタンス・インピーダンス制御を用いるが, それぞれの力制御の機械インピーダンス及び機械アドミッタンスは剛性楕円の考え方をもとに設定した [30]. 剛性楕円はマニピュレータの機械的な構造により決定される手先の剛性を表す楕円である. 本研究では, マニピュレータの実際の手先の剛性楕円については考慮しておらず, 制御則の設計時の所望の機械アドミッタンス, 機械インピーダンスの剛性に関してのみ剛性楕円を用いている. アドミッタンス制御の特徴としては, 無負荷および低剛性環境との接触時の位置精度が高いことが挙げられ, インピーダンス制御の特徴としては, 高剛性環境との接触時にも安定した動作が可能であることが考えられる. そのため, 式(3.7)のような目標軌道を与えた場合には, 機械アドミッタンスは  $x$  方向に硬くし, 機械インピーダンスは  $z$  方向に硬くした方が効果的であると予想される. 二次元のシミュレーションにおける性能評価では式(3.9)のように各制御則での機械特性を決定した.

#### Admittance Control

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_a &= \begin{bmatrix} 1.0 & 0 \\ 0 & 1.0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D}_a = \begin{bmatrix} 10^2 & 0 \\ 0 & 10^2 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{K}_a &= \begin{bmatrix} 10^3 & 0 \\ 0 & 10^2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{k}_p = 10\mathbf{k}_d = \begin{bmatrix} 10^4 & 0 \\ 0 & 10^4 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (3.9)$$

## Impedance Control

$$D_i = \begin{bmatrix} 10^2 & 0 \\ 0 & 10^2 \end{bmatrix}, \quad K_i = \begin{bmatrix} 10^2 & 0 \\ 0 & 10^3 \end{bmatrix}, \quad (3.10)$$

## Admittance and Impedance Control

$$M_{d,a} = M_{d,i} = \begin{bmatrix} 1.0 & 0 \\ 0 & 1.0 \end{bmatrix}, \quad K_{d,a} = \begin{bmatrix} 10^3 & 0 \\ 0 & 10^2 \end{bmatrix}, \quad (3.11)$$

$$K_{d,i} = \begin{bmatrix} 10^2 & 0 \\ 0 & 10^3 \end{bmatrix}, \quad D_{d,a} = D_{d,i} = \begin{bmatrix} 10^2 & 0 \\ 0 & 10^2 \end{bmatrix},$$

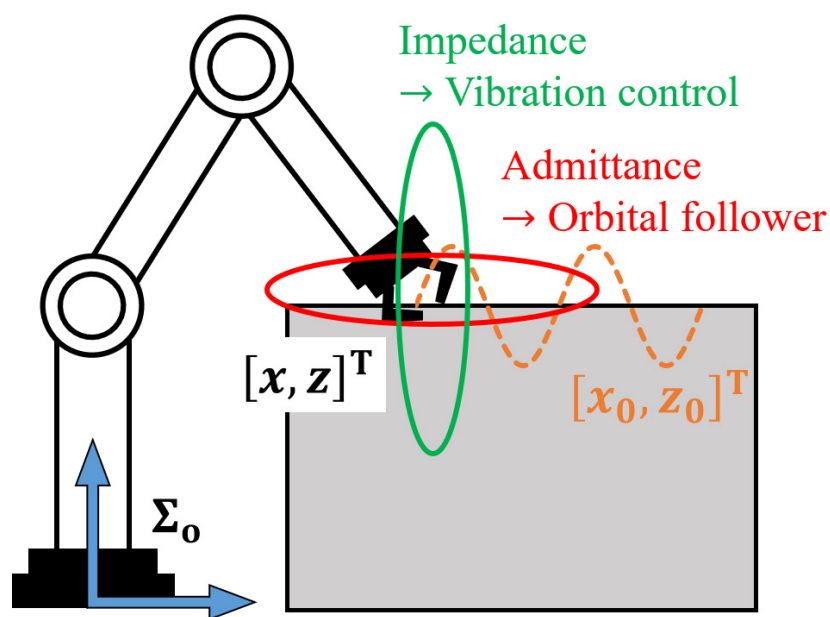


図 3.5: 剛性楕円の概念および目標軌道の概略図

剛性楕円のイメージをアドミッタンス・インピーダンス制御を例にして図 3.5 に示す。図 3.5 のようにアドミッタンス部分、インピーダンス部分の剛性を決定することで、インピーダンス制御のみでは不足する  $x$  方向への位置精度を補いつつ、 $z$  方向への仮想物体の発散にも対応することができる。

### 3.3.4 二次元シミュレーション結果および考察

図 3.6, 3.7, 3.8 に各制御則の  $x$  方向,  $z$  方向の変位および  $z$  方向の力を比較している. 図 3.6 の  $x$  方向の各制御則での変位をみると分かるように, アドミッタンス制御, インピーダンス制御では,  $t = 2.5[\text{s}]$  で目標軌道  $x_0$  からの誤差が大きくなっているのが分かる. また, アドミッタンス制御では, 高いゲインの位置制御器の影響により応答が振動的になっている. 一方で, 提案手法であるアドミッタンス・インピーダンス制御では誤差を低減できている.  $t = 5.0[\text{s}]$  付近ではアドミッタンス制御, インピーダンス制御の方が誤差は小さいものの, 全体を通しての誤差については提案手法の方が小さいことが分かる. これは, アドミッタンス制御における仮想物体のダイナミクスを介することによる外力を考慮した目標位置生成と, 最終段のインピーダンス制御による振動抑制の効果が発揮されたためであると考えられる.

次に, 図 3.7 の  $z$  方向の各制御則での応答を比較する.  $t = 0 \sim 2.5[\text{s}]$  では, 目標軌道  $z_0$  が物体表面より  $z$  方向に存在するため外力を受けることなく動作でき, アドミッタンス制御およびインピーダンス制御では目標軌道への高い追従性が確認できる. しかし,  $t = 2.5 \sim 5.0[\text{s}]$  の物体内部への目標軌道のめり込み期間では, 物体から手先への反力に順応することなく物体内部への手先の侵入が見られた. また, アドミッタンス制御においては  $x$  方向変位と同様に振動的な応答が見られた. 一方で, 提案手法では, アドミッタンス制御およびインピーダンス制御単体で用いる場合に比べて目標軌道からの遅れが大きいことが見受けられるものの,  $t = 2.5 \sim 5.0[\text{s}]$  の期間においても, 物体内部に侵入することなく表面をなぞるような動作を行うことができている. これは, 物体表面からの反力に応じて仮想物体位置を出し, その位置に対して機械インピーダンスを満たす手先位置を出力するといった二段階の制御設計による利点であると考えられる. また, 独立して機械アドミッタンスと機械インピーダンスを剛性楕円を用いて設計することで, アドミッタンス制御, インピーダンス制御の得意とする方向にそれぞれの利点を生かすことができたこともなぞり作業の実現に寄与していると考えられる.

最後に, 図 3.8 の  $z$  方向の各制御則での力について比較する. 図 3.8 からわかるように,  $t = 2.5 \sim 5.0[\text{s}]$  において, アドミッタンス制御, インピーダンス制御では大きな反力が出ているのに対して, 提案手法ではその 1/50 程度の力しか加わっていないことが分かる.

これは、提案手法の機械インピーダンスの設計における外力に馴染む制御による影響であると考えられる。以上の結果から、提案手法を用いることにより、二次元の系におけるアドミッタンス・インピーダンス制御の有用性を示すことができた。

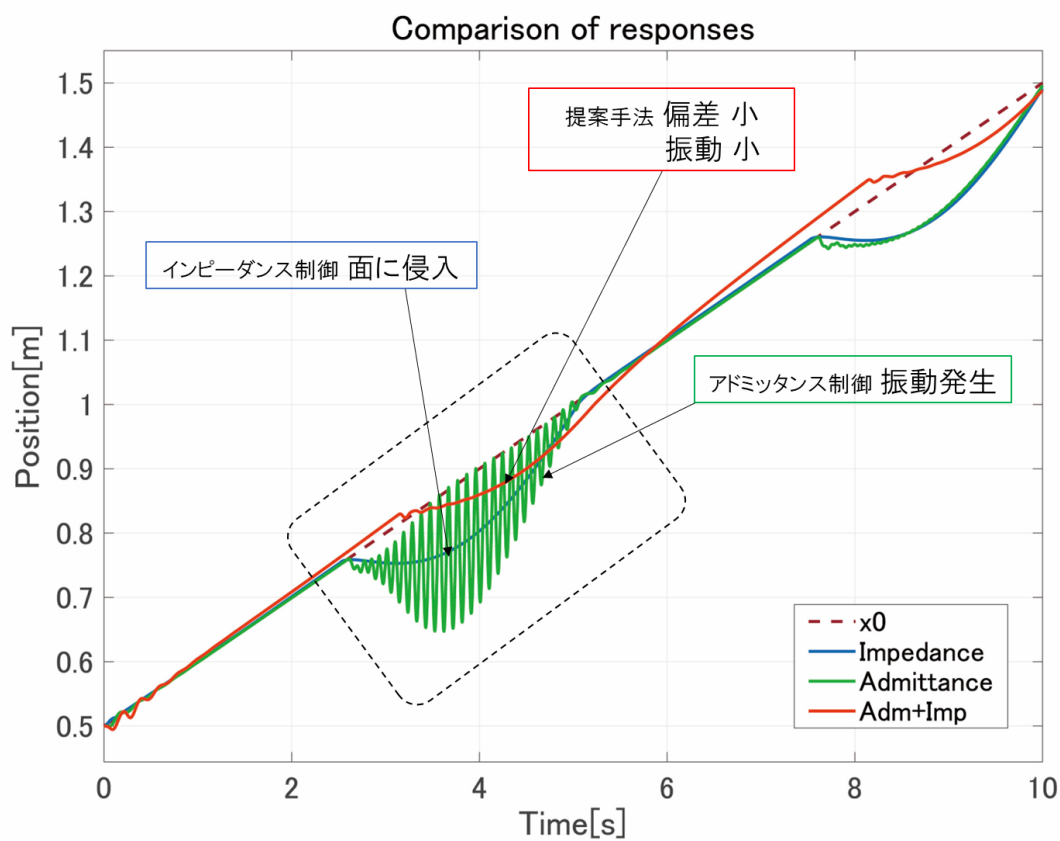


図 3.6: 手先の  $x$  方向の時間変化

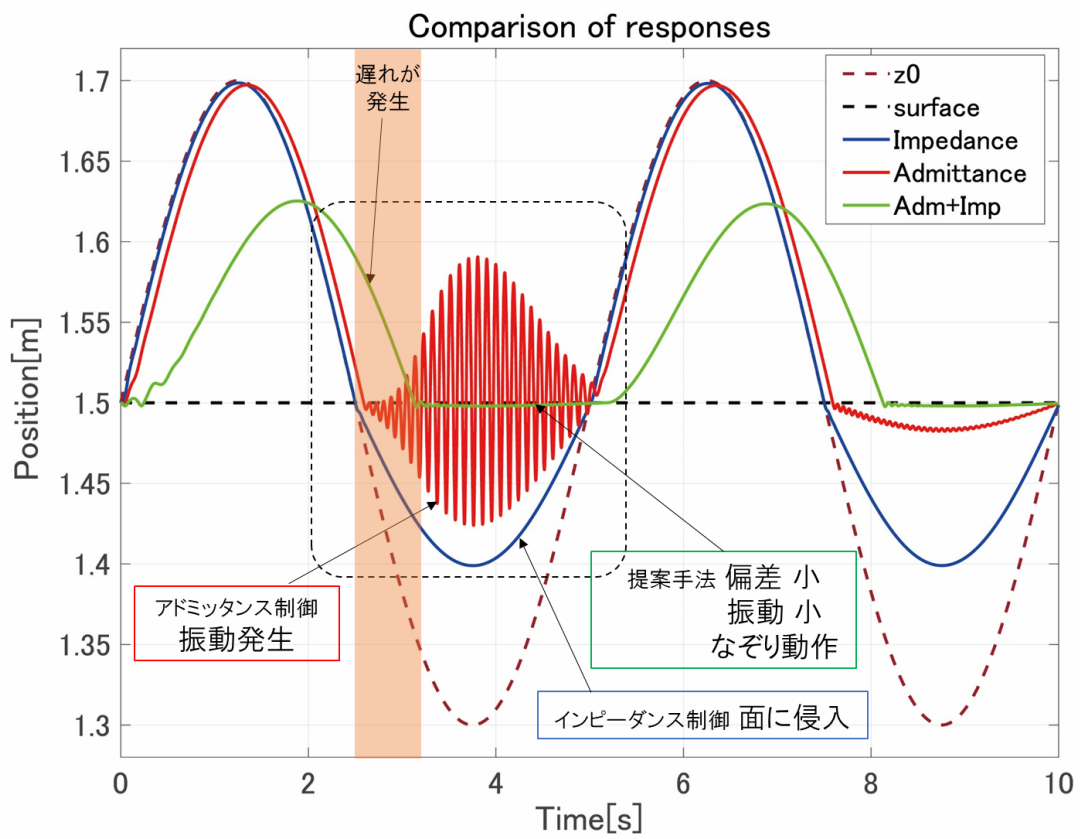


図 3.7: 手先の  $z$  方向の時間変化

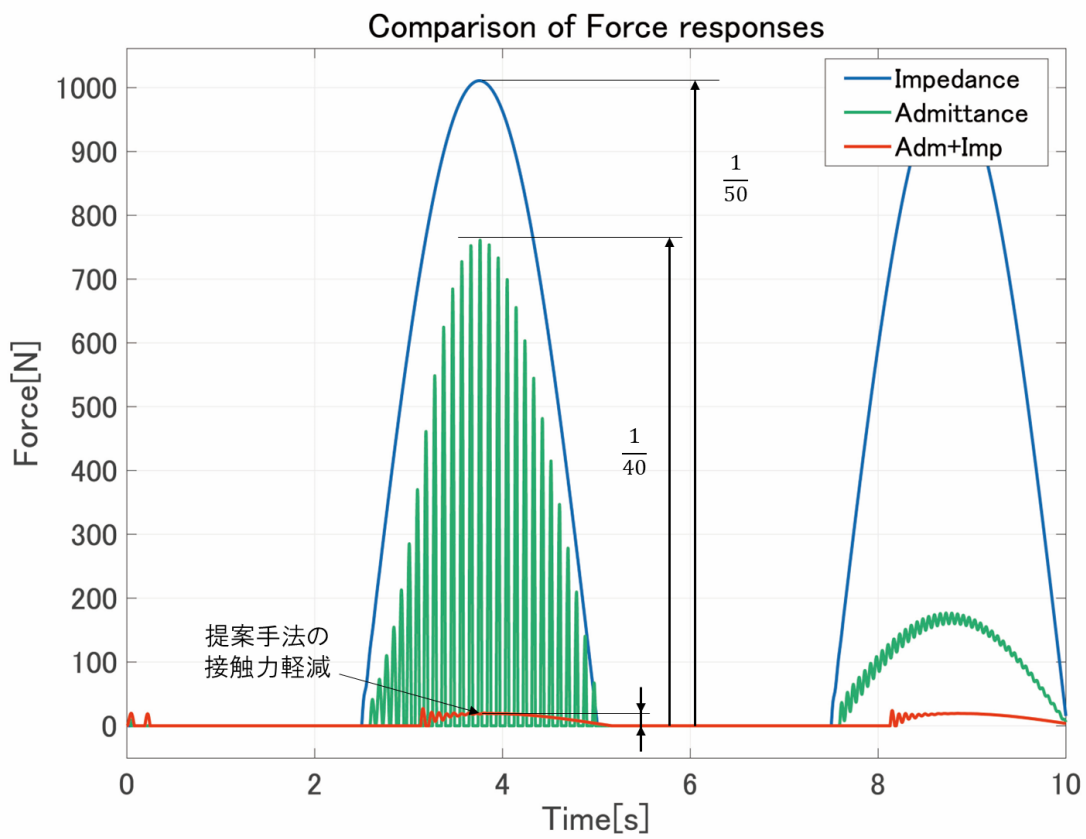


図 3.8: 各制御則の力応答の時間変化

### 3.4 結言

本章では，第二章で提案したアドミッタンス・インピーダンス制御において，異方剛性の考え方から，なぞりタスクによる振動軽減効果を示した．アドミッタンス・インピーダンス制御は直列接続であるという特徴上，アドミッタンス側での不安定性をインピーダンス制御で吸収することができる．目標軌道と実際の接触面の情報が異なる場合，シミュレーション結果でも示した通り，アドミッタンス制御では繰り返し接触が起きる不安定な挙動が確認されるも，アドミッタンス・インピーダンス制御では，過大な接触力が発生することなくなぞり作業が可能であった．さらに，インピーダンス制御では面への侵入が確認されたが，アドミッタンス・インピーダンス制御では，接触面からの反力に順応して，面に押し付けながら追従させることができた．アドミッタンス・インピーダンス制御では，接触時の過大力を防止することができ，ロボットの破損などの危険性を排除することができる．

## 第4章

### まとめと今後の展望

本研究では、剛性の変化する環境に対しても外力による影響に左右されない安定した力制御の実現を目指し、速度と力の関係を基にした力制御であるアドミッタンス制御とインピーダンス制御を直列に組み合わせたアドミッタンス・インピーダンス制御という力制御を提案した。本章では本論文の総括として、一自由度系でのシミュレーションおよび実験の結果をまとめるとともに、今後の研究の展望について述べる。

#### 4.1 まとめ

1. 基礎研究としてバネによる外力の作用する環境で、従来の力制御 (アドミッタンス制御, インピーダンス制御) で振動的になる場合でも振動が軽減されるような力制御を提案した。

一自由度系でのシミュレーションを通して、理想環境でのアドミッタンス・インピーダンス制御の有用性を示した。低剛性から高剛性の環境まで外力 (バネ定数) を変化させてシミュレーションを行ったが、低剛性環境ではアドミッタンス制御と同等、中、高剛性ではアドミッタンス制御およびインピーダンス制御よりも目標位置との偏差が小さく、振動振幅も小さいという結果を得ることに成功した。また、理想環境ではあるものの、剛性の変化する環境において、単一のパラメータセットで高い制御性能を発揮することができた。これにより、人とロボットが協調作業をする場面においても、タスクに対しては高精度に応答し、人との接触に対しては安全に稼働することができるようになったため、産業分野での人協働ロボットの導入に貢献できた。

2. 実機への導入を想定して、力センサの遅れやモータの制限のかかるような系での制御則比較を基に、実機でのロバスト性について示した。

一自由度系ではあるが、ボールねじを用いて、バネの力が外力として作用する環境で動作させることで、力センサの遅れやモータのトルク制限に対してのロバスト性を示した。学術分野では広く研究されている力制御が産業分野で使われない理由の一つである力センサの遅れや破損のリスクに対しても、実機検証を行うことで障壁を取り除くことができた。アドミッタンス制御およびインピーダンス制御も同様に実験することで、「アドミッタンス制御の高剛性での不安定化」および「インピーダンス制御の摩擦による低精度化」を同時に示すことができたため、アドミッタンス・インピーダンス制御のロバスト性の裏付けができた。

3. 異方剛性の利用による、複数の方向に対しての追従性および安定性を持つ力制御であることを示した。

異方剛性の設計として、シミュレーションではあるが二次元のなぞりタスクを基にアドミッタンス・インピーダンス制御の剛性楕円を用いた振動軽減および高精度化について示すことができた。産業分野で稼働するロボットは、基本的にはティーチングによる軌道の生成が行われるが、目標軌道の調整が困難な場合でも安定した制御が可能であることを第三章で示した。目標軌道の途中で障害物に接触するような困難な状況でも、過大力が出ることなく接触面をなぞる動作を実現できたため、金属表面を研磨する作業やバリ取り作業などの場面で有効な制御であることを示すことができた。

## 4.2 今後の課題

本研究の結果より、アドミッタンス・インピーダンス制御を産業分野で実現するためには以下の項目について更なる検証が必要であると考えられる。

1. 多軸のロボットアームを用いたなぞり作業の実験

本研究ではシミュレーションまでの検討となったなぞり作業のような「押し付けながら進む」タスクに対して、冗長性を持つマニピュレータを用いた場合の安定性および精度について検討する必要がある。押し付けの目標力を陽に与え、一連のなぞり作業の中で継続的に目標力を保っているか、作業途中で障害物に接触した際の障害物が受ける接触力が一定の範囲内に収まるかどうかといった評価項目を基に実験を行う必要がある。

## 2. 表面粗さの異なる接触面や、凹凸面との接触に対するロバスト性の検証

多自由度のマニピュレータを用いてなぞり作業をする場合に、接触面の表面情報(主に摩擦)が変化した場合にも、設計パラメータを変更せずに安定した動作が可能かの実験が必要である。本研究では、一自由度系では外力を変化させて外部環境の剛性の変化を考慮したが、連続的な力だけでなく摩擦のような不連続な力の入力に対してもロバスト性を補償できるかを検証する必要がある。

## 3. 多次元のモデルの安定解析を基にした剛性楕円の設計方針の決定

本研究では、なぞりタスクに着目して押し付け方向には機械アドミッタンスを柔らかくし、機械インピーダンスを硬く、送り方向に対しては機械アドミッタンスを硬くし、機械インピーダンスを柔らかくすることで精度と振動軽減を実現したが、把持して回転させるタスク(ドアノブ回しやクランク回し)や作業する面自体が動く場合の力制御といったほかのタスクに対して、安定解析等を通して理論的な設計方針の決定を行う必要がある。

# 謝辞

本研究を遂行するに当たり，多大なるご支援とご鞭撻をいただいた，九州大学工学研究院の田原健二教授に深く感謝いたします。また，本論文の副査をご担当いただきました，九州大学システム情報科学研究院の倉爪亮教授，九州大学工学研究院の山本元司教授からのご指導，ご支援に，深く感謝いたします。本研究へ多くのアドバイスを下さった，九州大学工学研究院の中島康貴准教授に深く感謝いたします。また，本研究を遂行するために諸手続きなどで大変お世話になりました荒木純子様にも深く感謝いたします。研究に行き詰まったときさまざまな支援をして下さった，九州大学ヒューマンセンタードロボティクス研究室の学生諸君に深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Mariagrazia D, Alexander F, Marek M, and Carla S (2017) Advanced control in factory automation: a survey. *International Journal of Production Research* 55(5):1244-1259
- [2] Kelvin T E (1996) Inovative Experiments For Undergraduate Factory Automation. *IFAC Proceedings Volumes* 29(1): pp 2991-2996
- [3] Leonel R, Sylvain C, Darwin G. C, Pablo Jim ´enez, and Carme T (2016) Learning Physical Collaborative Robot Behaviors From Human Demonstrations. *IEEE Transactions on robotics* 32(3):513-524
- [4] 村山 英之, 藤原 弘俊, 武居 直行, 鈴木 太志, 柴田 篤志, 鴻巣 仁司, 松本 邦保, 藤本 英雄 (2012) 人と協働する自動車組み立てラインのウィンドウ搭載支援ロボット *日本ロボット学会誌* Vol.30 No.1 pp 45-46.
- [5] Yi S, Shuang S, Xinquan L, and Hongliang R (2016) A Miniature Soft Robotic Manipulator Based on Novel Fabrication Methods. *IEEE Robotics and Automation Letters* 1(2):617-623.
- [6] Michele G, Federico R, Gabriele F, and Cecilia L (2013) A Feed-Forward Neural Network Learning the Inverse Kinetics of a Soft Cable-Driven Manipulator Moving in Three-Dimensional Space. In: *Proceedings of the 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp 5033-5039.
- [7] Michele G, Federico R, Marcello C, Andrea A, Gabriele F, and Cecilia L (2012) A Two Dimensional Inverse Kinetics Model of a Cable Driven Manipulator Inspired by

- the Octopus Arm. In: Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp 3819-3824.
- [8] Federico R, Michele G, Marcello C, Matteo C, and Cecilia L (2014) Dynamic Model of a Multibending Soft Robot Arm Driven by Cables. *IEEE Transactions on Robotics* 30(5):1109-1122.
- [9] Giannaccini E M, Georgilas I, Horsfield I, Peiris H B, Lenz A, Pipe G A, Dogramadzi S (2014) A variable compliance, soft gripper. *Autonomous Robots* 36(1-2):93-107.
- [10] Chen G, Guo S, Hou B, and Wang J (2020) Fractional Order Impedance Control. *IEEE Access* vol 8, pp 48904-48916.
- [11] Kang G, Oh S H, Seo K J, Kim U, and Choi R H (2019) Variable Admittance Control of Robot Manipulators Based on Human Intention. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 24(3):1023-1032.
- [12] Alexandre L, Boris M, and Clement G (2012) Variable admittance control of a four-degree-of-freedom intelligent assist device. In: Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp 3903-3908.
- [13] Landi C T, Ferraguti F, Sabattini L, Secchi C, and Fantuzzi C (2017) Admittance Control Parameter Adaptation for Physical Human-Robot Interaction. In: Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp 2911-2916.
- [14] Kronander K, and Billard A (2016) Stability Considerations for Variable Impedance Control. *IEEE Transactions on Robotics* 32(5):1298-1305.
- [15] Neville Hogan (1985) Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part I - Theory. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 107:1-7.
- [16] Kosuge K, Furuta K and Yokoyama T (1987) Mechanical Impedance Control of a

- Robot Arm by Virtual Internal Model Following Controller. In: Proceedings of IFAC 10th World Congress on Autonomous Control, vol.4, pp.250-255, 1987
- [17] Lu WS, and Meng QH (1991) Impedance control with adaptation for robotic manipulations. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 7(3):408-415.
- [18] Park H J and Chung H (1999) Hybrid Control for Biped Robots Using Impedance Control and Computed-Torque Control. In: Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp 1365-1370.
- [19] Biagiotti L, Liuz H, Hirzinger Z G, Melchioni C (2003) Cartesian Impedance Control for Dexterous Manipulation. In: Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems, pp 3270-3275.
- [20] Yoo S, Lee W, and Chung K W (2014) Impedance Control of Hydraulic Actuation Systems With Inherent Backdrivability. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 24(5):1921-1930.
- [21] Kikuuwe R (2019) Torque-Bounded Admittance Control Realized by a Set-Valued Algebraic Feedback. *IEEE Transactions on Robotics* 35(5):1136-1149.
- [22] Yao B, Zhou Z, Wang L, Xu W, Liu Q, Liu A (2018) Sensorless and adaptive admittance control of industrial robot in physical human – robot interaction. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* vol 51:158-168.
- [23] Chen H W, Yang J, Guo L, and Li S (2016) Disturbance-Observer-Based Control and Related Methods - An Overview. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 63(2):1083-1095.
- [24] Ott C, Mukherjee R, Nakamura Y (2015) A Hybrid System Framework for Unified Impedance and Admittance Control. *Journal of Intelligent & Robotic Systems* vol 78, pp 359-375.

- [25] Anderson R J, Spong M W (1988) Hybrid impedance control of robotic manipulators. IEEE International Conference on Robotics and Automation 4(5):549-556.
- [26] Kaneko T, Ogata K, Sakaino S, and Tsuji T (2015) Impact Force Control Based on Stiffness Ellipse Method Using Biped Robot Equipped with Biarticular Muscles. In: Proceedings of the 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems, pp 2246-2251.
- [27] Baumgarte J (1972) Stabilization of constraints and integrals of motion in dynamical systems. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering vol 1, pp 1-16
- [28] 中村 幸博, 谷江 和雄, 前川 仁 (1993) 多指ハンドによる把持物体剛性制御 (第1報, 制御構造の提案と評価実験). 日本機械学会論文集 (C編) 59巻 566号 pp 232-239
- [29] 田所 諭 (1992) パラレルメカニズムの制御. 日本ロボット学会誌 Vol.10 No.6 pp 721-726
- [30] F. A. Mussa-ivaldi, N. Hogan, E. Bizzi (1985) Neural, Mechanical, and Geometric Factors Subservicing Arm Posture in Humans. The Journal of Neuroscience Vol.5 No.10 pp.2732-2743