

平成 28 年度 修士学位論文

モータを付加した直列弾性駆動システムの速度飽和を  
考慮したインピーダンス制御に関する研究

指導教員 池浦良淳 教授

三重大学大学院工学研究科

博士前期課程 機械工学専攻

システム設計研究室

日下部 恭士

# 目次

第 1 章	1
序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	5
1.3 本論文の構成	6
第 2 章	7
モータを付加した直列弾性駆動システムの 構造及び制御原理	7
2.1 モータを付加した直列弾性駆動システムの構造及び実験装置	7
2.1.1 構造	7
2.1.2 実験装置	9
2.2 制御理論	14
2.2.1 外部環境に接触した際の制御手法	14
2.2.2 外部環境に接触しない際の制御手法	17
第 3 章	19
記述関数を用いた安定性解析	19
3.1 記述関数	19
3.1.1 記述関数の定義	19
3.1.2 記述関数の計算	21
3.2 外部環境に接触する際の安定性解析	24
3.2.1 解析条件	24
3.2.2 解析結果	27
3.3 外部環境に接触しない際の安定性解析	37
3.3.1 解析条件	37
3.3.2 解析結果	40
第 4 章	43
追従性評価	43
4.1 外部環境に接触する場合	43
4.1.1 $H_2$ ノルムの計算	43
4.1.2 計算結果	44
4.2 外部環境に接触しない場合	46
4.2.1 $H_2$ ノルムの計算	46
4.2.2 計算結果	47

第 5 章	49
各手法のシミュレーションにおける比較	49
5.1 外部環境に接触する場合	49
5.1.1 シミュレーション条件	49
5.1.2 シミュレーション結果	50
5.2 外部環境に接触しない場合	53
5.2.1 シミュレーション条件	53
5.2.2 シミュレーション結果	54
第 6 章	63
提案手法の有効性検証	63
6.1 実験条件	63
6.2 実験結果	64
第 7 章	71
結言	71
7.1 まとめ	71
7.2 今後の課題	72
参考文献	73
謝辞	75

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 研究背景

現在，日本は少子高齢化の影響から生産年齢人口の割合が減少し，老年人口の割合が増加している<sup>[1]</sup>．Fig.1.1 に年度別の人口を示す．図中の縦軸は各年度別における年齢別人口の割合を示し，横軸は年度を示す．また，図中赤色は 0～14 歳までを示す年少人口，図中青色は 15～64 歳までの年代を示す生産年齢人口，図中緑色は 65 歳以上の年代を示す老年人口を表している．Fig.1.1 に示されるように，年少人口および生産年齢人口は年々減少し，老年人口は年々増加している．このことから，生産年齢人口が減少し，産業全体の衰退が危惧されるとともに，高齢者福祉に関係した従事者の需要増に対応できない心配がある．そこで，今後の日本では，医療や介護の分野において，人と協調して働くロボットの活躍が期待されている．Fig.1.2 は人とロボットの協調作業例であるロボットによる人の抱き上げ作業風景を示す<sup>[2][3]</sup>．このようなロボットの場合，人を支え，抱き上げる必要があるため，高負荷に耐えられ，かつ大きなトルクを発揮する必要がある．また，人や外部環境と接触した際に安全性への影響が小さいことも必要となる．そのため，ロボットアームの駆動方法や制御方法について様々な手法が提案されてきた<sup>[4][5][6][7]</sup>．一般にロボットが人と協調して働く際に，人との接触時の力の作用を考慮し，低インピーダンスでアームを駆動する方が望ましいとされ，そのためには，ロボットアームにはダイレクトドライブを適用することが望ましいとされている．しかし低インピーダンスの動きをダイレクトドライブのモータのみで行った場合，人を支え，抱き上げが可能な程度の大きなトルクを発揮するモータを使用する必要があるため，モータ自体が大型化してしまい，ロボットに適用できないという課題があった．

そこでモータの小型化のため，高減速比のギアを装着した小型のモータを用いたロボット駆動システムが一般的に使われている<sup>[8]</sup>．この駆動方式の利点として，高減速比のギアを用いることで，小型のモータでも大きなトルクを発揮することが可能であることが挙げられる．また，モータの小型化により広いスペースを必要としないため，介護施設，医療施設や一般家庭へ導入しやすくなることが期待できる．しかし，問題点としては高減速比のギアの摩擦により，位置制御を適用する必要があるということが挙げられる．また，アドミッタンス制御下にあるロボットが高剛性の外部環境と接触した場合に，システムが不安定となる．

そこで、高減速比のギアを用いつつアームの安定性の向上を実現するため、直列弾性駆動システムが採用された<sup>[9][10][11]</sup>。このシステムが採用されたロボットをFig.1.3, Fig.1.4に示す<sup>[10][11]</sup>。直列弾性駆動システムは、アームとアクチュエータの間に弾性要素が使用されていることが特徴となっており、弾性要素が形状変化することにより、高減速比のギアを用いてもアームをやわらかく駆動させられ、複雑な制御系を組むことなく低インピーダンスでの駆動を実現できる。しかし、関節に使用される弾性要素が小さいため、大きなトルクを発揮できず高負荷には対応できないという問題があった。また、ロボットアームと弾性要素の固有振動数が低く、ロボットの運動周波数に近い場合、振動が発生してしまうことや、高減速比のギアによる大きな応答遅れにより振動を抑制するのが難しく、目標インピーダンスが十分に再現されないという問題があった。

以上の問題を解決するために、上記の直列弾性駆動システムにさらにもう一つ別のアクチュエータを付加したシステムが着目されている。このシステムでは入力トルクに対して高減速比のギアを装着したモータで、動力の基礎となるトルクを発生させ、高減速アクチュエータの応答遅れにより不足するトルクを、低減速比のギアを装着したモータにより補償することができる。Rothらはこのアクチュエータを付加した直列弾性駆動システムに対してトルク制御を行うことを提案し、高減速アクチュエータの応答遅れによる安定性の低下を抑制することを実現した<sup>[12][13]</sup>。しかし、上記研究においてもロボットの関節部分に小さい弾性要素が入っており、大きなトルクを発揮できないため、人の抱き上げ動作などの高負荷がかかる作業には対応できないという問題がある。また、上記研究ではシステムに対してインピーダンス制御を適用した場合については評価されていない。

そこで我々の研究室では、高負荷に対応できるよう、弾性要素としてトーションバーを用いたモータを付加した直列弾性駆動システムを構築し、その機構に対してインピーダンス制御を適用することを提案した。本研究の先行研究として、相根らはアクチュエータを付加した直列弾性駆動システムにインピーダンス制御を適用することで、アームの低インピーダンスでの駆動を実現し、直列弾性駆動システムと比較して、応答性が改善されることを示した<sup>[14]</sup>。また、高橋らは弾性要素内にあらかじめエネルギーを蓄積し、ロボットの駆動時にそのエネルギーを解放することにより、アームの応答性が向上することを確認した<sup>[15]</sup>。そして、安田らは根軌跡を用いて、システムが外部環境に接触した際の安定性解析を行い、提案手法の有効性を示した<sup>[16]</sup>。しかし、高減速比のギアの許容速度及び、低減速比のギアを装着したモータによる低減速アクチュエータが発揮できる最大トルクを考慮した安定性については検証されていない。

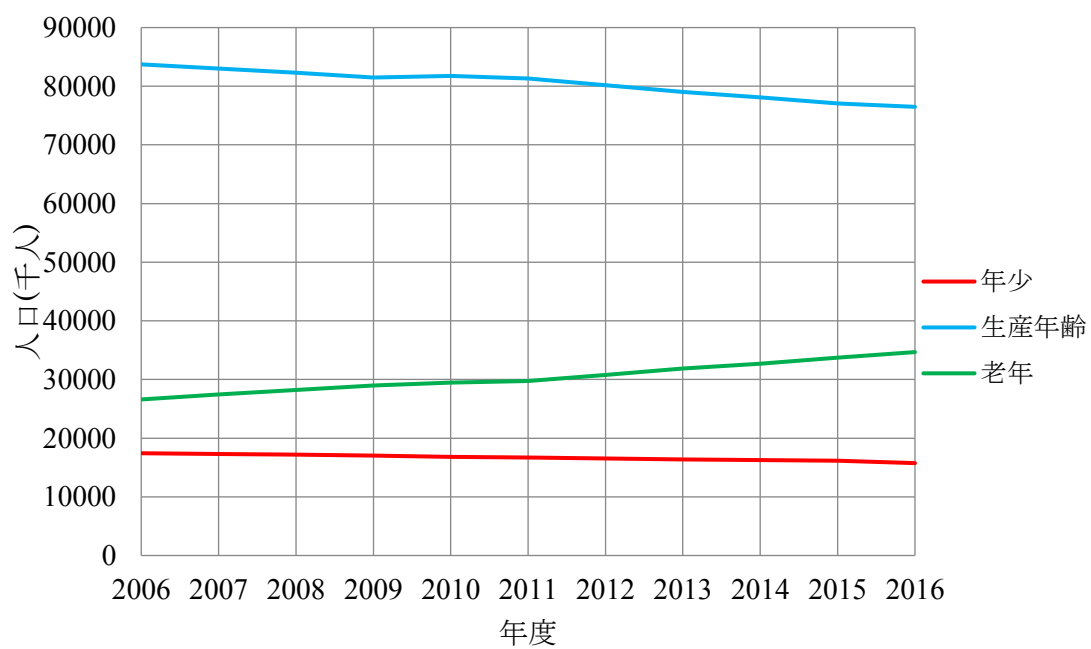


Fig.1.1 日本における各年代別の人口の推移<sup>[1]</sup>



Fig.1.2 ロボットと人の協調作業例:ロボットによる人の抱き上げ作業<sup>[3][4]</sup>

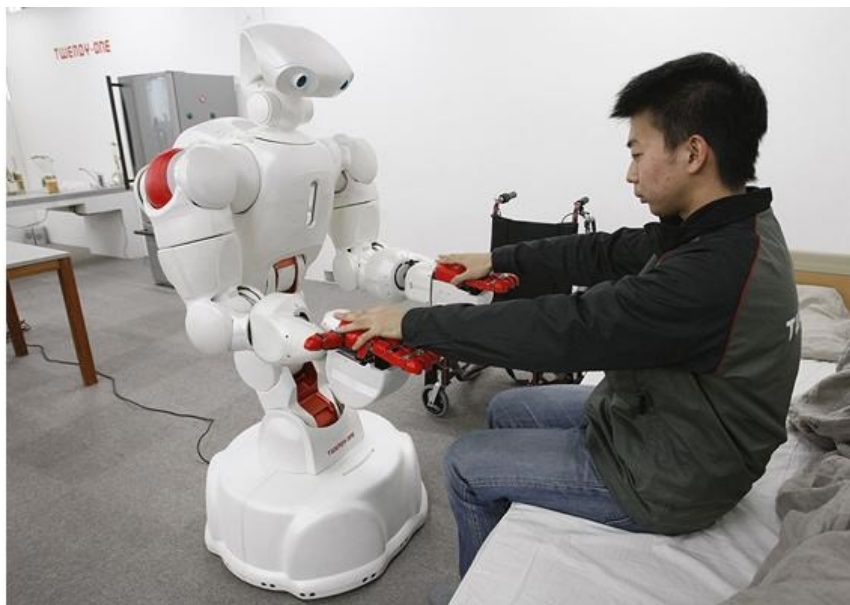


Fig.1.3 直列弾性駆動システム採用ロボット TWENDY-ONE<sup>[10]</sup>



Fig.1.4 直列弾性駆動システム採用ロボット Baxter<sup>[11]</sup>

## 1.2 研究目的

人との協調作業を目的としたロボットに求められるアクチュエータシステムは、高負荷に対応できるよう大きなトルクを発揮することはもちろんであるが、より小型であり、低インピーダンスの動きができ、かつ外部環境と接触した際に高い安定性を有することが求められる。

本研究で用いている高減速比のギアは出力側の許容回転数が低く、入力の指令速度が大きい場合に性能が低下することが考えられる。そのため本研究室の実験装置において、速度が小さい場合にはアームは安定して駆動するが、速度が大きい場合には高減速比のギアの許容速度を飽和してしまい、動きが不安定となる。

先行研究として、安田らは根軌跡を用いたシステムの安定性解析により、提案手法の有効性を確認したが、高減速ギアの許容速度は考慮されていなかった。

そこで、本研究ではモータを付加した直列弾性駆動システムのインピーダンス制御において、高減速ギアの許容速度を考慮した安定性解析を行い、提案手法の有効性を検証することを目的とする。



### 1.3 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。まず第2章で本研究で使用するモータを付加した直列弾性駆動システムの基本構造, 本研究で使用する実験装置及び本機構に適用する制御原理について述べる。第3章では高減速アクチュエータのみの駆動におけるインピーダンス制御, 直列弾性駆動システムにおけるインピーダンス制御及びモータを付加した直列弾性駆動システムにおけるインピーダンス制御でのシステムの安定性解析を行い, 各手法における安定性を比較する。第4章では, 前述の3手法について追従性評価を行い, 結果を比較する。第5章では, これら3手法について3章の安定性解析と同様の条件下で, シミュレーションを行い, 結果を比較する。そして第6章では5章でのシミュレーションと同様の条件で実験装置を駆動させた際の応答性を検証する。最後に, 第7章では本研究のまとめと今後の研究課題について述べる。

## 第 2 章

# モータを付加した直列弾性駆動システムの 構造及び制御原理

本章では本研究で使用する応答補償のためのモータを付加した直列弾性駆動システム及び提案する制御原理について述べる．2.1 節ではモータを付加した直列弾性駆動システムの構造について述べ、2.2 節では本機構に適用するインピーダンス制御手法について述べる．

### 2.1 モータを付加した直列弾性駆動システムの構造及び実験装置

#### 2.1.1 構造

本機構の構成を Fig.2.1 に示す．本機構は、図中の左から高減速アクチュエータ、弾性要素、アーム、低減速アクチュエータで構成されている．高減速アクチュエータは、高減速比のギアと小型のモータで構成し、ギアにおける摩擦が大きい位置制御とし、ここで使用するモータを位置制御モータと呼ぶ．この位置制御モータは弾性要素を通じてアームを駆動させる．ここで使用する弾性要素はゴムメタル製のトーションバーである<sup>[17][18]</sup>．直列弾性駆動システムのように、この高減速アクチュエータとトーションバーだけでアームを駆動させると、使用する位置制御モータの応答遅れによりアームの応答が遅れる問題や、弾性系の特性によりアームを速く駆動できない問題が発生する．そのため、本機構では、低減速アクチュエータで遅れを補償する方式とする．一つのモータと弾性要素で構成される直列弾性駆動システムとの違いは、この低減速アクチュエータを使用する点である．この低減速アクチュエータは、低減速比のギアと小型のモータで構成し、ギアの摩擦が小さいのでトルク制御とする．そして、ここで使用するモータをトルク制御モータと呼ぶ．これら二つのアクチュエータとトーションバーを組み合わせた本機構に、高負荷に対して低いインピーダンスでアームを駆動させるために、インピーダンス制御を適用する．詳しい制御手法は次節で説明する．

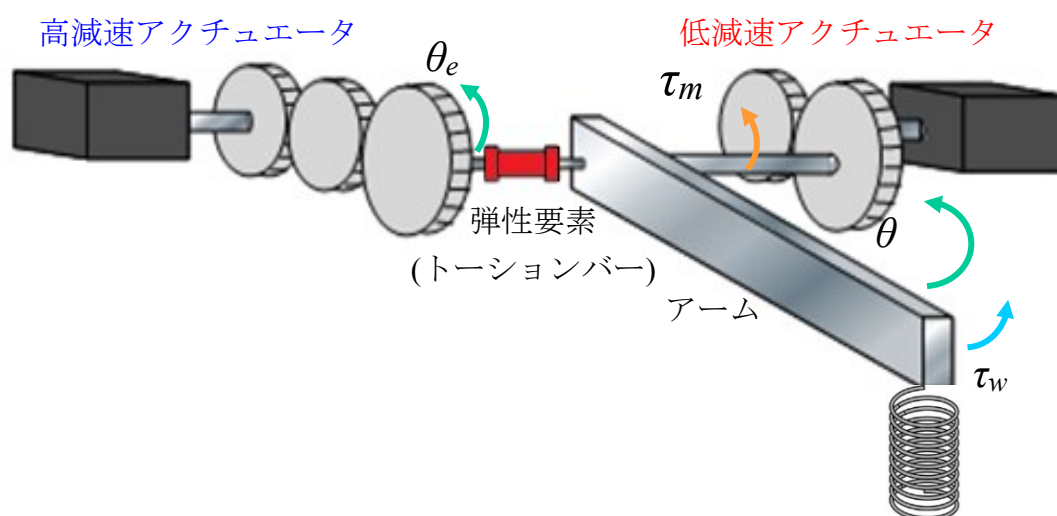


Fig.2.1 本機構の構成

## 2.1.2 実験装置

Fig.2.2 にモータを付加した直列弾性駆動システムの実験装置，Fig.2.2 に本機構の拡大部分，Fig.2.3 に実験装置の構成図を示す．本実験装置の主要構成部品は，位置制御モータ，中空減速機，トーションバー，カップリング，アーム，減速機及びトルク制御モータである．

位置制御モータには，安川電機製の AC サーボモータ SGMJV-02A を使用する．出力は 200W で定格トルクは 0.637[Nm]，瞬間最大トルクは 2.23[Nm]である．この位置制御モータを，ナブテスコ製の中空減速機 RDS-010C-243 に組み込むことで高減速アクチュエータを構成する．この中空減速機は遊星歯車機構で，減速比は 243 である．Table2.1 に高減速アクチュエータで使用する減速機の仕様を示す．また位置制御モータにはエンコーダが搭載されており，パルス数は 2048[P/Rev]である．エンコーダで計測された値は，安川電機製のサーボアンプ SGD V-1R6A を経由して PC に搭載されたインターフェース製のカウンタボード PCI-6205C を介して，PC に入力される．Table2.2 にカウンタボードの仕様を示す．このエンコーダの値は位置制御モータの実際の位置を示しており，PC 内で計算した目標位置とエンコーダで測定した実際の位置の誤差を計算し，必要な指令を出すことにより位置制御が可能である．また，PC からの速度指令は，インターフェース製の D/A ボード PCI-3341A を介してアナログ電圧にてサーボアンプに出力される．Table2.3 に D/A ボードの仕様を示す．

また，トルク制御モータには安川電機製の AC サーボモータ SGMJV-04A を使用する．出力は 400W で，定格トルクは 1.27[Nm]，最大トルクは 4.46[Nm]ある．このトルク制御モータを，椿本チェイン製の PAT-B160S010KP1-E4H に組み込むことで低減速アクチュエータを構成する．ここで使用する減速機も遊星歯車機構で，減速比が 10 である．Table2.4 に低減速アクチュエータで使用する減速機の仕様を示す．このトルク制御モータにもエンコーダが搭載されており，パルス数は 2048[P/Rev]である．エンコーダで計測された値は，安川電機製のサーボアンプ SGD V-2R8A を経由して PC に搭載されたインターフェース製のカウンタボード PCI-6205C を介して，PC に入力される．また，PC からのトルク指令は，インターフェース製の D/A ボード PCI-3341A を介して，アナログ電圧にてサーボアンプに出力される．

高減速アクチュエータとトーションバーとの締結はパワーロックを使用し締結する．また，トーションバーとアームの締結はカップリングを使用して締結しており，アームと低減速アクチュエータは減速機とアームが直接接続している．ここで使用するカップリングは鍋屋バイテック製の MJB-65-RD で，Table.2.5 にカップリングの仕様を示す．アームには試験用のおもりとしてダンベルが取り付けられるようになっており，使用するダンベルは市販品で，最大で 40kg までおもりを装着することができる．アームの全長は 0.6m であり，アームの回転中心からダンベルの取り付け部までの長さは 0.5m であ

る. なお, 安全性を考慮し, アームの最上点及び最下点にストッパーを配置し, 装置全体をアルミフレームで支える構造となっている.

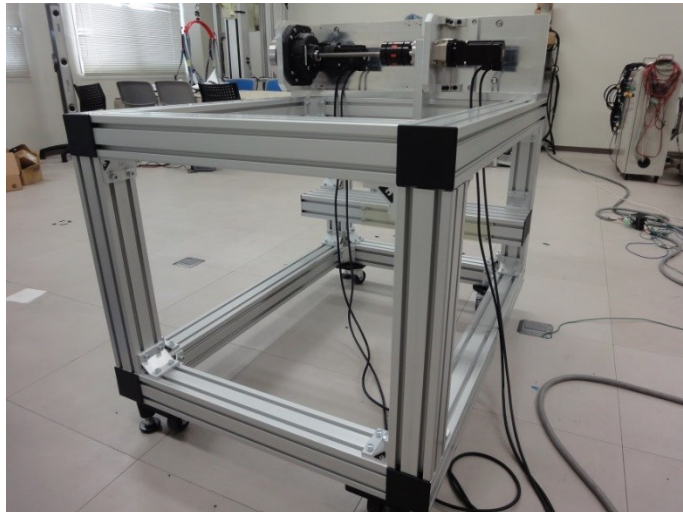


Fig.2.1 実験装置全体図

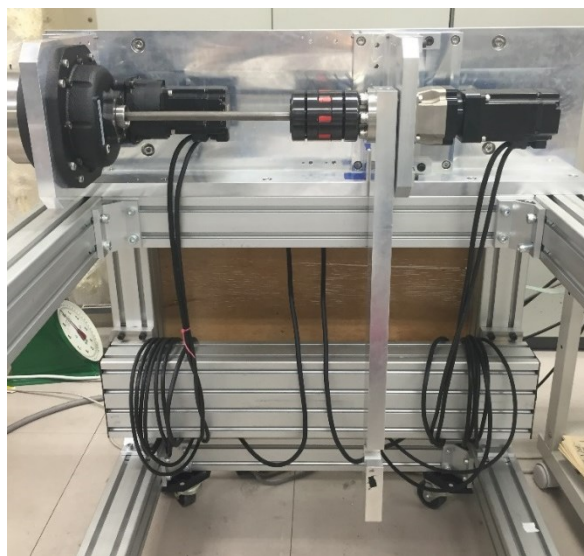


Fig.2.2 本機構部分拡大図

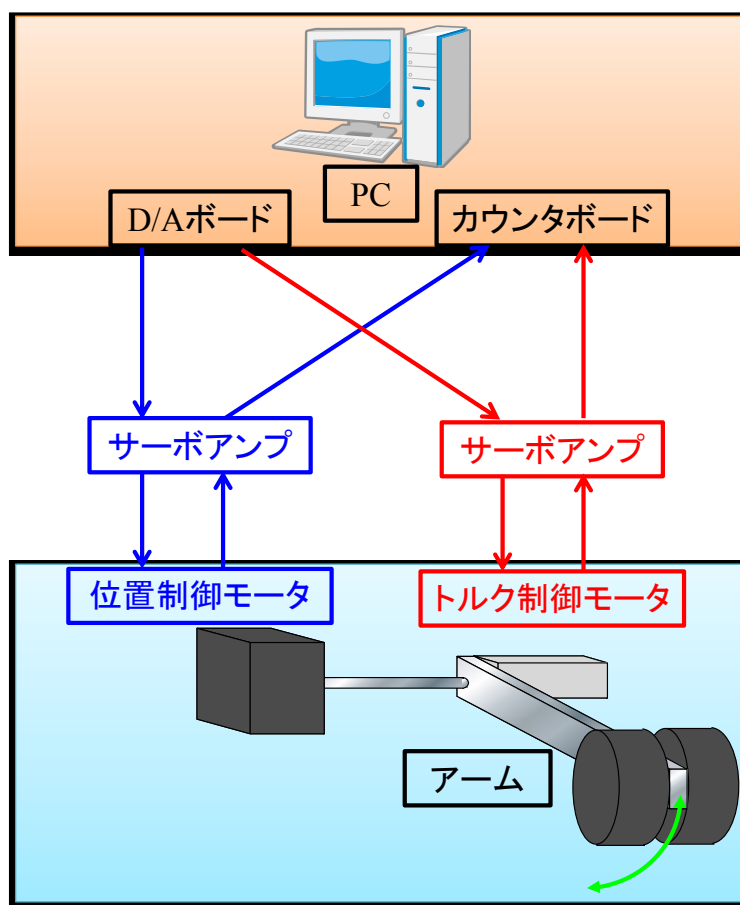


Fig.2.3 実験システム構成図

Table2.1 高減速アクチュエータで使用する減速機 RDS-010C-243 の仕様

定格トルク[Nm]	98
定格出力回転数[r.p.m]	15
瞬間最大許容トルク[Nm]	490
許容入力回転数[r.p.m]	3500
許容出力回転数[r.p.m]	14
バックラッシ[arc.Min]	1.0
ロストモーション[arc.min]	1.0
ばね定数[Nm/arc.min]	47

Table2.2 カウンタボード PCI-6205C の仕様

チャンネル数	8
分解能[bit]	24
最大入力周波数[MHz]	2
電源仕様	DC+5V

Table2.3 D/A ボード PCI-3341A の仕様

チャンネル数	8
分解能[bit]	12
出力レンジ	ユニポーラ:0V~+10V バイポーラ:±5V, ±10V
出力インピーダンス[Ω]	1
セトリングタイム[μs]	10
汎用出力	TTL

Table2.4 低減速アクチュエータで使用する減速機 PAT-B160S010KP1-E4H の仕様

定格トルク[Nm]	22.5
許容最大出力トルク[Nm]	67.5
許容ラジアル荷重[N]	2900
許容スラスト荷重[N]	1450
内部慣性モーメント[kg・cm <sup>2</sup> ]	0.13
定格入力回転速度[r.p.m]	3000
最大入力回転速度[r.p.m]	6000

Table2. 5 カップリング MJB-65-RD の仕様

定格トルク[Nm]	160
最大トルク[Nm]	320
最高回転数[1/min]	14000
慣性モーメント[kg・cm <sup>2</sup> ]	0.0008
静的ねじりばね定数[Nm/rad]	4900
許容偏心[mm]	0.1
許容偏角 [deg]	1
質量[g]	1100



## 2.2 制御理論

### 2.2.1 外部環境に接触した際の制御手法

外部環境に接触する際、本機構に適用するインピーダンス制御手法について模式図と照らし合わせて説明する。まず初めに、Fig.2.1 に示す本機構の運動方程式を以下に示す。

$$I\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + k(\theta - \theta_e) = \tau_m + \tau_w - \tau_f - mgl \sin \theta \quad (2.1)$$

ここで、アームの慣性モーメントを  $I$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ], 低減速ギアと軸受けによる粘性を  $C$  [ $\text{Nms/rad}$ ], トーションバーのばね定数を  $k$  [ $\text{Nm/rad}$ ], アームの回転角度を  $\theta$  [ $\text{rad}$ ], 位置制御モータの回転角度を  $\theta_e$  [ $\text{rad}$ ], トルク制御モータのトルクを  $\tau_m$  [ $\text{Nm}$ ], 外部環境との接触によるトルクを  $\tau_w$  [ $\text{Nm}$ ], トルク制御モータによる摩擦を  $\tau_f$  [ $\text{Nm}$ ], アームの質量を  $m$  [ $\text{kg}$ ], 重力加速度を  $g$  [ $\text{m/s}^2$ ], アームの回転中心からアームの重心までの距離を  $l$  [ $\text{m}$ ]とする。ただし、トルク制御モータによる摩擦は他の項に比べて値が小さく影響が小さいためここでは無視することとする。

本稿では上記システムにインピーダンス制御を適用する。まず、以下の目標インピーダンスモデルを考える。

$$I_d\ddot{\theta} + C_d(\dot{\theta} - \dot{\theta}_0) + k_d(\theta - \theta_0) = \tau_w \quad (2.2)$$

ここで、目標慣性モーメントを  $I_d$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ], 目標粘性係数を  $C_d$  [ $\text{Nms/rad}$ ], 目標ばね定数を  $k_d$  [ $\text{Nm/rad}$ ], 目標平衡点を  $\theta_0$  [ $\text{rad}$ ]とする。次に式(2. 1)と式(2. 2)から  $\tau_w$ を消去し、位置制御モータの目標回転角度  $\theta_{ed}$  [ $\text{rad}$ ]を以下の式より求める。この位置制御モータの目標回転角度を位置制御の指令値として入力する。

$$\theta_{ed} = \frac{1}{k} \{ (I - I_d)\ddot{\theta} + (C - C_d)\dot{\theta} + (k - k_d)\theta + C_d\dot{\theta}_0 + k_d\theta_0 + mgl \sin \theta \} \quad (2.3)$$

しかし、位置制御モータには応答遅れが存在し、位置制御モータの動特性を一次遅れで近似する。ここで、位置制御モータの時定数を  $T_1$  [ $\text{ms}$ ]とする。

$$\theta_{ed} = T_1\dot{\theta}_e + \theta_e \quad (2.4)$$

その後、位置制御モータの応答回転角度  $\theta_e$  [ $\text{rad}$ ]を計測し、位置制御モータの遅れを補償するために、位置制御モータの目標回転角度  $\theta_{ed}$  [ $\text{rad}$ ]と、位置制御モータの回転角度  $\theta_e$  [ $\text{rad}$ ]との差に、トーションバーのばね定数  $k$  [ $\text{Nm/rad}$ ]をかけ、以下の式によりトルク制御モータの目標トルク  $\tau_{md}$  [ $\text{Nm}$ ]を決定する。

$$\tau_{md} = k(\theta_{ed} - \theta_e) \quad (2.5)$$

この目標トルク値をトルク制御の指令値としてトルク制御モータに入力し、位置制御モータの遅れを補うことで、応答改善を行う方式が提案システムの特徴である。

しかし、トルク制御モータには応答遅れが存在し、トルク制御モータの動特性を一次遅れで近似する。ここで、トルク制御モータの時定数を  $T_2[\text{ms}]$  とする。

$$\tau_{md} = T_2 \dot{\tau}_m + \tau_m \quad (2.6)$$

また、外部環境と接触した場合を想定する際、外部環境を簡単なばねとし、外部トルク  $\tau_w$  [Nm] を以下の式で表す。

$$\tau_w = -k_w \theta \quad (2.7)$$

ここで、 $k_w$  [Nm/rad] は外部環境のばね定数とする。

また、位置制御モータのみの駆動による手法、位置制御モータとトーションバーからなる直列弾性駆動システムによる手法、および提案手法のブロック線図を Fig.2.4 から Fig.2.6 に示す。また、ブロック線図中に用いている伝達関数を式(2.8)から式(2.12)に示す。

$$G_{imp} = \frac{1}{I_d s^2 + C_d s + k_d} \quad (2.8)$$

$$G_p = \frac{1}{1 + T_1 s} \quad (2.9)$$

$$G_t = \frac{1}{1 + T_2 s} \quad (2.10)$$

$$G_c = \frac{1}{I s^2 + C s + k + mgl} \quad (2.11)$$

$$G_f = \frac{1}{k} \left\{ (I - I_d) s^2 + (C - C_d) s + (k - k_d) + mgl \right\} \quad (2.12)$$

ここで  $G_{imp}$  は式(2.2)において、入力を  $\tau_w$  とし、出力を  $\theta$  としたときの伝達関数、 $G_p$ 、 $G_t$  はそれぞれ、位置制御モータとトルク制御モータの動特性の伝達関数、 $G_c$  は式(2.1)において、入力を  $k\theta_e$ 、 $\tau_m$ 、 $\tau_w$  の和とし、出力を  $\theta$  としたときの伝達関数、 $G_f$  は式(2.3)において、入力を  $\theta$  とし、出力を  $\theta_{ed}$  としたときの伝達関数をそれぞれ表している。

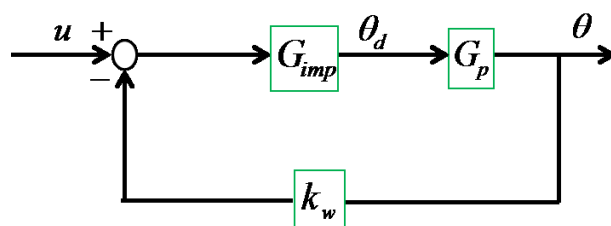


Fig.2.4 位置制御モータのみの手法におけるブロック線図

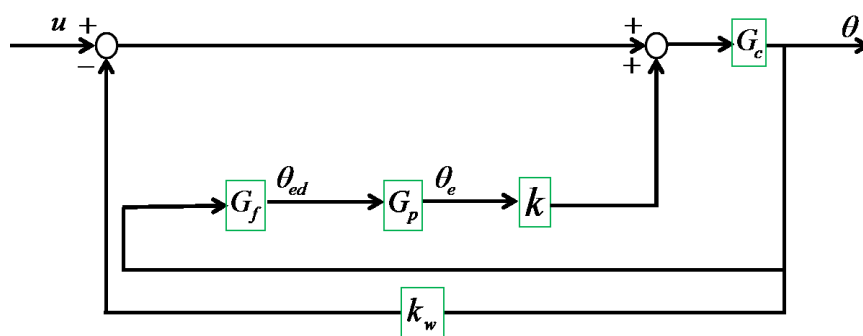


Fig.2.5 直列弾性駆動システムにおけるブロック線図

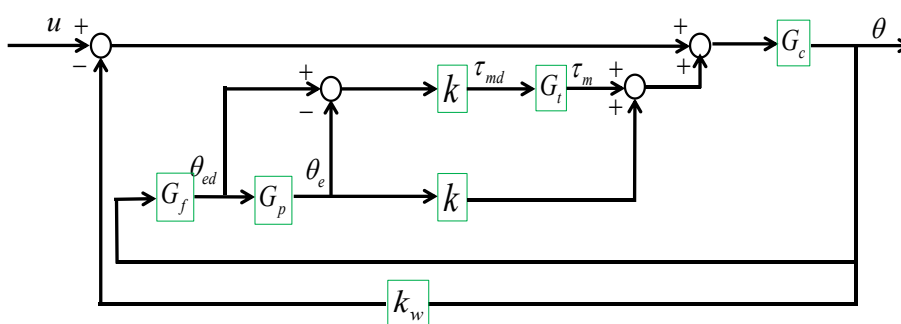


Fig.2.6 提案手法におけるブロック線図

## 2.2.2 外部環境に接触しない際の制御手法

次に，外部環境に接触しない際，本機構に適用するインピーダンス制御手法について説明する．本機構の運動方程式や目標インピーダンスモデル等，制御式については，2.2.1節で述べた外部環境と接触した場合と同様である．ただし，外部環境との接触を想定しないため，外部環境によるトルク  $\tau_w$  は  $0[\text{Nm}]$  となる．

また，位置制御モータのみの駆動による手法，位置制御モータとトーシヨンバーからなる直列弾性駆動システムによる手法，および提案手法のブロック線図を Fig.2.7 から Fig.2.9 に示す．ここで，ブロック線図中に用いている各伝達関数は 2.2.1 節の式(2.8)から式(2.12)と同様である．また，外部環境と接触しない際には，目標平衡点  $\theta_0$  [rad] をシステムへの入力としている．

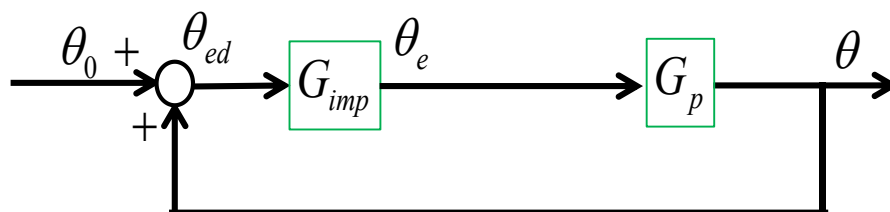


Fig.2.7 位置制御モータのみの手法におけるブロック線図

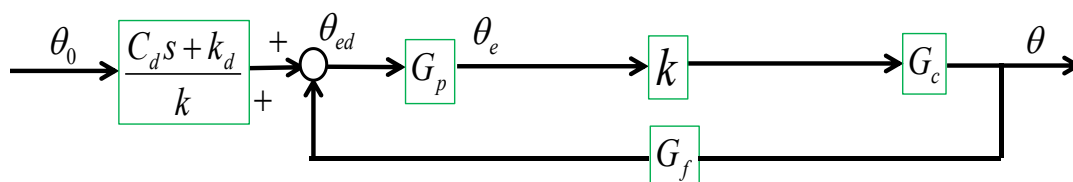


Fig.2.8 直列弾性駆動システムにおけるブロック線図

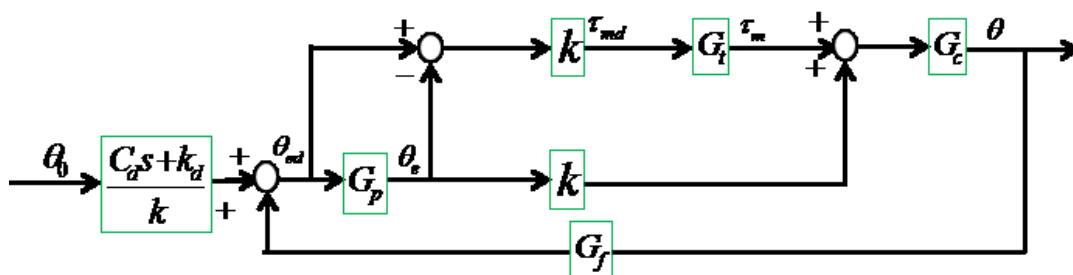


Fig.2.9 提案手法におけるブロック線図

## 第 3 章

### 記述関数を用いた安定性解析

本章では、提案手法によるシステムが外部環境と接触した際の安定性及びシステムが外部環境に接触しない際の安定性について述べる。3.1 節では本章の安定性解析で用いる記述関数について説明する<sup>[7]</sup>。3.1 節ではシステムが外部環境に接触した際の安定性解析について述べ、3.2 節ではシステムが外部環境に接触しない際の安定性解析について述べる。

#### 3.1 記述関数

##### 3.1.1 記述関数の定義

一般に、機械製品に用いられるアクチュエータなどには速度制限値が存在し、アクチュエータへの入力制限値を超え、飽和してしまうことによってシステムの応答性が悪化し、安定性が低下することが知られている<sup>[9]</sup>。そして、飽和が起こる際には、その飽和要素は非線形要素となるため理論解析を行う際にはこの非線形要素を考慮して安定性解析を行う必要がある。そこで、飽和要素の非線形性を線形近似することで安定性解析に用いる手段として記述関数を用いられる。通常、安定な線形伝達関数をもつシステムに正弦波入力を加えると、出力もまた正弦波状となる。ただし、非線形要素あるいは非線形なシステムに入力 $x(t)$ を加えた際に、非線形要素の出力 $f(x(t))$ は正弦波であるとは限らない。

$$x(t) = a \sin \omega t \quad (3.1)$$

$$f(x(t)) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \sin k\omega t + b_k \cos k\omega t \quad (3.2)$$

また、出力波形の周期は入力の正弦波の周期と等しいとは限らない。ここでは、入力の周期と同じ周期をもつ出力波形を与える非線形要素であると仮定する。ただし、式(3.2)に示したように出力は入力の正弦波に加えて入力正弦波の周波数の整数倍の周期を持つ高周波成分から構成されているとみなされる。ここで、制御系の各種要素は高周波数帯域ではゲインが減衰する特性があるため、非線形要素と結合して使用される際、高調波成分は減衰され無視できると考える。以上の仮定により、式(3.2)は以下のようにフーリエ級数に展開できる。

$$f(x(t)) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos k\omega t + B_k \sin k\omega t \quad (3.3)$$

$$A_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x(t)) \cdot \cos k\omega t \, d\omega t \quad (3.4)$$

$$B_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x(t)) \cdot \sin k\omega t \, d\omega t \quad (3.5)$$

ここで、式(3.4)及び式(3.5)における  $A_k$ ,  $B_k$  はフーリエ係数であり、 $a_0$  は出力波形の直流成分である。出力の高調波成分は無視できるので出力  $f(x(t))$  は基本波のみで表され  $k=1$  の成分のみを考える。また、直流成分を 0 として考えると  $a_0 = 0$  となる。よって  $A_k$ ,  $B_k$ ,  $f(x(t))$  は以下のように表される。

$$A_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x(t)) \cdot \cos \omega t \, d\omega t \quad (3.6)$$

$$B_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x(t)) \cdot \sin \omega t \, d\omega t \quad (3.7)$$

$$f(x(t)) = A_1 \cos \omega t + B_1 \sin \omega t \quad (3.8)$$

このとき、記述関数は以下の式で定義される。

$$G_N(a, \omega) = \frac{B_1 + jA_1}{a} \quad (3.9)$$

### 3.1.2 記述関数の計算

前節の式(3.9)に示した記述関数の飽和要素における具体的な計算を本節に示す. 入力依存性を考慮するため, 一般に記述関数を計算する際には, 速度飽和要素の属するモードを飽和が発生しない区間のみの場合, 飽和が発生する区間と発生していない区間の両方を持つ場合と飽和が発生している区間のみの場合の3つのモードに分類し, 記述関数をモード毎に計算する. 本研究では記述関数の簡単化のため, 飽和が発生していない場合と飽和が発生している場合の2つに場合分けをし, 記述関数を1つのゲインとして扱うこととする. まず, 例として飽和要素の上限を $\pm b$ とする. ここで, 入力振幅 $a$ が飽和要素の上限である $\pm b$ を飽和する場合と飽和しない場合に場合分けができる.  $|a| \leq |b|$ の場合には飽和が発生しないため, 記述関数は単なるゲイン $K(=1)$ となる. しかし,  $|a| > |b|$ の場合には飽和が発生し, 非線形要素となるため, フーリエ係数を計算し, 記述関数を算出する必要がある. 以下に式(3.6), 式(3.7)及び式(3.9)の計算結果を示す. また, Fig.3.1 に記述関数のグラフを示す.

$$A_1 = 0 \quad (3.10)$$

$$B_1 = \frac{2Ka}{\pi} \left[ \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right] \left( \alpha = \sin^{-1} \frac{b}{a} \right) \quad (3.11)$$

$$G_N(a) = \frac{B_1 + jA_1}{a} = \frac{2K}{\pi} \left[ \sin^{-1} \frac{b}{a} + \frac{b}{a} \sqrt{1 - \left( \frac{b}{a} \right)^2} \right] \quad (3.12)$$

上述により求められた記述関数を用いて位置制御モータの許容速度に関する記述関数及びトルク制御モータの最大トルクに関する記述関数を算出する. 位置制御モータに用いている減速機の許容速度は14[r.p.m]であるため, 最大振幅は $b=84[\text{deg/s}]$ となる. よって記述関数は式(3.13)となる. ここで, 速度飽和の記述関数のゲインを $B_p$ としている. また, トルク制御モータについては最大トルクが44.6[Nm]であるため,  $b=44.6[\text{Nm}]$ となる. よって記述関数は式(3.14)となる. ここで, トルク飽和の記述関数のゲインを $B_t$ としている. 次に, 記述関数を反映した位置制御モータとトルク制御モータの動特性について述べる. まず, それぞれのモータの動特性を表すブロック線図を Fig.3.2 及び Fig.3.3 に示す. ブロック内で速度飽和及びトルク飽和を表現するため, それぞれゲイン $B_p$ と $B_t$ を挿入している. 各モータの動特性を一次遅れで近似しているため, 記述関数を組み込んだ各モータの動特性はそれぞれ式(3.15)及び式(3.16)のように表現される.



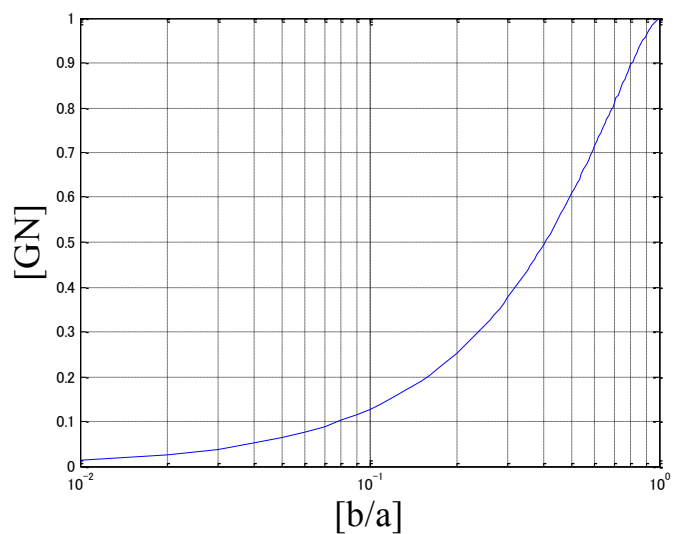


Fig.3.1 記述関数のゲイン

$$B_p = 1 \quad (|a| \leq |b|)$$

$$B_p\left(\frac{b}{a}\right) = \frac{2}{\pi} \left[ \sin^{-1} \frac{84}{a} + \frac{84}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{84}{a}\right)^2} \right] \quad (|a| > |b|) \quad (3.13)$$

$$B_t = 1 \quad (|a| \leq |b|)$$

$$B_t\left(\frac{b}{a}\right) = \frac{2}{\pi} \left[ \sin^{-1} \frac{44.6}{a} + \frac{44.6}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{44.6}{a}\right)^2} \right] \quad (|a| > |b|) \quad (3.14)$$

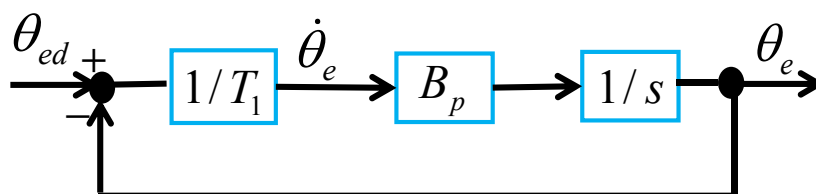


Fig.3.2 位置制御モータの動特性

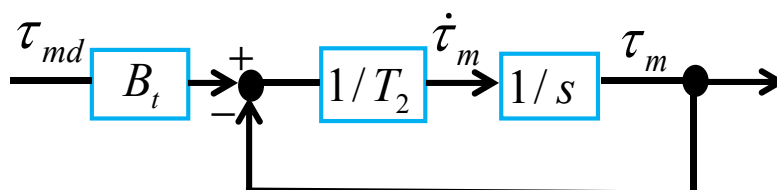


Fig.3.3 トルク制御モータの動特性

$$\frac{B_p}{B_p + T_1 s} \quad (3.15)$$

$$\frac{B_t}{1 + T_2 s} \quad (3.16)$$

## 3. 2 外部環境に接触する際の安定性解析

### 3.2.1 解析条件

本研究で提案する手法によるシステムが従来手法によるシステムより高い安定性を有しているかを検証するために、位相余裕を用いて安定性解析を行った。本節では、アームを地面と水平にして、その状態ではばね定数  $k_w$  を有する外部環境と接触した際のシステムの安定性を解析する。そして、 $k_w$  を各種用意し、外部トルク  $\tau_w$  からアームの回転角度  $\theta$  までの開ループ伝達関数を用いて位相余裕を算出することにより安定性を検証する。本章では以下の3つのモデルに対する解析を行う。1つ目は、位置制御モータのみによるアームの直接駆動に対してインピーダンス制御の適用を想定した解析(1)である。2つ目は、位置制御モータとトーションバーによる直列弾性駆動システムに対してインピーダンス制御の適用を想定した解析(2)である。そして3つ目は、提案手法であるモータを付加した直列弾性駆動システムに対してインピーダンス制御の適用を想定した解析(3)である。解析するシステムのブロック線図を Fig.3.4 から Fig.3.6 に示す。これらは前章で示した Fig.2.4 から Fig.2.6 のものと等しい。また、各伝達関数の詳細を Fig.3.7 に示す。上記3手法の解析を行い、それぞれのシステムの安定性を比較検証する。

ここで、安定性解析の際に用いた各パラメータを以下の Table 3.1 に示す。これらの値は実験装置と等しい値となっている。Fig.3.8(a)から Fig.3.12(c)に、目標ばね定数  $k_d$ 、位置制御モータの記述関数ゲイン  $B_p$  及び位相余裕  $Pm$  の3種のパラメータを軸とする3次元グラフを示す。ここで、目標ばね定数は0~300[Nm/rad]まで変化させ、位置制御モータの記述関数ゲイン  $B_p$  を0~1まで変化させ、解析を行った。なお、目標慣性モーメントは実機と等しい値とし、目標減衰係数は減衰比  $\zeta = 1$  の値としている。そして、Fig.3.13(a)から Fig.3.13(c)に、提案手法における位置制御モータの記述関数ゲイン  $B_p$ 、トルク制御モータの記述関数ゲイン  $B_t$  及び位相余裕  $Pm$  の3種のパラメータを軸とする3次元グラフを示す。ここで、目標ばね定数の値は実機と等しい値としている。

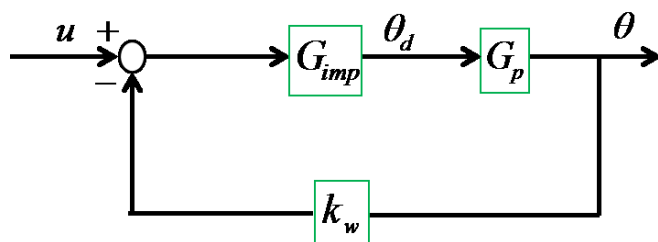


Fig.3.4 位置制御モータのみの手法におけるブロック線図

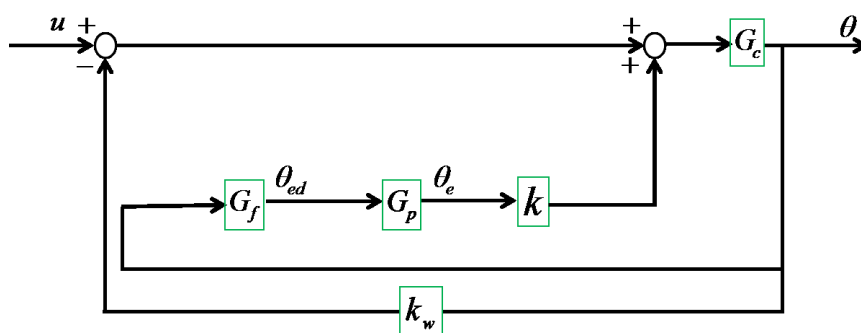


Fig.3.5 直列弾性駆動システムにおけるブロック線図

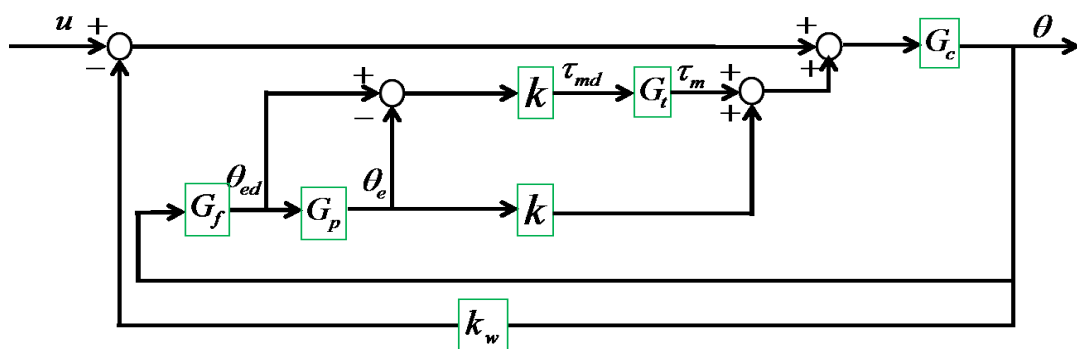


Fig.3.6 提案手法におけるブロック線図

$$G_f = \frac{1}{k} \{(I - I_d)s^2 + (C - C_d)s + (k - k_d) + mgl\}$$

$$G_c = \frac{1}{Is^2 + Cs + k + mgl} \quad G_{imp} = \frac{1}{I_d s^2 + C_d s + k_d}$$

$$G_p = \frac{B_p}{B_p + T_1 s} \quad G_t = \frac{B_t}{1 + T_2 s}$$

Fig.3.7 安定性解析に用いる伝達関数

Table 3.1 解析に用いる各パラメータ

$I_d$	目標慣性モーメント	0.31[kg・m <sup>2</sup> ]
$I$	アームの慣性モーメント	0.31[kg・m <sup>2</sup> ]
$C$	粘性	0.12[Nms/rad]
$k$	トーシヨンバーのばね定数	171.9[Nm/rad]
$m$	アームの質量	2.7 [kg]
$l$	回転中心から重心までの距離	0.282[m]
$T_1$	位置制御モータの時定数	43[ms]
$T_2$	トルク制御モータの時定数	7.8[ms]

### 3.2.2 解析結果

本節で各手法によるシステムが外部環境に接触した際の安定性解析の結果について述べる。Fig.3.8(a)から Fig.3.13(c)に解析結果を示す。Fig.3.8(a)から Fig.3.12(c)までの(a)には目標ばね定数  $k_d$ 、位置制御モータの記述関数のゲイン  $B_p$  と位相余裕  $P_m$  を軸とした3次元プロットを示す。(b)には目標ばね定数  $k_d$ 、位相余裕  $P_m$  を軸とした2次元プロットを示し、(c)には位置制御モータの記述関数のゲイン  $B_p$ 、位相余裕  $P_m$  を軸とした2次元プロットを示す。このとき外部環境のばね定数  $k_w$  は 25000[Nm/rad]及び 250000[Nm/rad]の2種類について解析を行った。さらに Fig.3.12(a)から Fig.3.12(c)には、位置制御モータの記述関数のゲイン  $B_p$ 、トルク制御モータの記述関数のゲイン  $B_t$  と位相余裕  $P_m$  の3次元プロット、位置制御モータの記述関数のゲイン  $B_p$  と位相余裕  $P_m$  の2次元プロット及びトルク制御モータの記述関数のゲイン  $B_t$  と位相余裕  $P_m$  の2次元プロットをそれぞれ示す。このとき外部環境のばね定数  $k_w$  は 250000[Nm/rad]としている。

まず、位置制御モータのみの駆動による解析(1)では、外部環境のばね定数の値や、目標ばね定数の値にかかわらず、極が全て不安定となるため、位相余裕が負の値となり、外部環境と接触した際にはシステムが不安定となり、有効ではないことが確認できた。

次に、直列弾性駆動システムによる解析(2)では  $k_w$  の値が大きくなるにつれて位相余裕は減少するものの、 $B_p$  と  $k_d$  の値にかかわらず位相余裕の値が負の値にならず、システムが常に安定となることが確認できる。また、 $k_d$  がトーシヨンバーのばね定数  $k$  の値から遠ざかるにつれて緩やかに位相余裕が減少していくが、 $k_d$  が小さくなれば位相余裕にはほとんど影響がないといえる。しかし、記述関数のゲインが小さくなるにつれて位相余裕も大きく減少しているため、位置制御モータへの速度指令値が飽和しないように制御することが望ましいといえる。

次に、提案手法による解析(3)では、解析(2)と同様に  $k_w$  の値が大きくなるにつれて位相余裕は減少するものの、 $B_p$  と  $k_d$  の値にかかわらずシステムが常に安定となっている。さらに、 $B_p$  が小さくなっても位相余裕は急激には変化しないため、速度の飽和量が大きい場合にも高い安定性を有しているといえる。これは、提案手法ではトルク制御モータにより、位置制御モータの遅れにより不足するトルクを補うことができるためと考える。そのため、解析(2)と比較しても、 $k_w$  の値が同じ場合に提案手法のほうが位相余裕は大きくなっており、提案手法が有効であるといえる。そして、Fig.3.13(c)ではトルク制御モータの記述関数のゲイン  $B_t$  が小さくなるにつれて、位相余裕が急激に減少していることが確認できる。また、 $B_t$  が 0 のときはトルク制御モータが機能しないため、Fig.3.10(c)の位相余裕と値が一致することが確認できる。このことから、提案手法では位置制御モータへの速度指令値が大きく飽和したとしても、トルク制御モータへの指令値が飽和しないよう制御を施せば、高い安定性を有することができると考えられる。

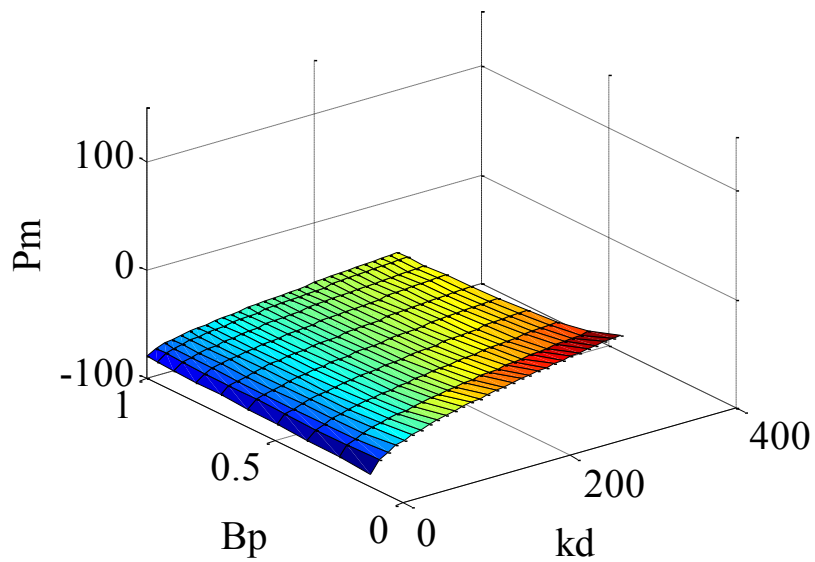


Fig.3.8(a) 従来手法( $k_w=25000$ [Nm/rad]) 3 軸プロット

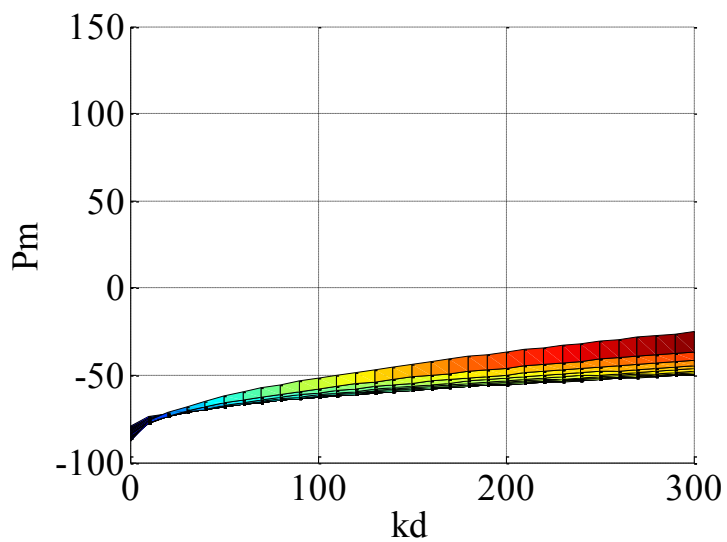


Fig.3.8(b) 従来手法( $k_w=25000$ [Nm/rad])  $kd$  及び  $P_m$

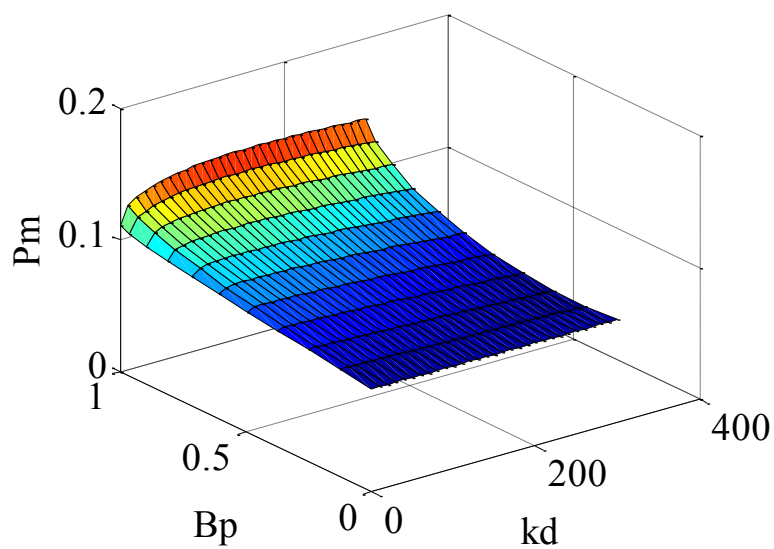


Fig.3.9(a) 直列弾性駆動システム( $k_w=25000$ [Nm/rad]) 3 軸プロット

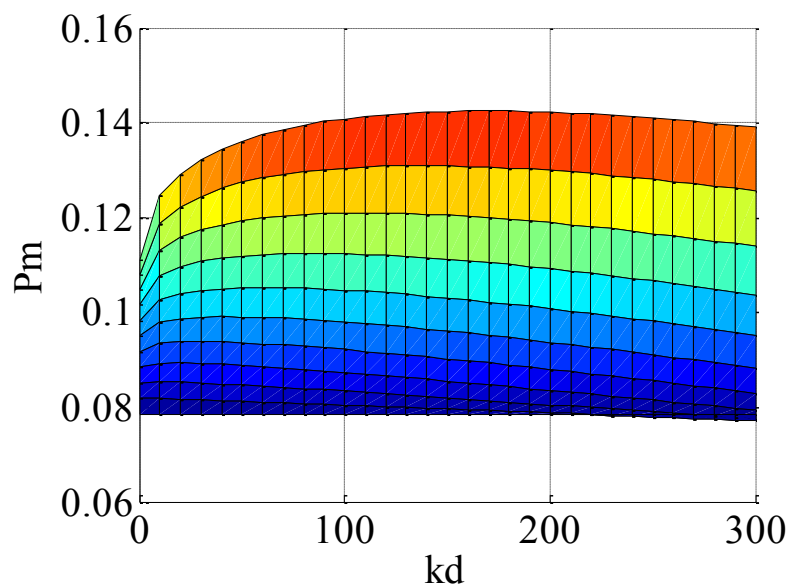


Fig.3.9(b) 直列弾性駆動システム( $k_w=25000$ [Nm/rad])  $kd$  及び  $P_m$



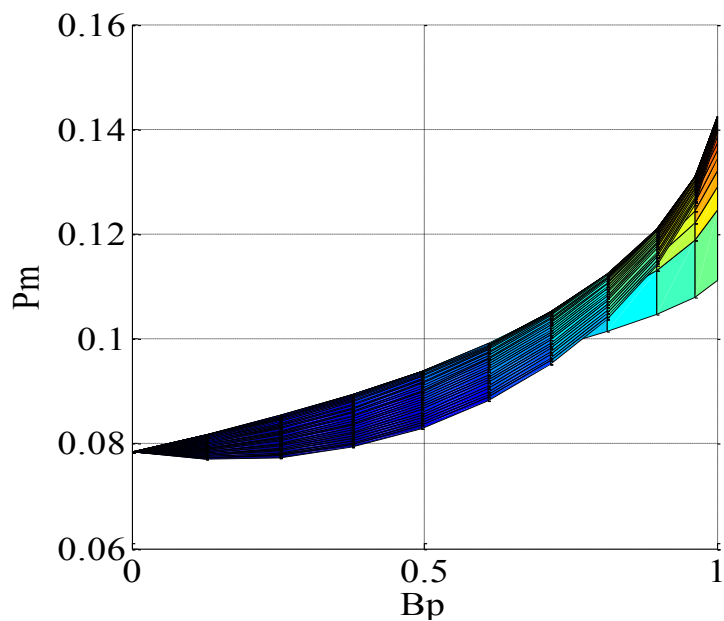


Fig.3.9(c) 直列弾性駆動システム( $k_w=25000$ [Nm/rad])  $B_p$  及び  $P_m$

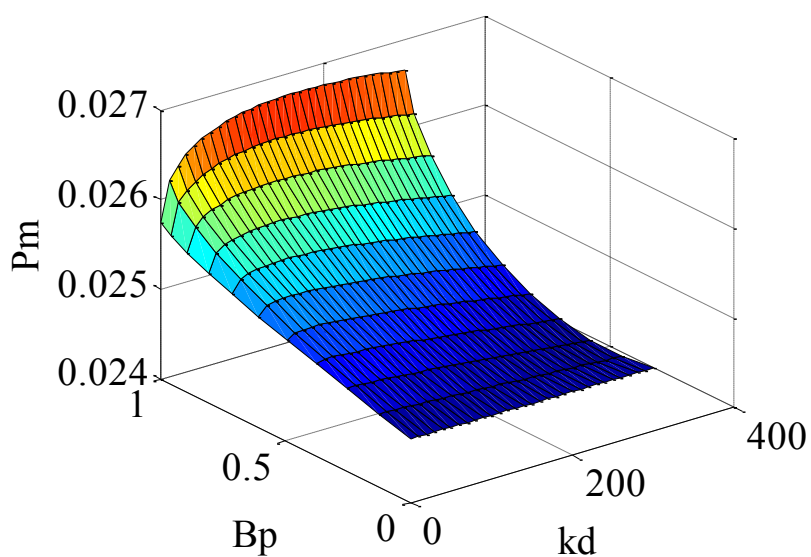


Fig.3.10(a) 直列弾性駆動システム( $k_w=250000$ [Nm/rad]) 3 軸プロット

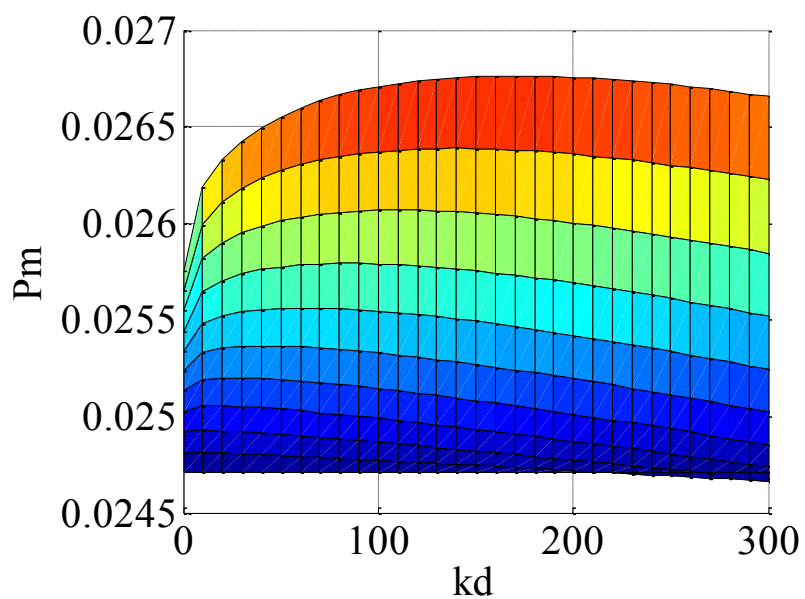


Fig.3.10(b) 直列弾性駆動システム( $k_w=250000$ [Nm/rad])  $kd$  及び  $P_m$

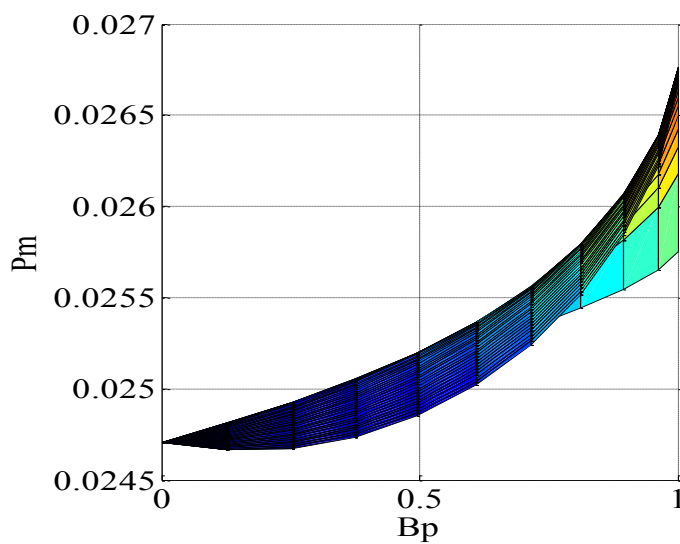


Fig.3.10(c) 直列弾性駆動システム( $k_w=250000$ [Nm/rad])  $B_p$  及び  $P_m$

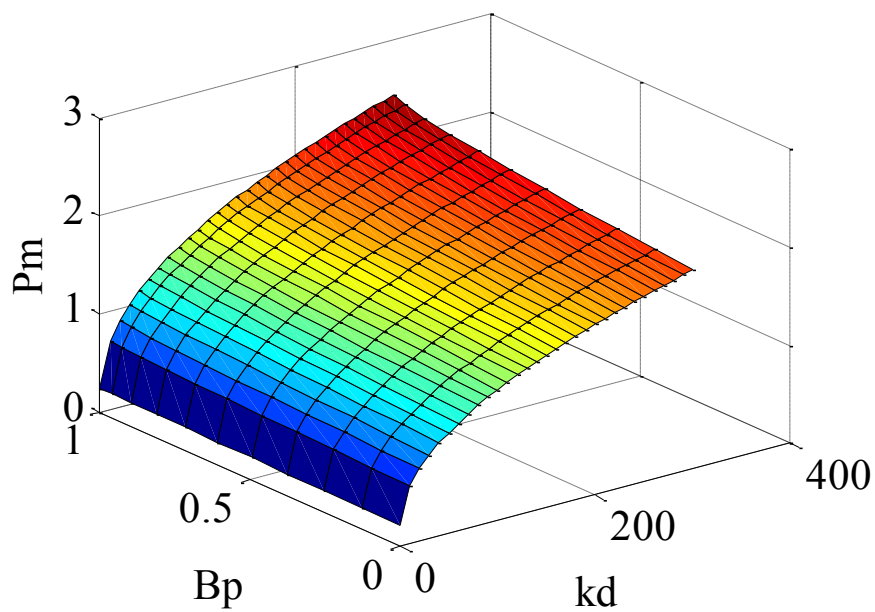


Fig.3.11(a) 提案手法( $k_w=25000$ [Nm/rad])3軸プロット

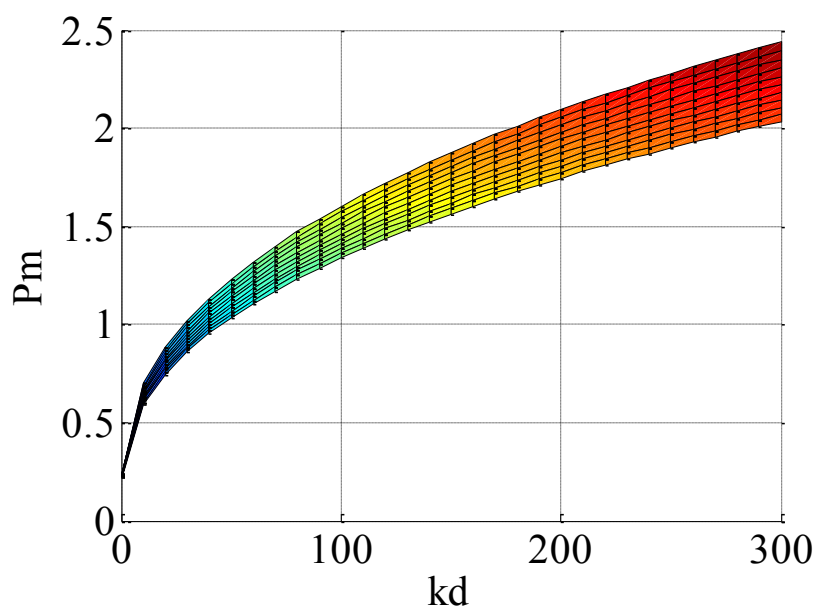


Fig.3.11(b) 提案手法( $k_w=25000$ [Nm/rad]) $kd$  及び  $P_m$

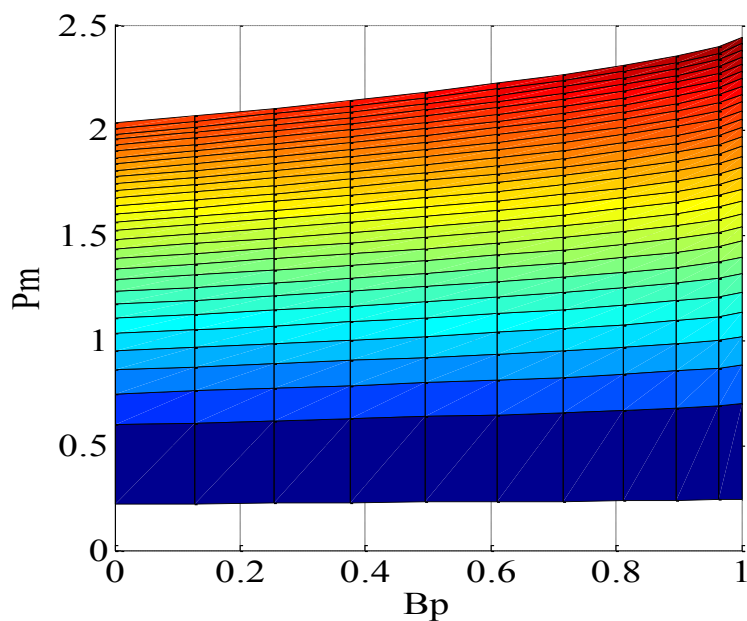


Fig.3.11(c) 提案手法( $k_w=25000$ [Nm/rad]) $B_p$  及び  $P_m$

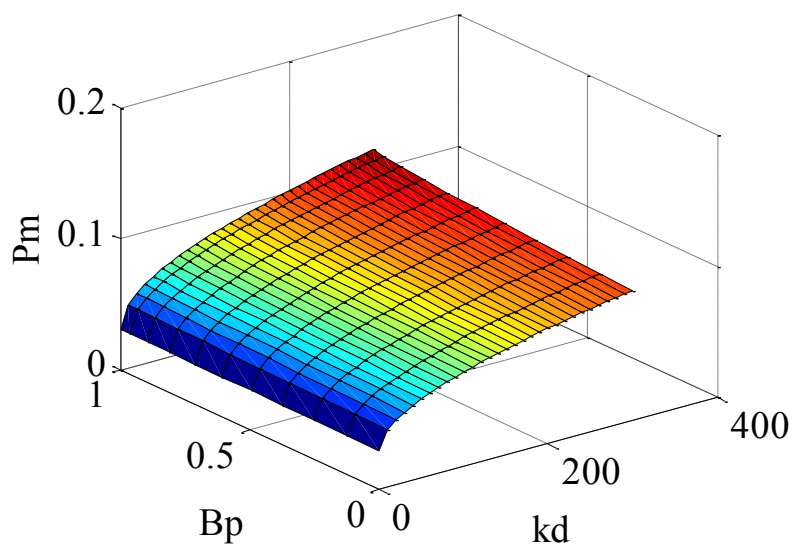


Fig.3.12(a) 提案手法( $k_w=250000$ [Nm/rad])3 軸プロット

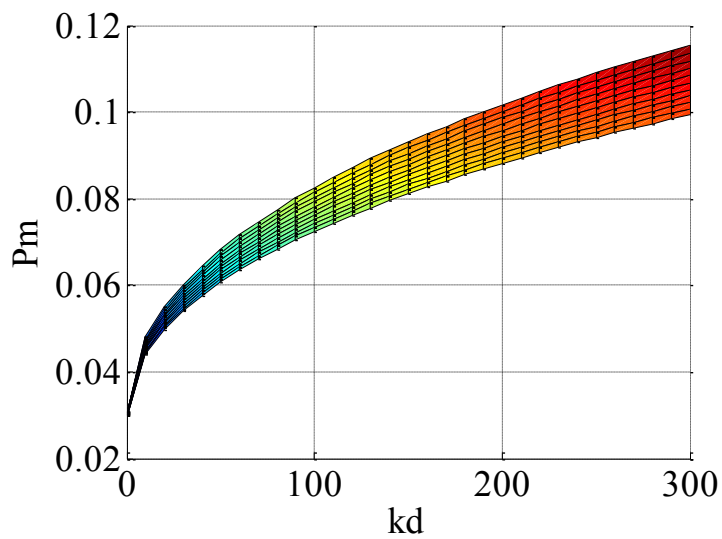


Fig.3.12(b) 提案手法( $k_w=250000$ [Nm/rad]) $kd$  及び  $P_m$

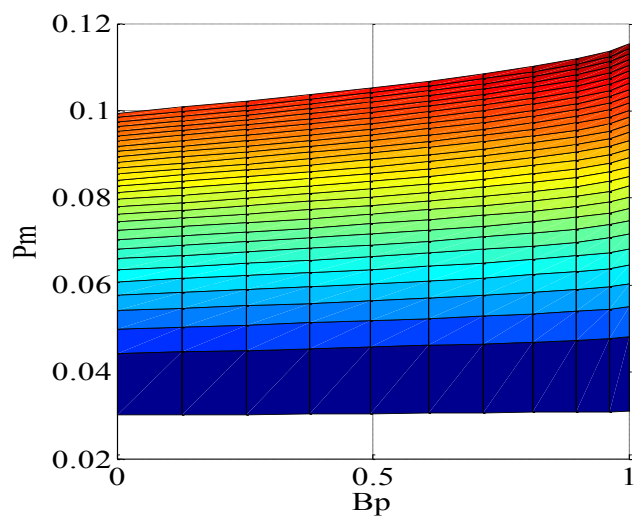


Fig.3.12(c) 提案手法( $k_w=250000$ [Nm/rad]) $B_p$  及び  $P_m$

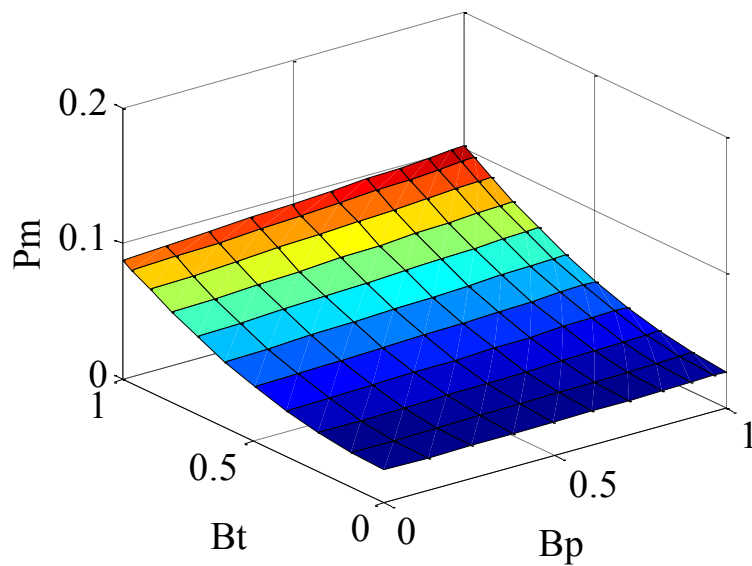


Fig.3.13(a) 提案手法( $k_w=250000$ [Nm/rad])3 軸プロット

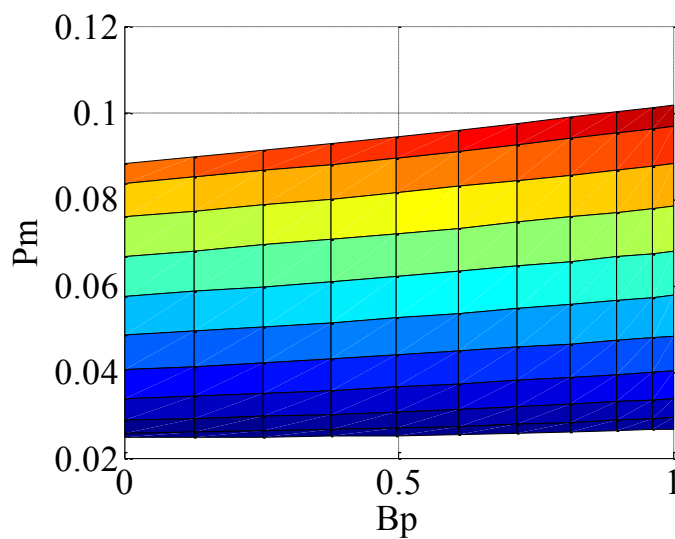


Fig.3.13(b) 提案手法( $k_w=250000$ [Nm/rad]) $B_p$  及び  $P_m$

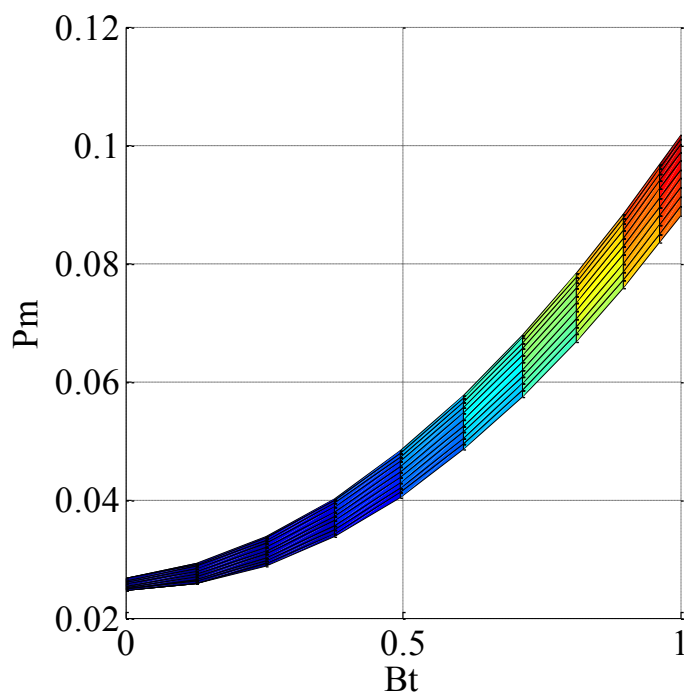


Fig.3.13(c) 提案手法( $k_w=250000$ [Nm/rad]) $Bt$  及び  $P_m$

### 3.3 外部環境に接触しない際の安定性解析

#### 3.3.1 解析条件

本研究で提案する手法によるシステムが従来手法によるシステムより高い安定性を有しているかを検証するために、システムの根軌跡を用いて安定性解析を行った。本節では、アームを地面と水平にして、その状態でアームの平衡点に入力を加えた際のシステムの安定性を解析する。具体的には、 $B_p$ と $B_l$ を変化させ、平衡点への入力 $\theta_0$ からアームの回転角度 $\theta$ までの閉ループ伝達関数を用いて根軌跡を描写することにより安定性を検証する。安定性解析の対象となるシステムは前節と同様である。解析するシステムのブロック線図を Fig.3.14 から Fig.3.16 に示す。これらは前章で示した Fig.2.7 から Fig.2.9 のものと等しい。また、各伝達関数の詳細を Fig.3.17 に示す。上記3手法の解析を行い、それぞれのシステムの安定性を比較検証する。ここで、安定性解析の際に用いた各パラメータを以下の Table 3.2 に示す。これらの値は実験装置と等しい値となっている。Fig.3.18 に、 $B_p$ を0.1から1まで変化させた際の各システムの根軌跡を示す。ただし、このとき $B_l$ は1としている。そして Fig.3.19 には $B_l$ を0.1から1まで変化させた際の提案手法の根軌跡を示す。このとき $B_p$ は0.1, 0.5と1の3種類について根軌跡を描写した。



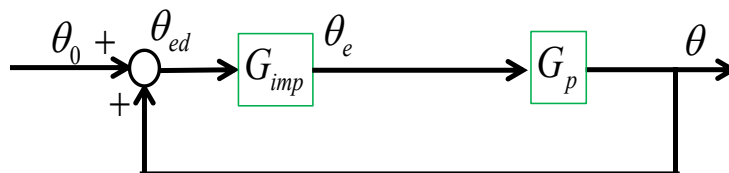


Fig.3.14 位置制御モータのみの手法におけるブロック線図

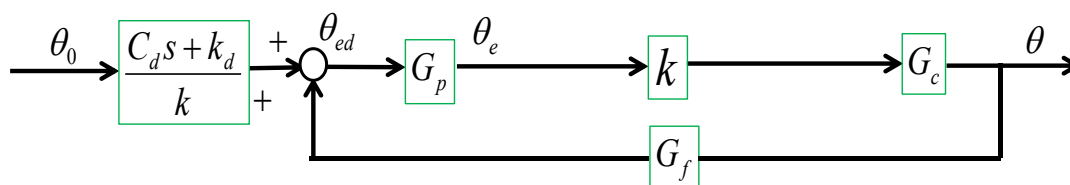


Fig.3.15 直列弾性駆動システムにおけるブロック線図

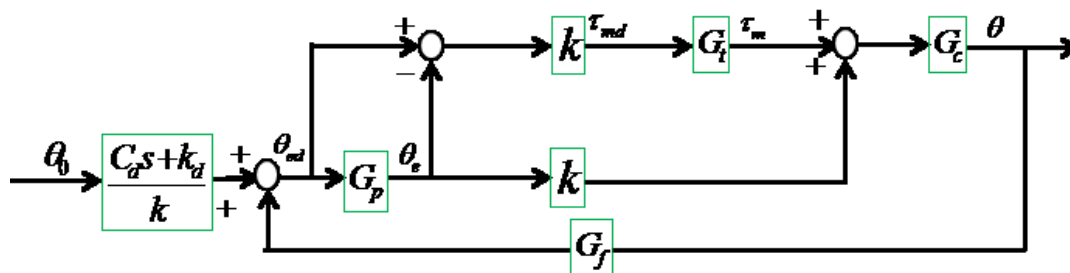


Fig.3.16 提案手法におけるブロック線図

$$G_c = \frac{1}{Is^2 + Cs + k + mgl} \quad G_{imp} = \frac{1}{I_d s^2 + C_d s + k_d}$$

$$G_p = \frac{B_p}{B_p + T_1 s} \quad G_t = \frac{B_t}{1 + T_2 s}$$

$$G_f = \frac{1}{k} \{(I - I_d)s^2 + (C - C_d)s + (k - k_d) + mgl\}$$

Fig3.17 伝達関数の詳細

Table3.2 解析に用いる各パラメータ

$I_d$	目標慣性モーメント	0.31[kg・m <sup>2</sup> ]
$C_d$	目標粘性係数	14.6[Nms/rad]
$k_d$	目標ばね定数	171.9[Nm/rad]
$I$	アームの慣性モーメント	0.31[kg・m <sup>2</sup> ]
$C$	粘性係数	0.12[Nms/rad]
$k$	トーションバーのばね定数	171.9[Nm/rad]
$m$	アームの質量	2.7 [kg]
$l$	回転中心から重心までの距離	0.282[m]
$T_1$	位置制御モータの時定数	43[ms]
$T_2$	トルク制御モータの時定数	7.8[ms]

### 3.3.2 解析結果

本節で各手法によるシステムが外部環境に接触しない際の安定性解析の結果について述べる。Fig.3.18 から Fig.3.19 に解析結果を示す。各グラフの縦軸は虚軸を表し、横軸は実軸を表している。そして、図中のバツのプロットは各システムの根を示し、丸のプロットは零点を示している。また、Fig.3.18 において、緑色のプロットは従来手法の根、赤色のプロットは直列弾性駆動システムの根、青色のプロットは提案手法の根を示している。そして、Fig.3.16 は提案手法において  $B_t$  を 0.1 から 1 まで変化させた際の提案手法の根軌跡を示す。このとき  $B_p$  は 0.1, 0.5 と 1 の 3 種類とした。

まず、位置制御モータのみの駆動による解析(1)では、Fig.3.18(b)において虚軸に最も近い代表極が実軸上の負の側に位置しているため、外部環境に接触しない際にはシステムが安定となることが確認できる。

次に、直列弾性駆動システムによる解析(2)では、Fig.3.18(b)において代表極が  $B_p$  の値に関わらず、右半平面上に位置していることからシステムが常に不安定となることが確認できる。また、 $B_p$  が 1 のとき、つまり位置制御モータの速度飽和が発生しない場合でも極が不安定な極となっているため、直列弾性駆動システムは外部環境に接触しない際の駆動に対し、有効ではないといえる。

次に、提案手法による解析(3)では、Fig.3.18(b)において  $B_p$  の値にかかわらずシステムが常に安定となることが確認できる。これは、トルク制御モータの記述関数ゲイン  $B_t$  が 1 となっているため、位置制御モータの速度が飽和したとしても、遅れにより不足するトルクを全て補償することができるためだと考えられる。

そこで、Fig.3.19 において、 $B_p$  の値による差はほとんどないものの  $B_t$  が減少するにしたがって、根が右半平面に推移していき、 $B_t(0.1)$  のときから根が実軸の正の側に位置するようになるため、システムが不安定になることが確認できる。また、トルク制御モータにおいて大きく飽和した場合、従来手法よりも極の位置が虚軸よりとなってしまふ。しかし、システムの評価の際には安定性だけでなく、追従性も検討する必要があるため、追従性の評価に関しては後に詳細に記述する。これらの結果から、位置制御モータに速度飽和が発生したとしても、トルク制御モータに飽和が発生しないようにコントローラを設計することで提案手法を常に安定に制御することができ、その場合に、提案手法が従来手法よりも有効であるといえる。

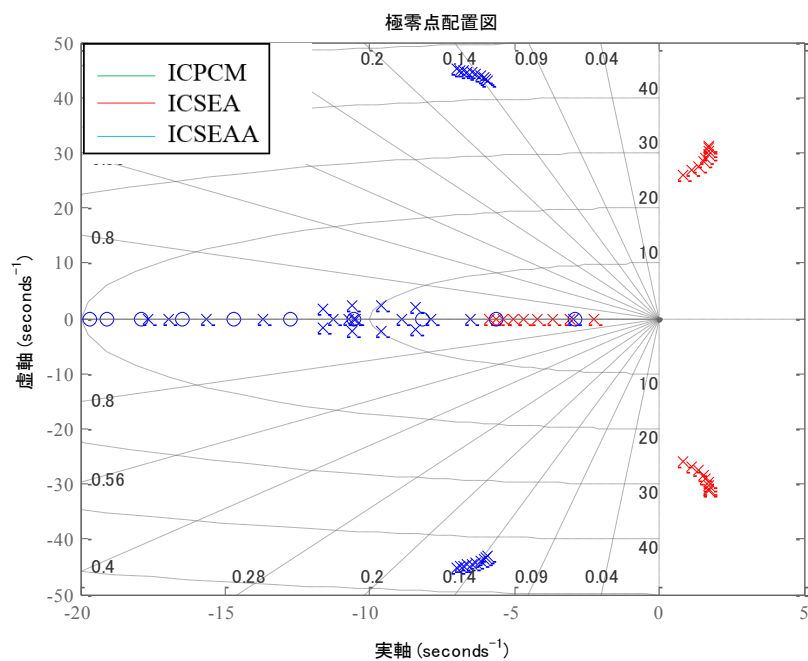
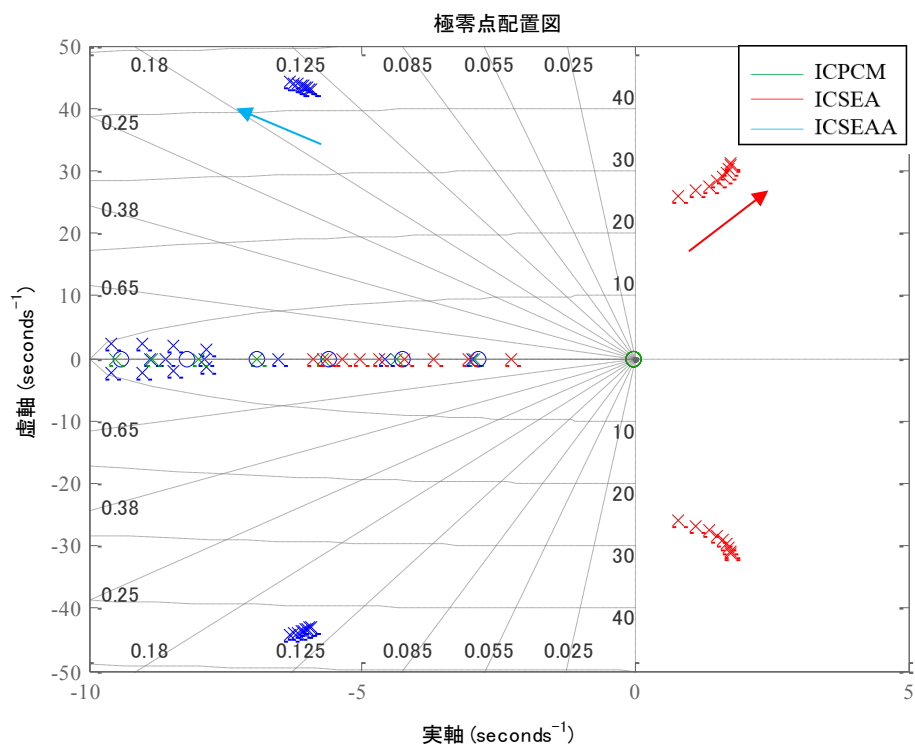
Fig.3.18(a)  $B_p$  を 0.1 から変化させた根軌跡

Fig.3.18(b) Fig.3.18(a)の拡大図

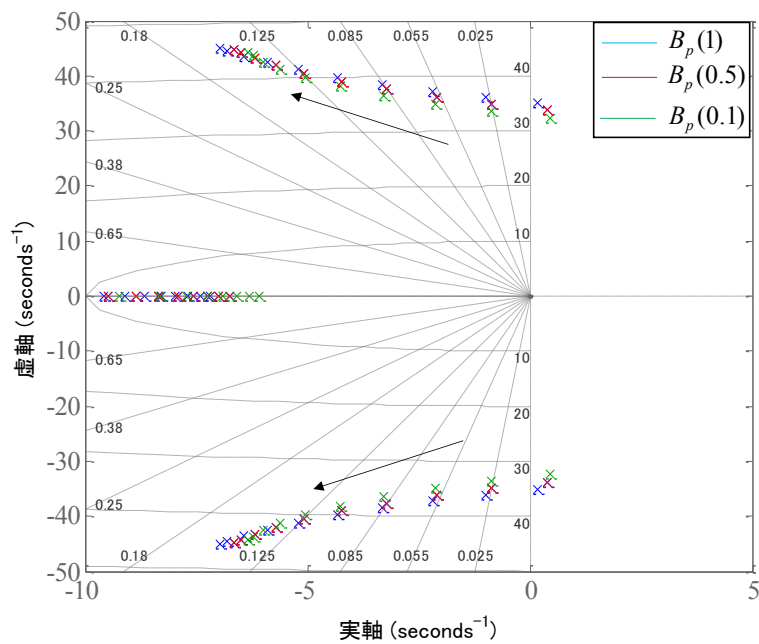


Fig.3.19(a)  $B_p$  を 0.1 から変化させた根軌跡

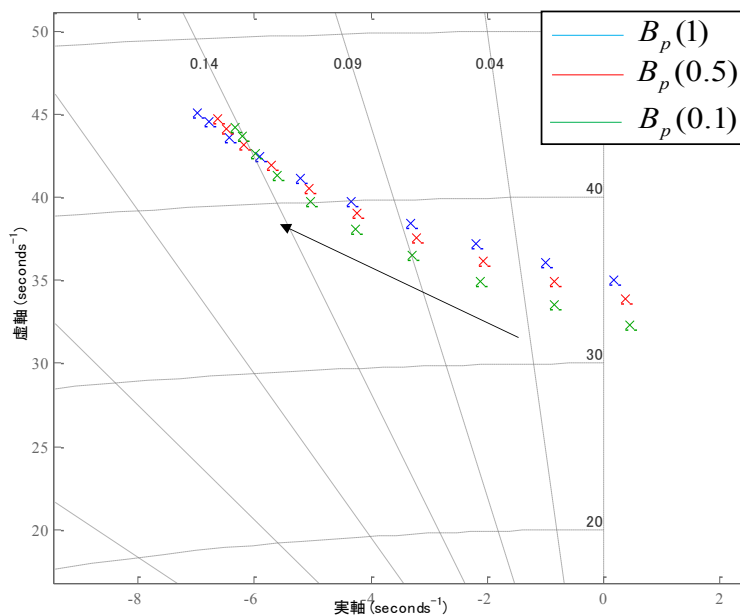


Fig.3.19(b) Fig.3.19(a)の拡大図

## 第 4 章

### 追従性評価

本章では、前章で安定性解析の対象となった 3 つの手法に対し、システムが外部環境に接触した際の追従性及びシステムが外部環境に接触しない際の追従性について、H2 ノルムを用いて評価する。4.1 節ではシステムが外部環境に接触した際の追従性について評価する。4.2 節ではシステムが外部環境に接触しない際の追従性について評価する。

#### 4.1 外部環境に接触する場合

##### 4.1.1 H2 ノルムの計算

本節では H2 ノルムの計算について述べる。はじめに計算に用いる伝達関数について述べる。追従性評価の際に、目標インピーダンスモデルの伝達関数である式(2.8)から、外部環境によるトルク $\tau_w$ を入力としてアームの回転角度 $\theta$ を出力とする閉ループ伝達関数 $G(s)$ を差し引いた伝達関数を目標軌道との誤差の伝達関数として H2 ノルムの計算に用いる。以下に各伝達関数を示す。式(4.1)に直列弾性駆動システムの伝達関数を示し、式(4.2)に提案手法の伝達関数を示す。なお外部環境に接触する際には、前章の安定性解析において位置制御モータのみの駆動による手法は常に不安定となっていたため、ここでは直列弾性駆動システムと提案手法の 2 つの手法について追従性評価を行う。また、計算の際に用いた各パラメータは前章の安定性解析と同様の値としている。ただし、外部環境のばね定数 $k_w$ は $1000000[\text{N/m}]$ としている。

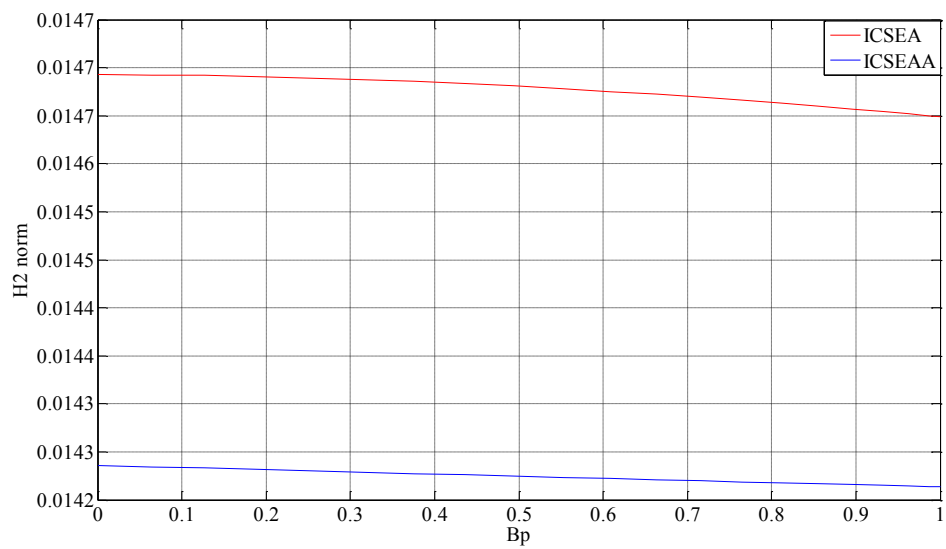
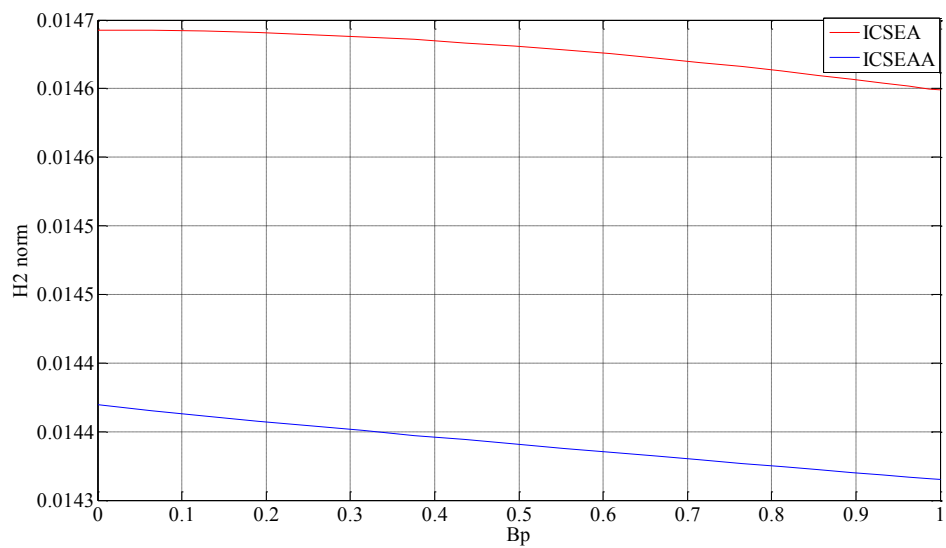
$$G_{imp} = \frac{1}{I_d s^2 + C_d s + k_d} \quad (4.1)$$

$$G(s) = \frac{G_c k_w}{1 - k G_c G_p G_f} \quad (4.2)$$

$$G(s) = \frac{G_c k_w}{1 - k G_c G_f (G_p + G_t - G_p G_t)} \quad (4.3)$$

### 4.1.2 計算結果

本節に，H2 ノルムの計算結果を示す．Fig.4.1 及び Fig.4.2 にトルク制御モータの記述関数ゲイン  $B_i$  をそれぞれ  $B_i(1)$ ， $B_i(0.5)$  としたときの結果を示す．各グラフの横軸は位置制御モータの記述関数ゲイン  $B_p$  を表し，縦軸は H ノルムの値を示している．また，図中赤色のプロットは直列弾性駆動システムを示し，青色のプロットは提案手法を示している．これらのグラフから  $B_i$  が  $B_i(1)$ ， $B_i(0.5)$  のとき， $B_p$  の値に関わらず，提案手法のほうが直列弾性駆動システムよりも，H2 ノルムの値が小さく，システムの追従性がよいことが確認できる．よって，前章の結果も踏まえて，システムが外部環境に接触する際には提案手法のほうが安定性と追従性共に向上できていることが確認でき，提案手法が有効であるといえる．

Fig.4.1  $B_\lambda(1)$ の計算結果Fig.4.2  $B_\lambda(0.5)$ の計算結果



## 4.2 外部環境に接触しない場合

### 4.2.1 H2 ノルムの計算

本節で、H2 ノルムの計算について述べる。はじめに、計算に用いる伝達関数について述べる。追従性評価の際に、目標インピーダンスモデルの伝達関数である式(2.8)から、アームの平衡点  $\theta_0$  を入力としてアームの回転角度  $\theta$  を出力とする閉ループ伝達関数  $G(s)$  を差し引いた伝達関数を目標軌道との誤差の伝達関数として H2 ノルムの計算に用いる。以下に各伝達関数を示す。式(4.5)に位置制御モータのみの駆動による従来手法の伝達関数を示し、式(4.6)に提案手法の伝達関数を示す。なお外部環境に接触しない際には、前章の安定性解析において直列弾性駆動システムは常に不安定となっていたため、ここでは従来手法と提案手法の2つの手法について追従性評価を行う。また、計算の際に用いた各パラメータは前章の安定性解析と同様の値としている。

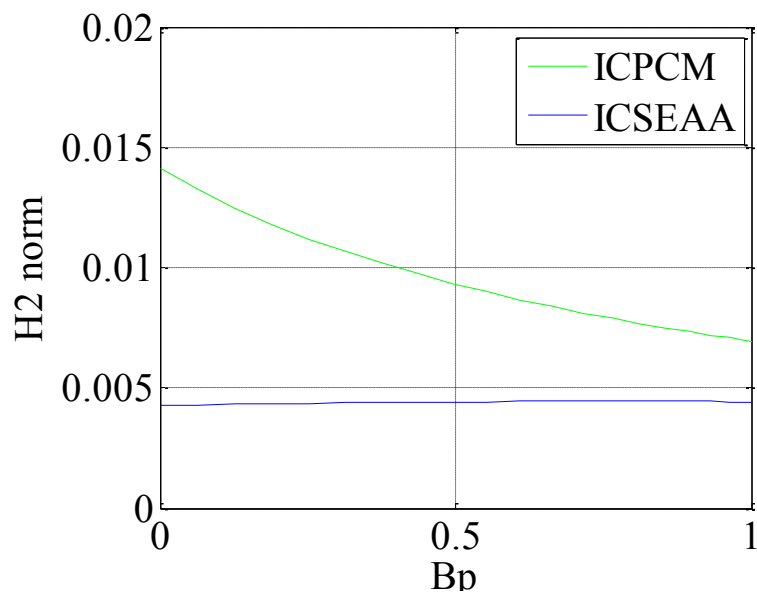
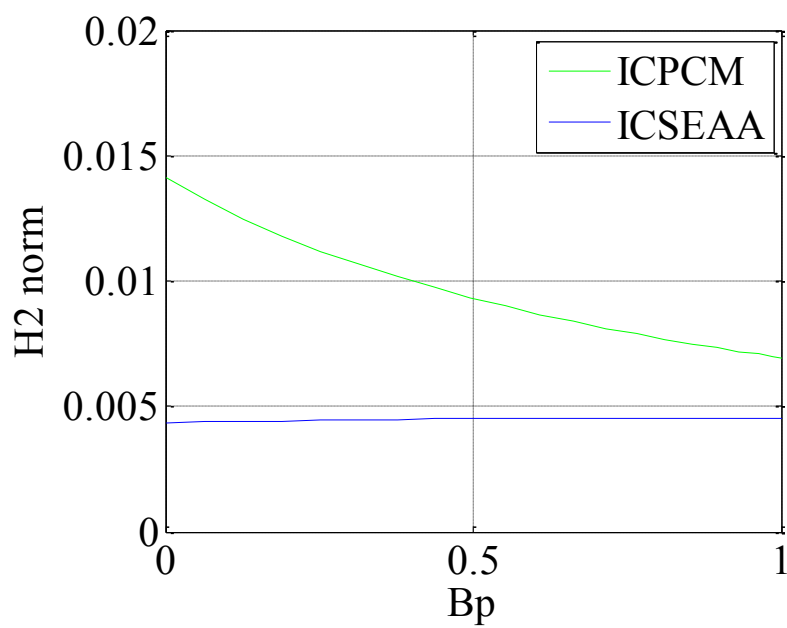
$$G_{imp} = \frac{1}{I_d s^2 + C_d s + k_d} \quad (4.4)$$

$$G(s) = \frac{G_p G_{imp}}{1 - G_p G_{imp}} \quad (4.5)$$

$$G(s) = \frac{G_c (C_d s + k_d) (G_p + G_t - G_p G_t)}{1 - k G_c G_f (G_p + G_t - G_p G_t)} \quad (4.6)$$

### 4.1.2 計算結果

本節に，H2 ノルムの計算結果を示す．Fig.4.3 から Fig.4.4 にトルク制御モータの記述関数ゲイン  $B_i$  をそれぞれ  $B_i(1)$  及び  $B_i(0.5)$  としたときの結果を示す．各グラフの横軸は位置制御モータの記述関数ゲイン  $B_p$  を表し，縦軸は H ノルムの値を示している．また，図中緑色のプロットは，従来手法を示し，青色のプロットは提案手法を示している．これらの結果から， $B_i$  の値に関わらず，提案手法が従来手法よりも，H2 ノルムの値が小さくシステムの追従性がよいことが確認できる．よって，前章の結果も踏まえて，システムが外部環境に接触しない際にも提案手法のほうが安定性と追従性共に向上できていることが確認でき，提案手法が有効であるといえる．

Fig.4.3  $B_i(1)$ の計算結果Fig.4.4  $B_\lambda(0.5)$ の計算結果

## 第5章

### 各手法のシミュレーションにおける比較

本章では，前章で安定性解析及び追従性評価の対象となった3つの手法について，システムが外部環境に接触した場合とシステムが外部環境に接触しない場合について，シミュレーションによる比較を行う．5.1節ではシステムが外部環境に接触した際のシミュレーションについて述べ，5.2節ではシステムが外部環境に接触しない際のシミュレーションについて述べる．

#### 5.1 外部環境に接触する場合

##### 5.1.1 シミュレーション条件

本節で，外部環境に接触する場合のシミュレーション条件について述べる．前章の安定性解析と同様，アームの初期位置は地面と水平にし，ばね定数 $k_w$ [Nm/rad]を有する外部環境と接触させておく．そしてシミュレーション開始直後にアームの目標平衡点 $\theta_0$ を負の方向に回転させるステップ入力を加え，その際のアームの挙動を観測する．本研究では，位置制御モータに用いている減速機の許容速度を超えた場合にどのような挙動をとるかを観測するため，ステップの角度をいくらか用意し，様々な速度を観測できるようシミュレーションを行う．

本節では，前章と同様に3つの手法に対してそれぞれシミュレーションを行う．1つ目は，位置制御モータのみの駆動による手法(1)，2つ目は直列弾性駆動システムによる手法(2)，そして3つ目は提案手法による手法(3)である．

シミュレーションに用いた各パラメータは，実験装置と等しくするため Table3.2 と同様である．また，外部環境ばね定数 $k_w$ は1000000[N/m]としている．

### 5.1.2 シミュレーション結果

本節ではシミュレーション結果について述べる。Fig.5.1 から Fig.5.3 に各手法でのシミュレーション結果を示す。また、各システムの追従性を評価するため、アームの目標軌道と実際の軌道との差を計算し、足し合わせた結果を Table5.1 に示す。各グラフの横軸はシミュレーション時間を示している。手法(1)の結果において、グラフの縦軸は上から順にアームの回転角度、アームの回転角度と目標軌道との誤差及び、位置制御モータの速度を示している。手法(2)の結果においては、グラフの縦軸は上から順にアームの回転角度、アームの回転角度と目標軌道との誤差及び、位置制御モータの回転角度を示している。さらに、手法(3)の結果においては、グラフの縦軸は上から順にアームの回転角度、アームの回転角度と目標軌道との誤差及び、位置制御モータの回転角度及びトルク制御モータのトルクを示している。なお、図中赤色のプロットは目標値及び指令値を示し、青色のプロットは実際の値を示している。

まず手法(1)については、Fig.5.1 においてステップ入力に加わった瞬間からアームが振動し、振動が収まらずシステムが不安定となっている。また、このとき位置制御モータの飽和は発生していない。手法(1)については前章の安定性解析において、位置制御モータの記述関数ゲイン  $B_p$  の値に関わらず位相余裕が負の値となっており、システムは不安定となっていたため、シミュレーション結果が理論解析の結果と一致することが確認できる。また、このことから、位置制御モータのみの駆動による手法は、外部環境による接触を想定した場合に有効ではないといえる。

次に手法(2)については、入力されるステップ入力の角度が大きくなっても  $B_p$  の値に関わらず、アームは振動しながら収束していることが確認できる。

そして手法(3)については、手法(2)と同様にステップ入力の角度が大きくなっても  $B_p$  によらず、アームは振動しながらも収束していることが確認できる。よって、手法(2)及び手法(3)は外部環境に接触した場合にシステムが安定となり、有効であることが言える。ここで、Table.5.1 においてアームの目標軌道との誤差を比較すると、どの入力に対しても提案手法のほうが誤差は小さくなっており、追従性の面で優れていることが確認できる。よって、外部環境に接触した際には手法(2)と手法(3)ともに安定となるが、追従性を考慮した場合、提案手法が有効であるといえる。

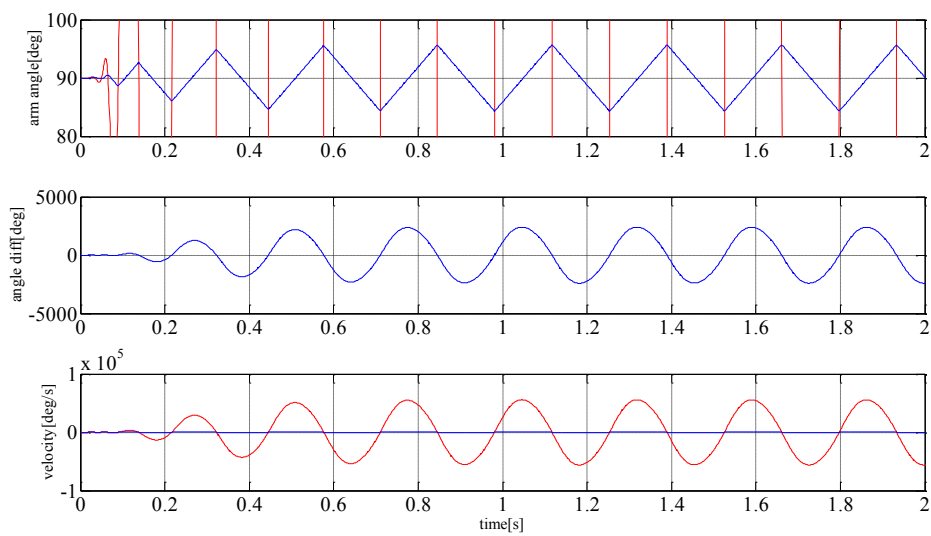


Fig.5.1 手法(1) 2deg のステップ入力

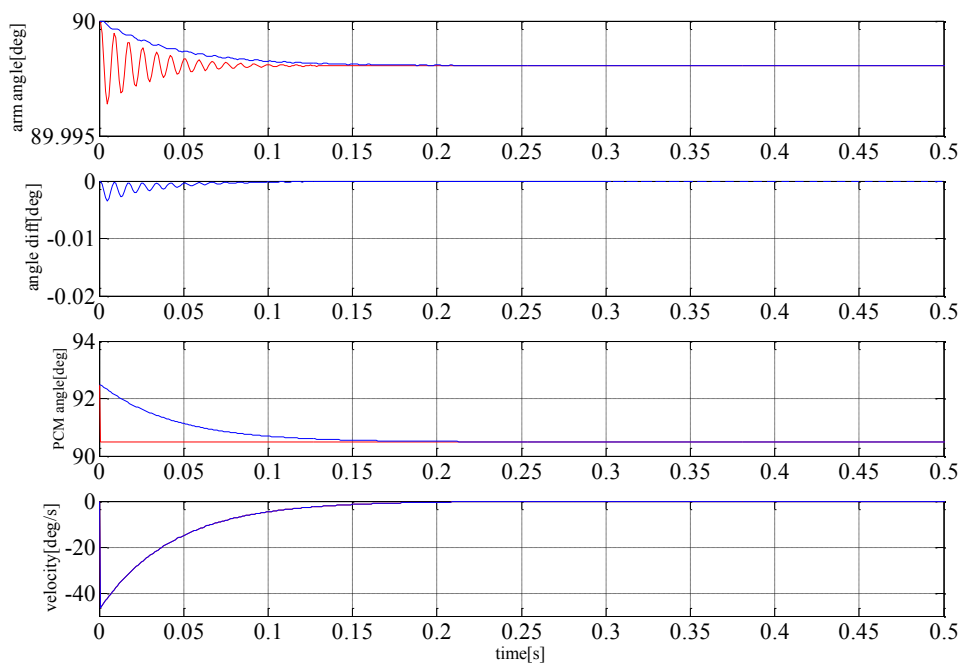


Fig.5.2 手法(2) 2deg のステップ入力

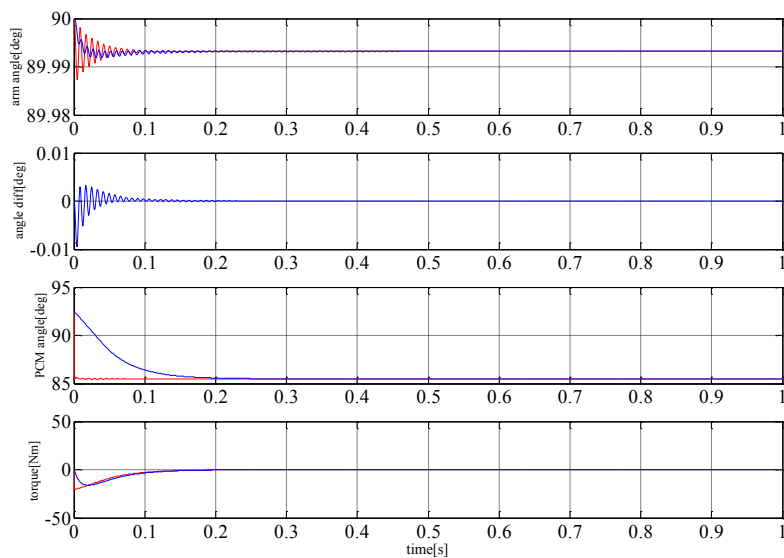


Fig.5.3(a) 手法(3) 7deg のステップ入力

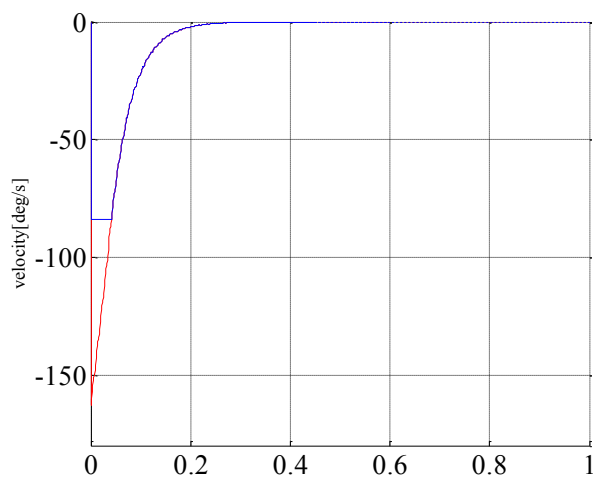


Fig.5.3(b) 手法(3) 7deg のステップ入力

Table5.1 解析に用いる各パラメータ

	手法(2)	手法(3)
2deg	0.0837	0.0404
5deg	0.2202	0.1015
7deg	0.3590	0.1444

## 5.2 外部環境に接触しない場合

### 5.2.1 シミュレーション条件

本節で，外部環境に接触しない場合のシミュレーション条件について述べる．前章の安定性解析と同様，アームの初期位置は地面と水平にし，シミュレーション開始直後にアームの目標平衡点  $\theta_0$  を負の方向に回転させるステップ入力を加え，その際のアームの挙動を観測する．そして，前節と同様にステップ入力の角度をいくらか用意し，様々な速度を観測できるようにシミュレーションを行う．

本節では，前節と同様に 3 つの手法に対してそれぞれシミュレーションを行う．1 つ目は，位置制御モータのみの駆動による手法(1)，2 つ目は直列弾性駆動システムによる手法(2)，そして 3 つ目は提案手法による手法(3)である．シミュレーションに用いた各パラメータも同様の値としている．



## 5.2.2 シミュレーション結果

本節ではシミュレーション結果について述べる。Fig.5.4 から Fig.5.14 に各手法でのシミュレーション結果を示す。また、各システムの追従性を評価するため、アームの目標軌道と実際の軌道との差を計算し、足し合わせた結果を Table5.2 に示す。各グラフの横軸はシミュレーション時間を示している。手法(1)の結果において、グラフの縦軸は上から順にアームの回転角度、アームの回転角度と目標軌道との誤差及び、位置制御モータの速度を示している。手法(2)の結果においては、グラフの縦軸は上から順にアームの回転角度、アームの回転角度と目標軌道との誤差、位置制御モータの回転角度及び位置制御モータの速度を示している。さらに、手法(3)の結果においては、グラフの縦軸は上から順にアームの回転角度、アームの回転角度と目標軌道との誤差及び、位置制御モータの回転角度及びトルク制御モータのトルクを示している。なお、図中赤色のプロットは目標値及び指令値を示し、青色のプロットは実際の値を示している。

まず手法(1)については、位置制御モータの記述関数ゲイン  $B_p$  の値にかかわらず、どのステップ角度に対してもアームの挙動は収束し、安定となっていた。前章の安定性解析では手法(1)の根は全て左半平面の実軸上に位置しており、システムは安定となっていたため、シミュレーション結果と一致することが確認できる。

次に手法(2)については、 $B_p$  の値に関わらず、すなわちどのステップ角度に対しても、シミュレーション開始直後にアームが振動し、発散する結果となった。前章の安定性解析では、手法(2)の代表極は  $B_p$  の値に関わらず、右半平面に位置しておりシステムは不安定となっていた。そのため、手法(2)についてもシミュレーション結果が安定性解析の結果と一致することが確認できる。

さらに手法(3)については、 $B_p$  の値が  $B_p(0.35)$  であり、 $B_t$  の値が  $B_t(0.5)$  のときから、アームの挙動が収束せずに発散することが確認できた。前章の安定性解析では、上記のパラメータの場合には代表極は虚軸付近に位置するものの、左半平面にあり、システムは安定となっていた。安定性解析の結果と完全には一致しなかった理由としては、シミュレーションでは速度が時間によって刻々と変化していくため、記述関数のゲインが一定とならないが、安定性解析では記述関数のゲインを一定の値として扱うため、値が変化しない。この差異によりシミュレーションと安定性解析の結果が異なると考えられる。ここで、手法(1)と比較すると、手法(1)ではステップ角度を大きくしてもシステムが不安定になることはなかったが、Table5.2 の結果から、提案手法のほうが従来手法よりも追従性が大きく向上できていることが確認できる。これらの結果から、前章でも述べたようにトルク制御モータを飽和しないようにコントローラを設計し制御することで、提案手法が外部環境に接触しない際にも有効であるといえる。

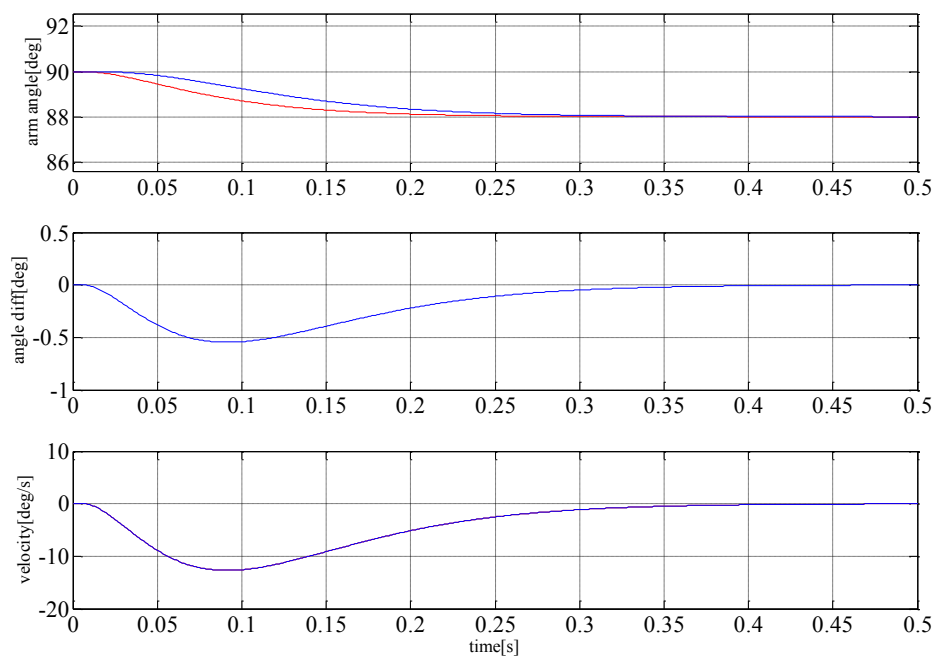


Fig.5.4 手法(1) 2deg のステップ入力

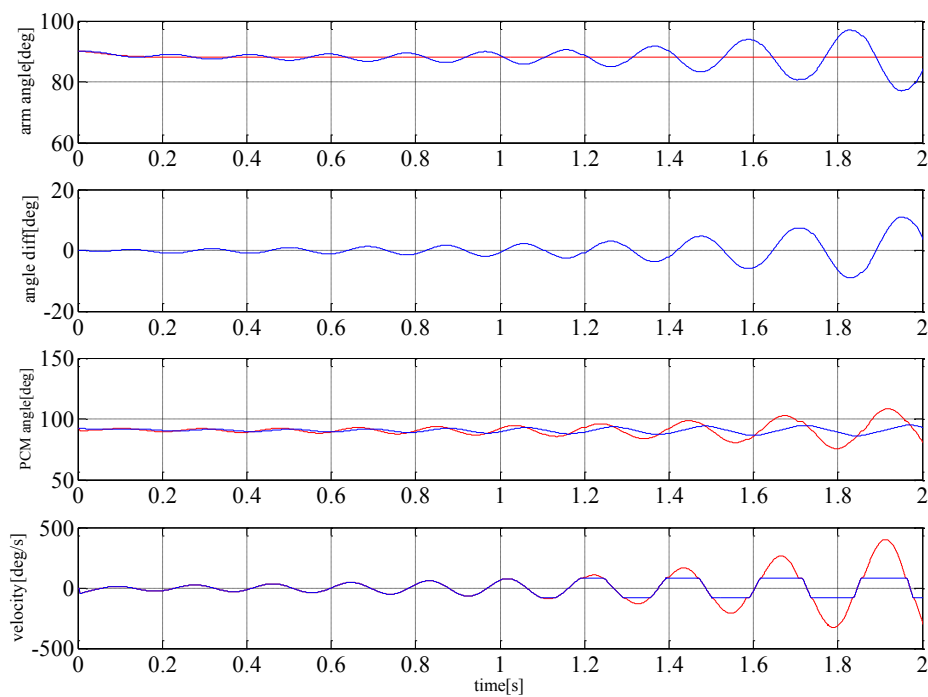


Fig.5.5 手法(2) 2deg のステップ入力

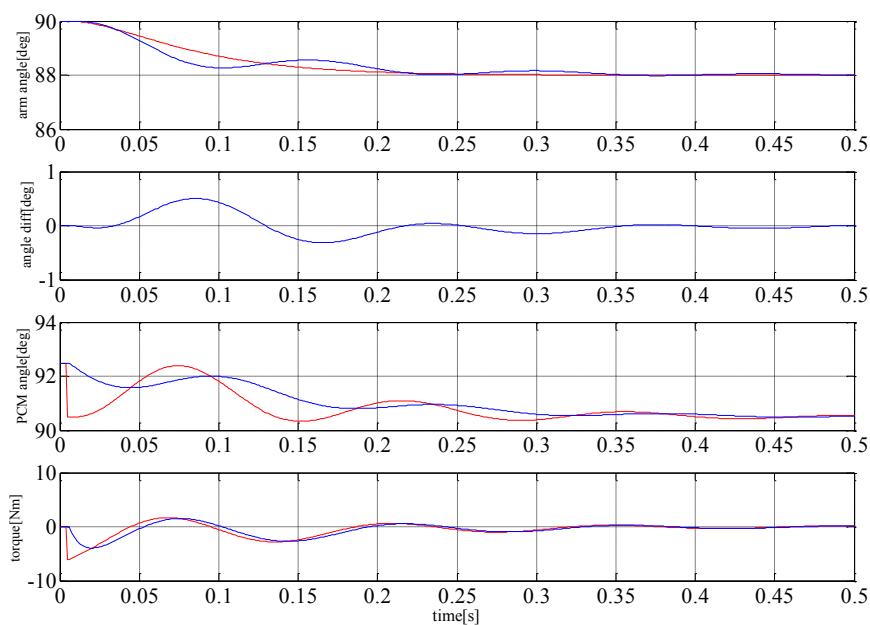


Fig.5.6(a) 手法(3) 2deg のステップ入力

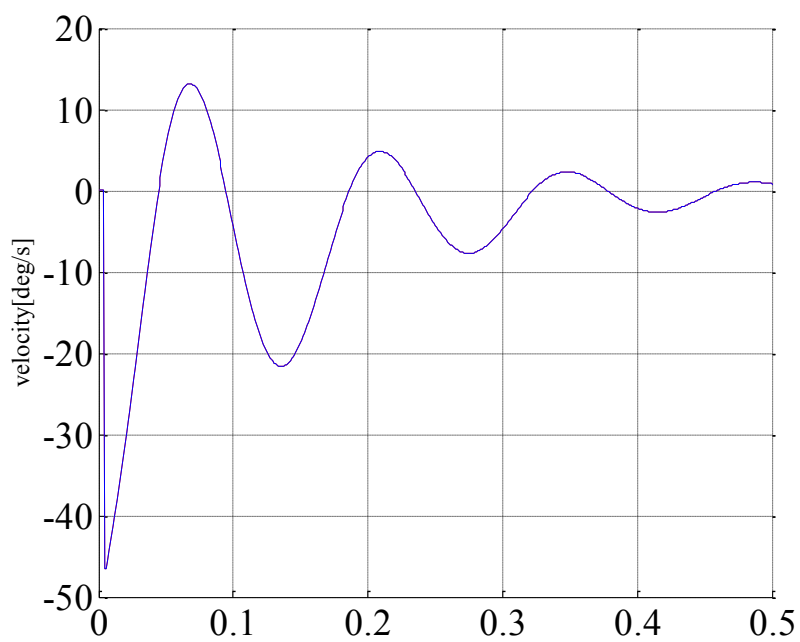


Fig.5.7(b) 手法(3) 2deg のステップ入力

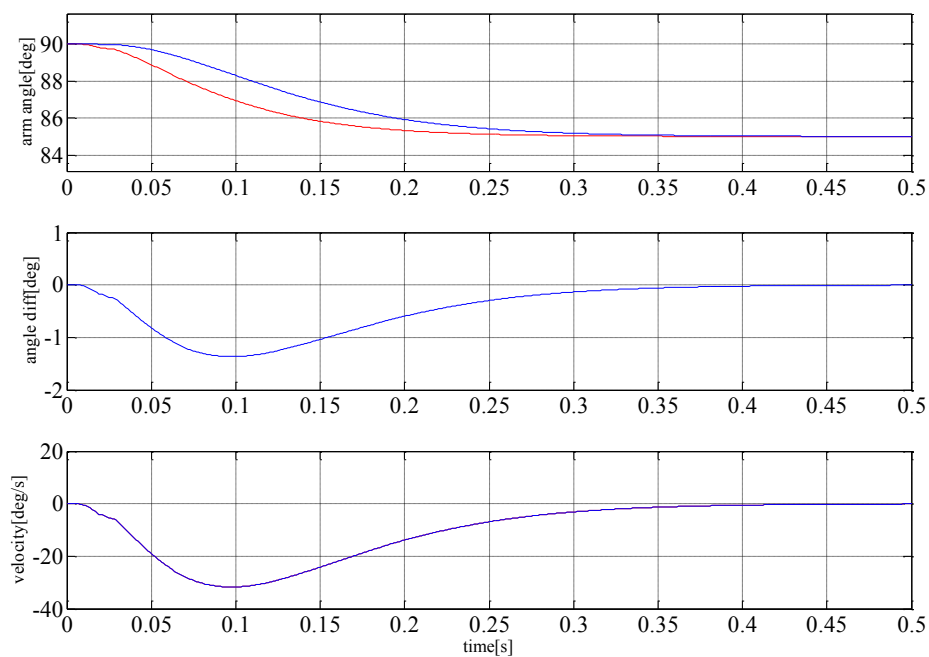


Fig.5.8 手法(1) 5deg のステップ入力

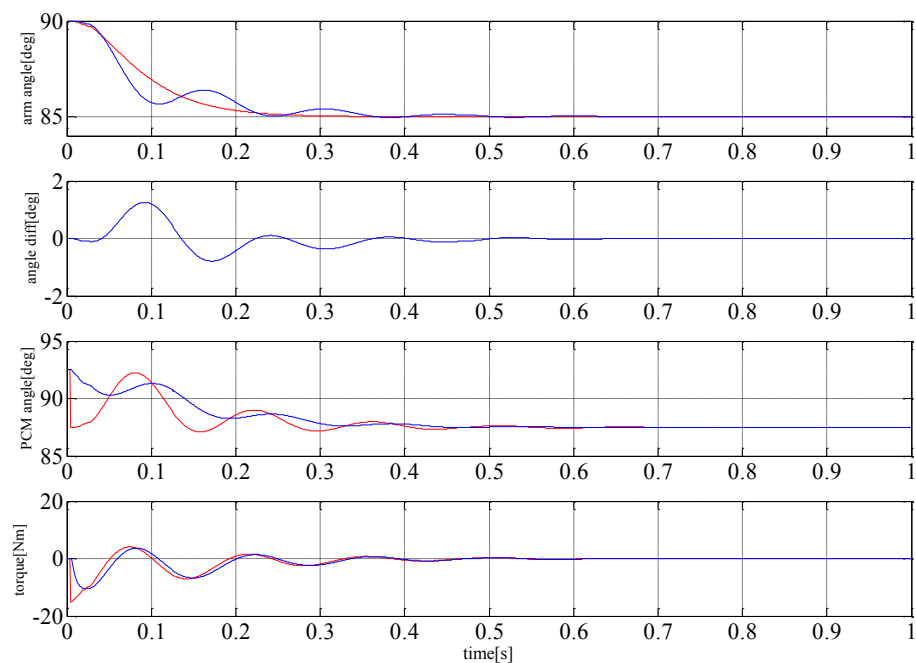


Fig.5.9(a) 手法(3) 5deg のステップ入力

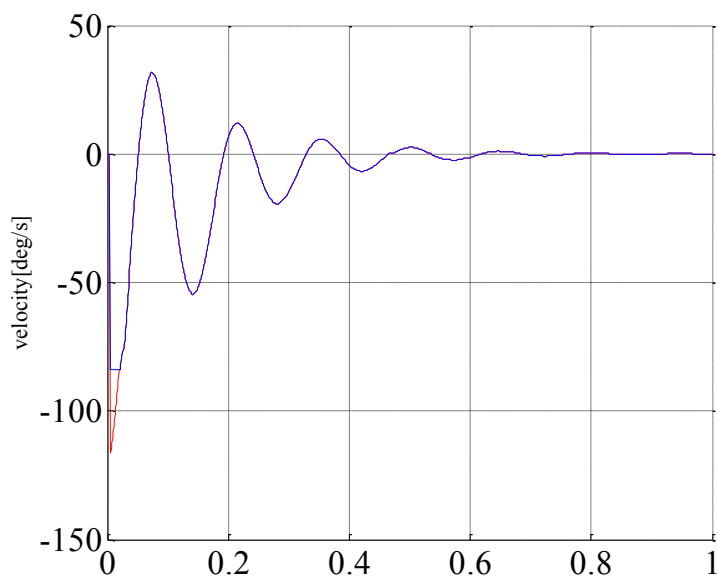


Fig.5.9(b) 手法(3) 5deg のステップ入力

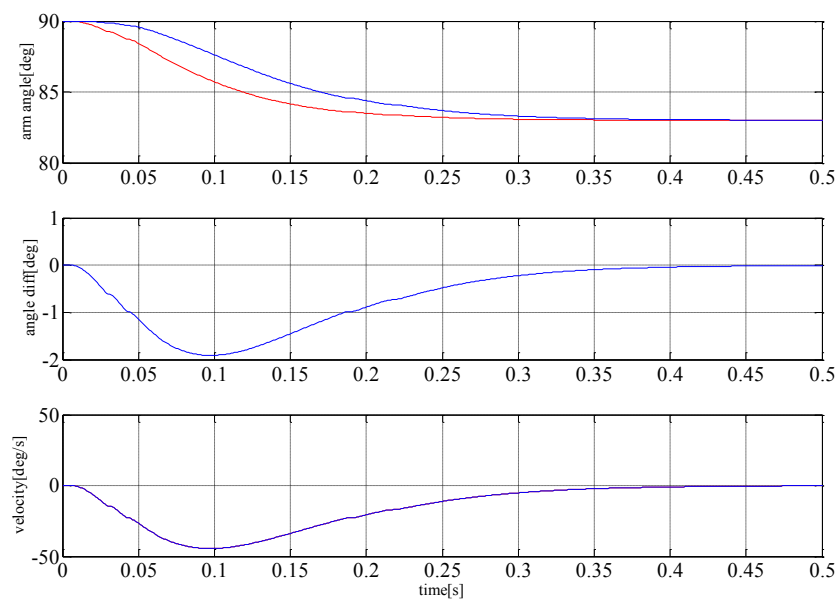


Fig.5.10 手法(1) 7deg のステップ入力

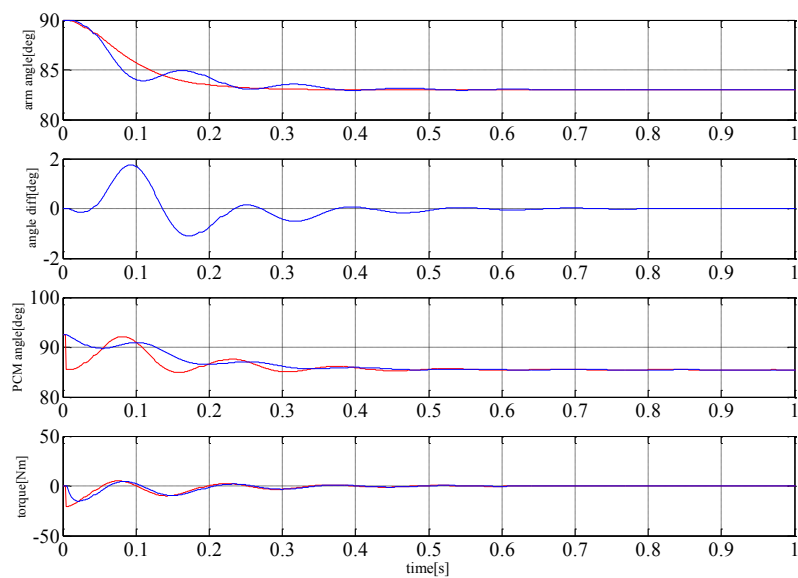


Fig.5.10(a) 手法(3) 7deg のステップ入力

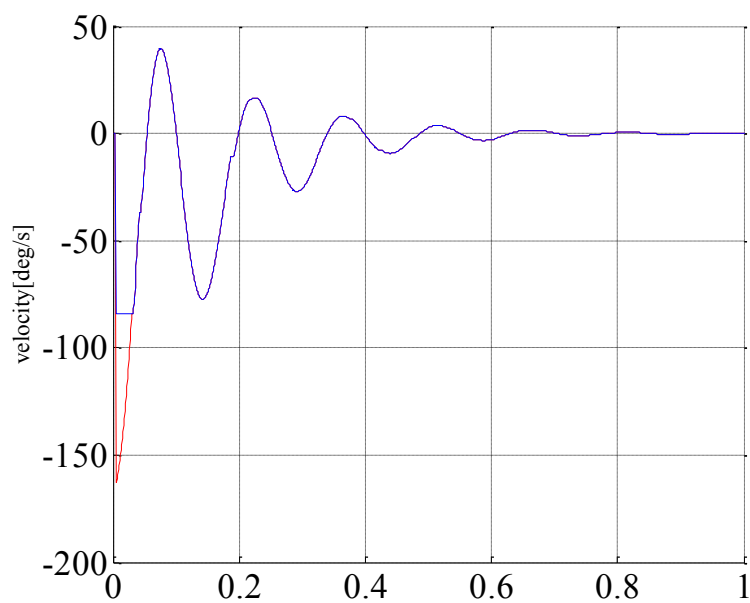


Fig.5.10(b) 手法(3) 7deg のステップ入力

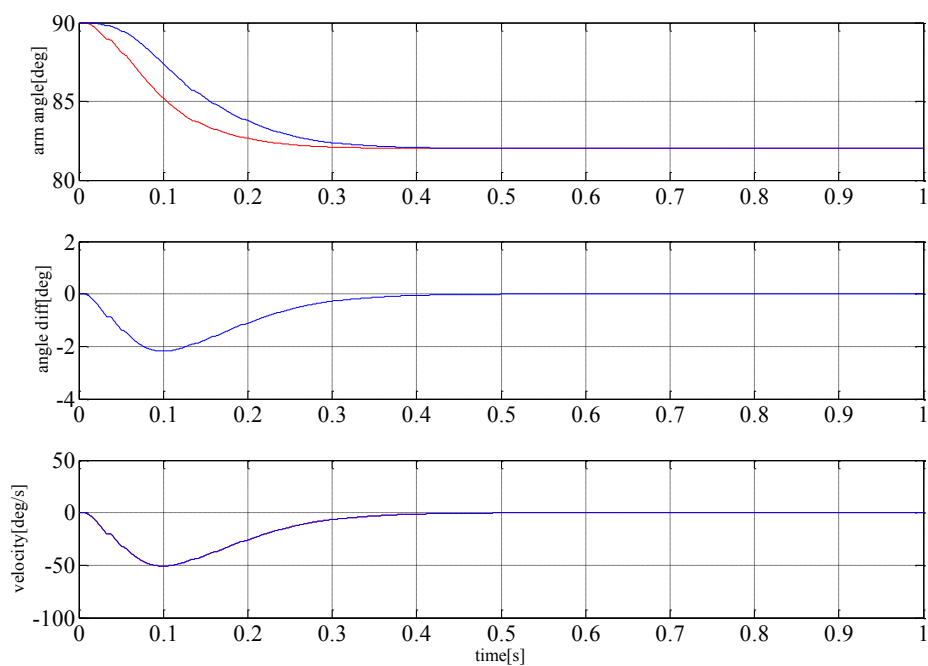


Fig.5.11 手法(1) 8deg のステップ入力

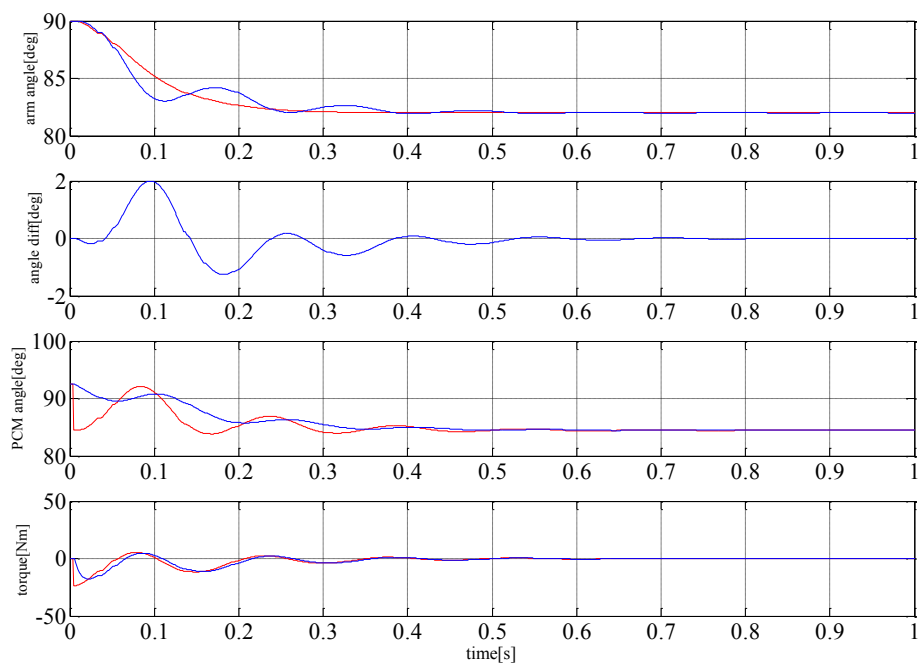


Fig.5.12(a) 手法(3) 8deg のステップ入力

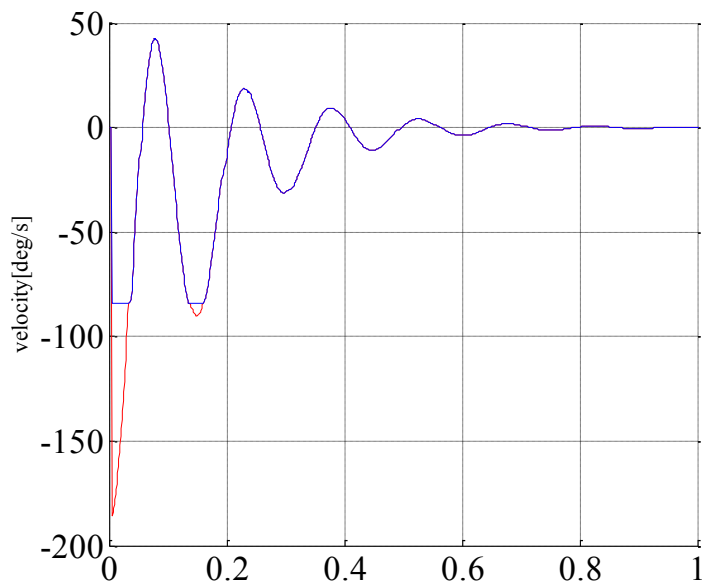


Fig.5.12(b) 手法(3) 8deg のステップ入力

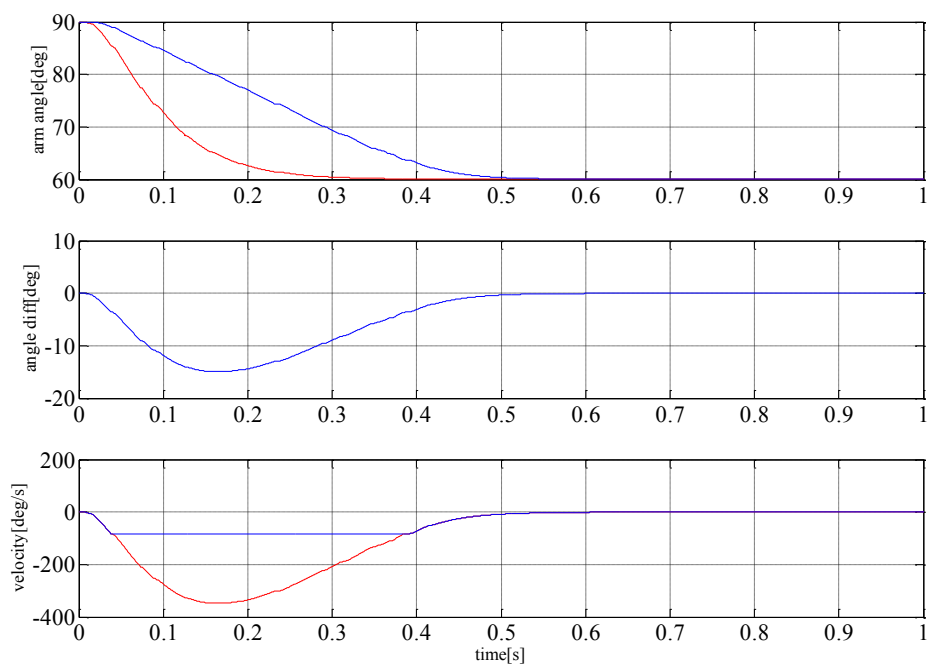


Fig.5.13 手法(1) 30deg のステップ入力



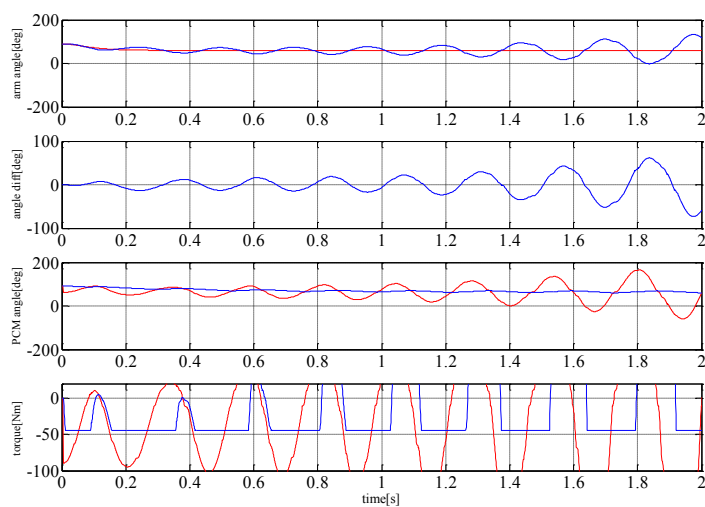


Fig.5.14(a) 手法(3) 30deg のステップ入力

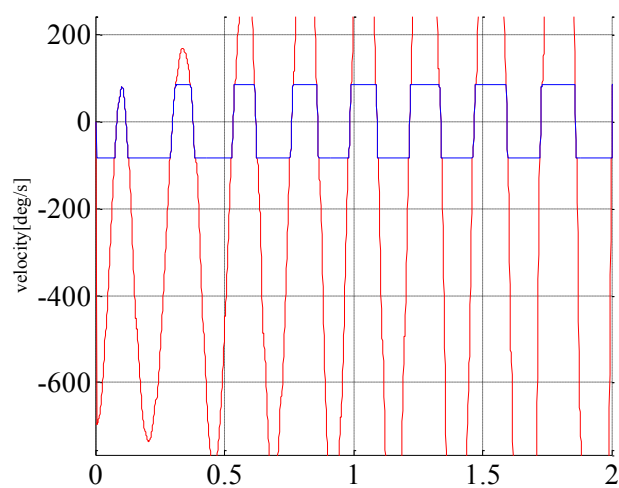


Fig.5.14(b) 手法(3) 30deg のステップ入力

Table.5.2

	手法(1)	手法(3)
2deg	86.0	61.1
5deg	216.3	154.4
7deg	314.8	220.8
8deg	372.7	257.3

## 第6章

# 提案手法の有効性検証

前章の結果から、位置制御モータのみの駆動による手法及び直列弾性駆動システムによる手法と比較して、提案手法はシステムの安定性及び追従性のどちらも向上できていることが確認できた。そこで、本章では提案手法が実際に各手法の中で最も有効であることを検証するために行った実験について述べる。なお、位置制御モータの速度飽和が最も発生しうると考えられるため、システムが外部環境に接触しない場合について実験を行った。6.1節では実験条件について述べ、6.2節では実験結果について述べる。

### 6.1 実験条件

本節で、第2章にて示した実験装置を用いた外部環境に接触しない場合の実験条件について述べる。前章の安定性解析と同様、アームの初期位置は地面と水平にし、実験開始直後にアームの目標平衡点  $\theta_0$  を負の方向に回転させるステップ入力を加え、その際のアームの挙動を観測する。実験装置や設定した各パラメータは Table 3.2 と同様である。また、本実験では直列弾性駆動システムによる実験(1)及び提案手法による実験(2)の2つの手法について実験を行う。

以上の2つの手法による実験を行い、前章の安定性解析及びシミュレーションと同様の結果が得られるかを確認する。

## 6.2 実験結果

本節では実験結果について述べる. Fig.6.1 から Fig.6.5 に各手法での実験結果を示す. 各グラフの横軸はシミュレーション時間を示している. 実験(1)の結果において, グラフの縦軸は上から順にアームの回転角度, アームの回転角度と目標軌道との誤差及び, 位置制御モータの回転角度を示している. また, 手法(3)の結果においては, グラフの縦軸は上から順にアームの回転角度, アームの回転角度と目標軌道との誤差及び, 位置制御モータの回転角度及びトルク制御モータのトルクを示している. なお, 実験結果とともに前章のシミュレーション結果を示す. 図中赤色のプロットはシミュレーション結果を示し, 図中青色のプロットは実験結果を示す. また, 緑色のプロットは実験での位置制御モータの実際の速度を示している. そして, 各図の実線は実際の値を示し, 破線は目標値及び指令値を示している.

まず実験(1)については, Fig.6.1 においてステップ入力に加わった瞬間からアームが振動し, 振動が収まらずシステムが不安定となっている. また, このとき位置制御モータの飽和は発生していない. 実験(1)については前章の安定性解析において, 位置制御モータの記述関数ゲイン  $B_p$  の値に関わらず位相余裕が負の値となっており, システムは不安定となっていたため, シミュレーションにおいてもシステムは不安定となっていたが, 実験でも同様の結果となることが確認できる. このことから, 直列弾性駆動システムによる手法は, 外部環境と接触しない場合の駆動に有効ではないといえる.

次に実験(2)については, 入力されるステップ入力の角度が 7deg までであれば, アームは振動しながら収束していることが確認できる. そして, ステップ角度が 8deg を超えるとステップ入力直後にアームが振動し, 発散する結果となった. ここで, ステップ角度が 7deg と 8deg のときのそれぞれのステップ直後の位置制御モータの速度指令値に着目すると, 7deg では  $B_p$  の値は  $B_p(0.4)$  であり, 8deg では  $B_p(0.22)$  となっている. そして, 8deg の場合においてトルク制御モータでは飽和は発生していなかった. このことから, 安定性解析においてはどちらの場合にもシステムは安定となっていたため, 安定性解析及びシミュレーションとは異なる結果となった. 8deg の場合にシステムが不安定となった原因のひとつとしては, ステップ入力直後の振動を収束する過程でトルク制御モータにおいて飽和が発生してしまった結果, システムが発散してしまったということが考えられる. Fig.6.5(a)のトルク制御モータのトルクの値に着目すると, ステップ直後には飽和が起きていないが, その後の波形の中で段々とトルクの値が大きくなり, 飽和が発生してしまっている. 前章の安定性解析においては, 位置制御モータの飽和値がどれだけ大きくなってもシステムが不安定になることはなかったが, トルク制御モータの記述関数ゲイン  $B_t$  が減少するにつれて, 急激にシステムの代表極が右半平面へ推移し,  $B_t(0.1)$  以下になるとシステムは不安定となっていた. このことから, トルク制御モータの記述関数ゲイン  $B_t$  が段々と減少していったことにより, システムが不安定な状態へと推移してしまっただけのため, 振動を収束しきれずに

システムが発散してしまったと考えられる。そのため、前章の安定性解析で示した結果とおおむね近い傾向を実験により確認することができた。シミュレーションと結果が異なってしまった原因としては、ステップ入力の角度が同じでも、位置制御モータの指令値が異なるため、 $B_p$ の値が等しくならないということが考えられる。また、安定性解析との差異の原因としては、前章のシミュレーション結果でも述べたことと同様に、実験では速度が時間によって刻々と変化し、指令値も刻々と変化するため記述関数のゲインが一定とならないが、安定性解析では記述関数のゲインを一定の値として扱うため、値が変化しない。これにより条件が完全に一致していないため、少し異なる結果が得られたと考えられる。さらに、実験装置には減速機の摩擦が存在するが、静摩擦や動摩擦を安定性解析やシミュレーションに組み込んでいないことも原因のひとつと考えられる。

しかし、これら2つの手法による実験の結果、直列弾性駆動システムは常に不安定となるが、提案手法においてはトルク制御モータの飽和が発生しない範囲であれば、システムは安定となることが確認できた。よって、外部環境に接触しない場合には提案手法が有効であるといえる。そして、前章の結果などから、外部環境に接触する場合、しない場合のどちらにおいても提案手法が有効であることを確認することができた。

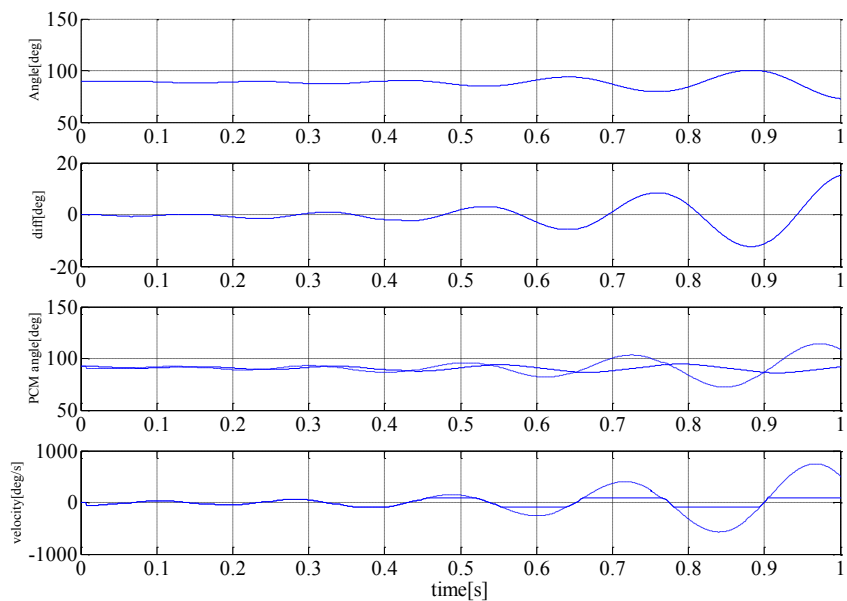


Fig.6.1 実験(1) 2deg のステップ入力

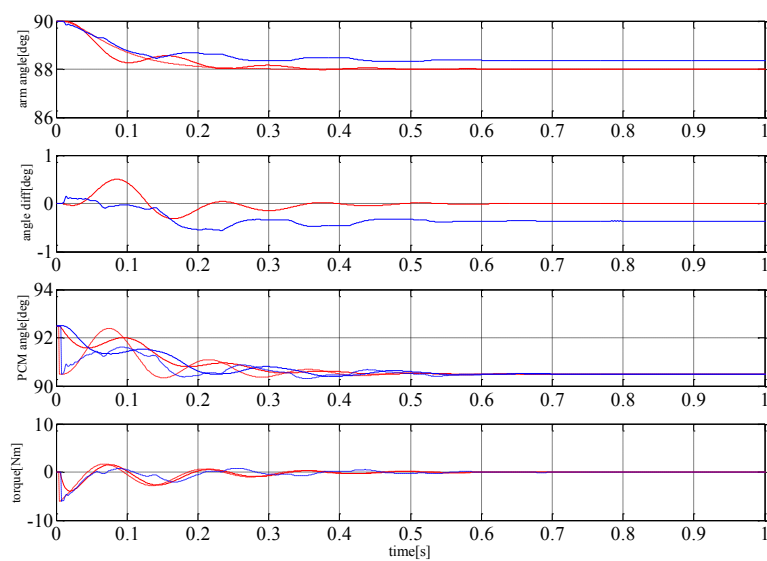


Fig.6.2(a) 実験(2) 2deg のステップ入力

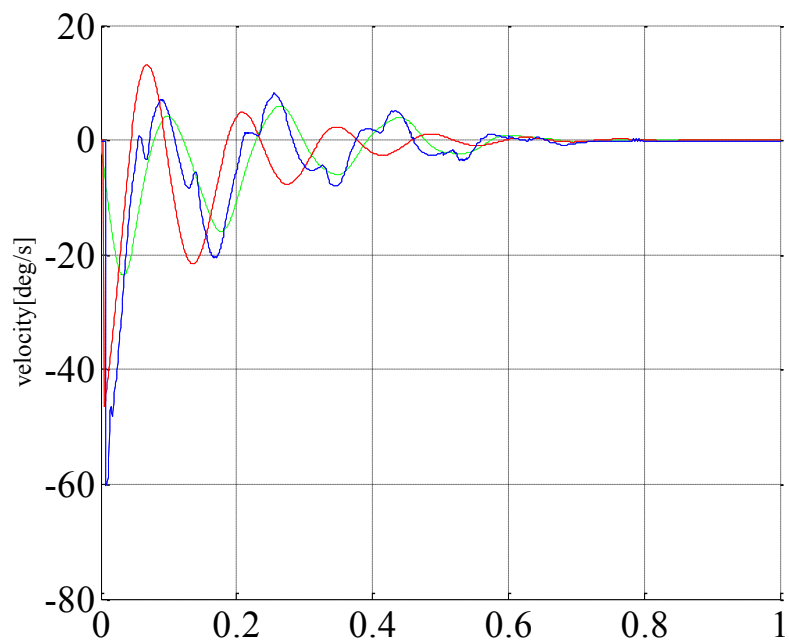


Fig.6.2(b) 実験(2) 2deg のステップ入力

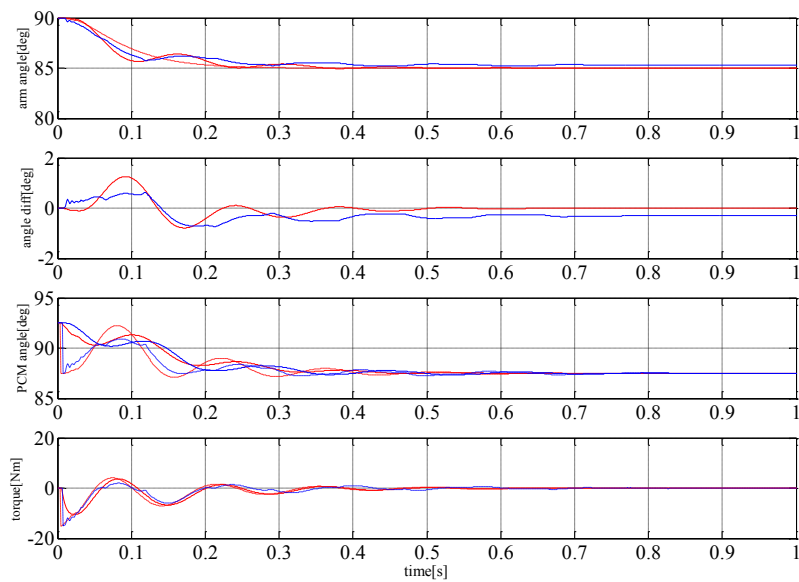


Fig.6.3(a) 実験(2) 5deg のステップ入力

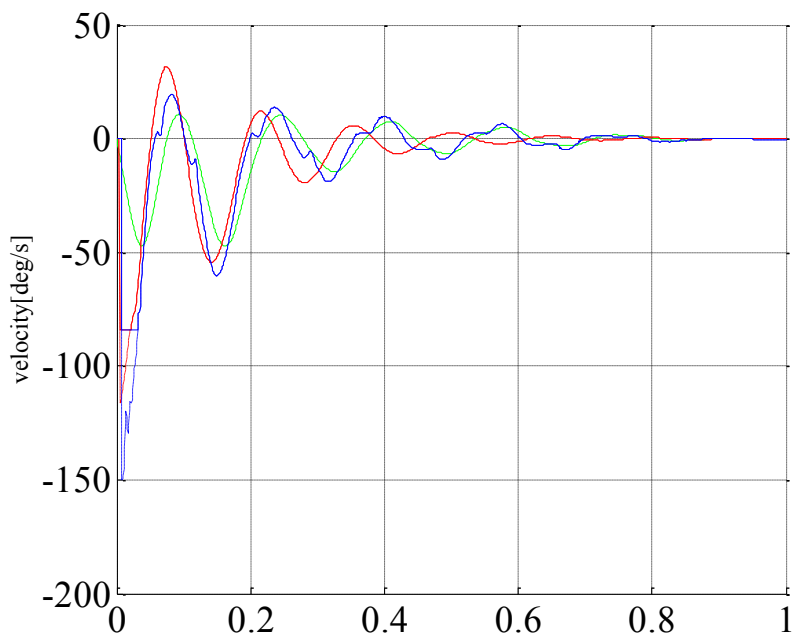


Fig.6.3(b) 実験(2) 5deg のステップ入力

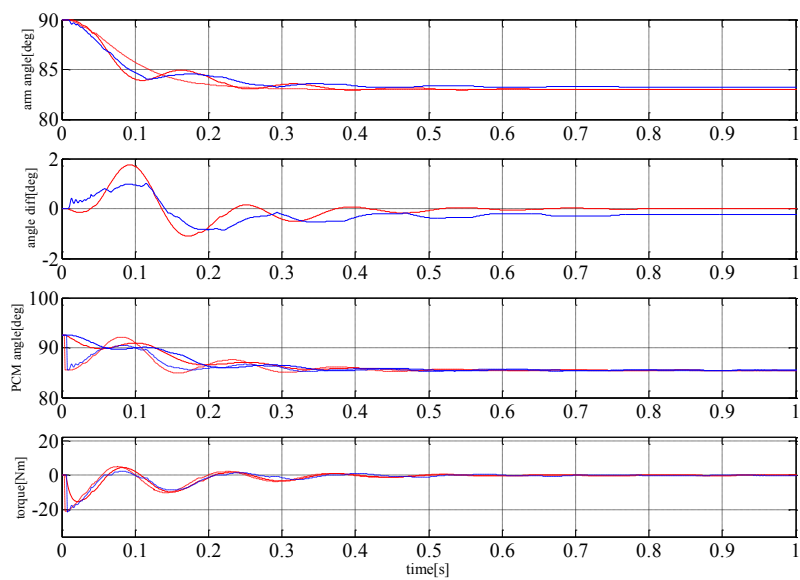


Fig.6.4(a) 実験(2) 7deg のステップ入力

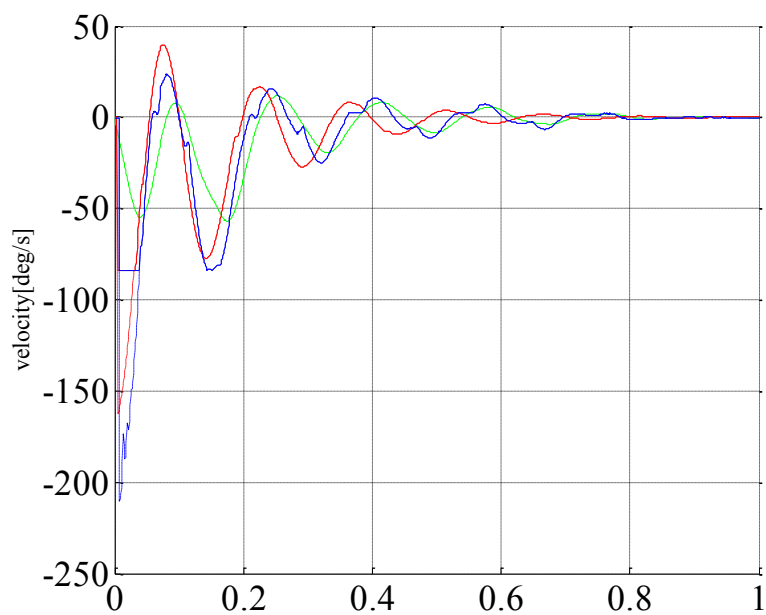


Fig.6.4(b) 実験(2) 7deg のステップ入力

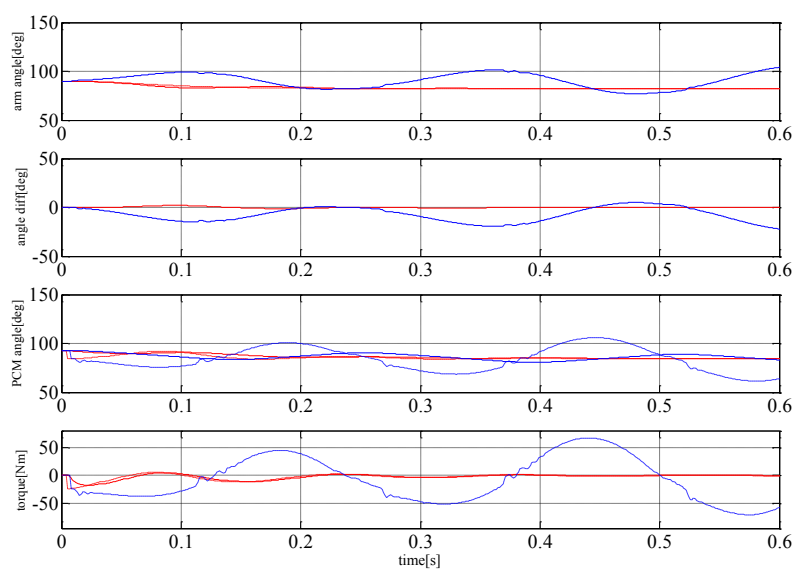


Fig.6.5(a) 実験(2) 8deg のステップ入力



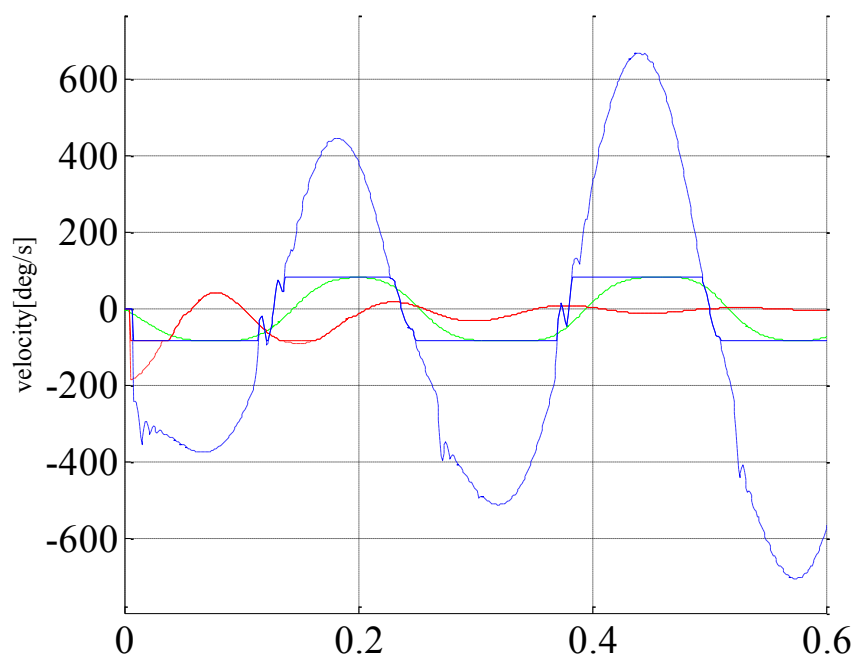


Fig.6.5(b) 実験(2) 8deg のステップ入力

# 第7章

## 結言

### 7.1 まとめ

現在、日本では少子高齢化の影響から生産年齢人口の割合が減少し、老年人口の割合が増加している。このことから、生産年齢人口が減少し、産業全体の衰退が危惧されるとともに、高齢者福祉に関係した従事者の需要増に対応できない心配がある。そこで今後の日本では、医療や介護の分野において人と協調して働くロボットの活躍が期待されている。人とロボットの協調作業例として、ロボットによる人の抱き上げ作業がある。このようなロボットには、高負荷に耐えられ、人に不安感を与えないようにできるだけ人間に近い感触を再現できることや、人や外部環境と接触した際にも安全に駆動できることが必要とされる。そのため、ロボットアームの駆動方法や制御方法について様々な手法が提案されてきた。しかし、安全性を高めた上で、高負荷に対応したシステムは従来研究では行われていなかった。そこで、本研究では高負荷に対応できるように、弾性要素としてゴムメタル製のトーションバーを用い、モータを付加した直列弾性駆動システムを構築し、その機構に対してインピーダンス制御を適用することを提案した。そして、研究室での先行研究として、提案手法が従来手法と比較して、応答性が改善されることや、システムが外部環境と接触した際の安定性解析を行い、提案手法が有効であることを確認した。しかし、高減速アクチュエータの許容速度及び、低減速アクチュエータが発揮できる最大トルクを考慮した安定性については検証されていない。

そこで、本研究ではモータを付加した直列弾性駆動システムのインピーダンス制御において、高減速ギアの許容速度を考慮したうえで、提案手法の有効性を検証することを目的として、システムの安定性解析や追従性の評価を行った。そして、安定性解析及び追従性評価の結果から、提案手法が3つの手法の中で最も有効であることが確認できた。さらに、理論解析の結果どおり、提案手法が有効であることを検証するため、実験を行った。その結果、理論解析の結果と同様の結果が得られ、提案手法によるシステムが従来手法よりも安定性及び追従性のどちらにおいても向上していることが確認でき、提案手法が有効であることを確認できた。

## 7.2 今後の課題

今回、提案手法においてシミュレーション結果と実験結果が一致しなかった。これはシミュレーション中に、位置制御モータに用いている高減速比の減速機やトルク制御モータに用いている低減速比の減速機のモデル、特に摩擦のモデルを組み込んでいないためだと考えられるので、摩擦を考慮してシミュレーションを行って行く必要がある。また、本研究でトルク制御モータにおいて飽和が発生すると提案手法によるシステムの安定性が大きく低下することが確認できた。よって、トルク制御モータに飽和が発生しないようなコントローラ的设计を行い、制御する必要がある。さらに、今回は目標インピーダンスの各パラメータを一定としていたため、それらの値を変更し、理論解析、シミュレーション及び実験を行い、提案手法の評価を行っていく必要がある。

## 参考文献

- [1]総務省統計局:「人口推計(平成 28 年 12 月 1 日現在)」
- [2] RIBA 公式ページ 理研-東海ゴム 人間共存ロボット連携センター
- [3]向井利春, 平野慎也, 中島弘道, 境田右軌:「介護支援ロボット RIBA の安全対策と移乗作業の実現」, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2010, 1A1-E24(1)-1A1-E24(4) (2010)
- [4]田中大資, 中村太郎:「人工筋肉マニピュレータの剛性制御」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 1A2-M02(1-4) (2009)
- [5]斎藤創, 佐藤拓史:「先端質量の変動に対するフレキシブルロボットアームの振動制御」, 第 55 回自動制御連合講演会, pp.1721-1726 (2012)
- [6]岡崎安直, 山本正樹, 小松真弓, 津坂優子, 足達勇治:「空気圧人工筋による人に対して安全な多自由度ロボットアーム技術の開発」, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.3, pp.302-310 (2010)
- [7]西堀賢司, 天野良紀:「磁性流体アクチュエータを用いたロボットアームのトルク制御」, 日本機械学会東海支部第 56 期総会講演会講演論文集, No.073-1, pp.5-6 (2007)
- [8]日本バイナリー株式会社, フォース制御ロボットアーム WAM Arm, 日本バイナリー株式会社ホームページ <http://www.nihonbinary.co.jp/Products/Robot/WAMArm.html>
- [9] Ryota Ozawa, Hirosaki Kobayashi and Ryota Ishibashi : 「 Adaptive impedance control of a variable stiffness actuator」 Advanced Robotics, 2015Vol. 29, No. 4, 273–286(2015)
- [10] 菅野重樹, 岩田浩康, 菅岩泰亮:「人間共存ロボット TWENDY-ONE のデザイン」, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要 2008, No.08-4, 2A1-D23(1)-2A1-D23(2) (2008)
- [11]Rethink Robotics , baxter , Rethink Robotics 社 ホーム ページ <http://www.rethinkrobotics.com/>
- [12]Michael Zinn, Bernard Roth, Oussama Khatib, J. Kenneth Salisbury: 「A New Actuation Approach for Human Friendly Robot Design」, The International Journal of Robotics Research, Vol.23, No.4–5, pp.379-398 (2004)
- [13]M. Zinn and O. Khatib and B. Roth and J. K. Salisbury: "Large Workspace Haptic Devices - A New Actuation Approach", Proc. of the IEEE Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 185--192, Reno, NV, USA ( 2008)
- [14]相根祥吾 :「アクチュエータを付加した直列弾性駆動システムのインピーダンス制御に関する研究」, 三重大学修士学位論文(2014)
- [15]高橋俊也 :「モータを付加した直列弾性駆動システムのエネルギー蓄積による性能改善手法に関する研究」, 三重大学修士学位論文 (2015)

- [16]安田佳祐: 「トルク制御アクチュエータを付加した直列弾性駆動システムのインピーダンス制御における接触安定性に関する研究」, 三重大学修士学位論文(2016)
- [17]西野和彰: 「多機能新合金”ゴムメタル”」, 日本機械学会誌, Vol.106, No.1020, p.899 (2003)
- [18]株式会社ニッセイ, GUMMETAL, 株式会社ニッセイホームページ <http://www.nissey-sabae.co.jp/wp/wp-content/uploads/gummetal.pdf>
- [19]平井一正, 羽根田博正, 北村新三, 1980年『システム制御工学』, 森北出版.

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、所属研究室であるシステム設計研究室 池浦良淳教授には、学部四年生から修士二年生までの三年間、私が研究に行き詰った際、何度も質問に伺い、その都度丁寧なご説明、ご指導を親身になって行って頂いたことに深く感謝し、厚く御礼申し上げます。また、お忙しい中本論文を査読して頂くとともに、多数のご教示、ご助言を賜りました本学メカトロニクス研究室 矢野賢一教授に厚く御礼申し上げます。加えてこの三年間、研究だけでなく先生の持たれている様々な知識や経験談を話していただき、ご指導をいただいたシステム設計研究室 早川聡一郎准教授に深く感謝し、厚く御礼申し上げます。研究についての問題点、これまで行ってきた研究での経験や実際に実験装置を製作されてきた立場からのご意見やご指導をいただいた澤井秀樹研究員に深く感謝し、厚く御礼申し上げます。また、本研究で使用する実験装置の製作にあたり、多大なご協力をいただきました、シンフォニアテクノロジー株式会社 有賀信雄様、石田泰介様に深く感謝し、御礼申し上げます。

研究の進め方や、MATLAB の使い方、研究室での生活について様々なアドバイスや指導をいただいた研究室の先輩方皆さんに深く感謝します。また、同じ研究グループとして共に、シミュレーションや実験をしてくれた多氣淳史君に深く感謝します。そしてこの研究室で学部の時から三年間、研究内容は違う中で情報交換をしながら共に過ごした同期の森田朋大さん、有住卓朗君、小嶋友輔君、舘新太君、山田純君、BUI MINH NHAT さんに深く感謝申し上げます。

最後となりましたが、大学での六年間、常に惜しめない援助を送ってくれた父と母のお陰で充実した学生生活を送ることができました。ここに感謝の気持ちを述べることで謝辞の最後とさせていただきます。