

—修士論文—

非線形バネを用いた腱駆動機構の
制御に関する研究

A Study on Control of Tendon Driven Mechanism
with Nonlinear Springs

令和5年度

三重大学大学院工学研究科
博士前期課程 電気電子工学専攻
田中 龍之介

目次

第1章 緒言	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 論文の構成	3
第2章 非線形バネを用いた腱駆動機構	4
2.1 制御対象	4
2.2 非線形バネを用いた腱駆動機構	5
2.3 線形バネと非線形バネ	6
第3章 腱駆動機構の定式化	7
3.1 運動学	7
3.2 動力学	7
3.3 関節機械剛性	8
第4章 制御器設計	9
4.1 共振比制御	9
4.2 接触トルク制御器	10
4.3 接触環境	10
第5章 検証	12
5.1 目標値追従	12
5.1.1 検証条件	12
5.1.2 検証結果	14
5.2 ゼロトルク制御	19
5.2.1 検証条件	19
5.2.2 検証結果	19
第6章 結言	23

参考文献	24
謝辞	25

第1章 緒言

1.1 研究の背景と目的

近年、ロボットアームの作業環境が工場内などの立ち入り禁止区域から、病院やオフィスなどの人間環境下へと拡大している。この変化に伴い、人間環境下で作業を行うロボットには、人間や環境との接触を考慮した安全性や様々な作業に対応できる汎用性が要求される [1]。

まず、安全性の要求を満たすため、腱駆動機構を用いることが提案されており、この機構はアームにアクチュエータを含まないためアームが軽量で安全性が高い [2]。本研究では、生体が筋骨格系の持つ駆動冗長性や筋の可変粘弾性により優れた柔軟性を実現していることに注目し、その筋骨格系に近い構造である非線形バネを用いた腱駆動機構を研究対象としている。非線形バネはバネの張力と伸び量の関係が非線形という特徴がある。ゆえにそれらの機械剛性は動作点によって変化する。この性質を利用することで、腱駆動アームの関節の硬さである関節剛性を機械的に調整することが可能となる。よって本腱駆動機構は、非線形バネによる可変機械剛性を持ち、人間環境下で要求される動作を実現できる。

関連研究では、バネとモータを直列に接続した機構で、機械剛性を適切に選定することで制御性能を向上させることが確認できた [3]。しかし、位置制御特性に対するバネ剛性の効果は不明確であり、線形バネを対象としているため、バネを可変にするものの有用性は述べられていない。一方、本腱駆動機構にて、共振抑制制御と PD 制御器を用いた簡易な位置・剛性制御系により、バネ剛性の効果とそれを可変にするものの有用性についての検証を行った研究がある [4]。この研究結果から、バネ剛性を高めることにより制御系の応答を速め、応答の振動抑制が可能であることを確認した。しかし、これらの論文では低剛性体を用いる利点が具体的に述べられていなかった。一方、二慣性共振系での軸に低剛性体を用いることで、負荷トルク応答の早い立ち上がりを実現可能であることが確認された [5]。また、低剛性体のほうがより正確なゼロトルク制御を実現可能であることが確認された。しかし、この論文では非線形バネを用いた腱駆動機構での検証は行われていない。

そこで、本研究では文献 [5] の二慣性共振系の制御系を非線形バネを用いた腱駆動機構で実現し、さらに関節剛性制御を実現する。関節剛性を可変としたとき、剛性指令値に低剛性を与える利点を確認する。

本論文では、低剛性指令値を与える有用性を検討していくため、二慣性共振系の検証で用いられた制御系を非線形バネを用いた腱駆動機構で実現したことを示す。シミュレーションでは、目標値追従制御時に剛性指令値を高剛性と低剛性にしたときの比較を行い、低剛性を与えたほうが早い整定時間を実現できていることを示す。また低剛性指令値を与えることでより正確なゼロトルク制御が実現できることを示す。

1.2 論文の構成

本論文は全 6 章で構成されており、各章の構成は以下の通りである。

第 2 章 非線形バネを用いた腱駆動機構

本研究の制御対象である非線形バネを用いた腱駆動機構の概要を説明する。

第 3 章 腱駆動機構の定式化

腱駆動機構における運動学，動力学などの定式化を行う。

第 4 章 制御器設計

非線形バネを用いた腱駆動機構の制御系について説明する。

第 5 章 検証

目標値追従とゼロトルク制御での接触トルクを確認し，関節剛性を変化させたときの応答を比較する。

第 6 章 結言

まとめと今後の課題について述べる。

第2章 非線形バネを用いた腱駆動機構

本章では，本研究の制御対象である非線形バネを用いた腱駆動機構について説明する．

2.1 制御対象

従来研究 [5] では，二慣性共振系を制御対象とし，本研究では非線形バネを用いた 1 関節 2 本腱の腱駆動を制御対象としている．制御対象の差異として，二慣性共振系では，入力がモータトルク τ_m ，出力が関節トルク τ_j の 1 入力 1 出力系であるのに対し，腱駆動機構では入力が 2 つのモータトルク τ_m ，出力が関節トルク τ_j と関節剛性 s_j の 2 入力 2 出力系である．また従来研究では線形バネを使用していたが，本研究では非線形バネを使用している．この差異に着目しながら，二慣性共振系の制御系を非線形バネを用いた腱駆動機構へと拡張する．

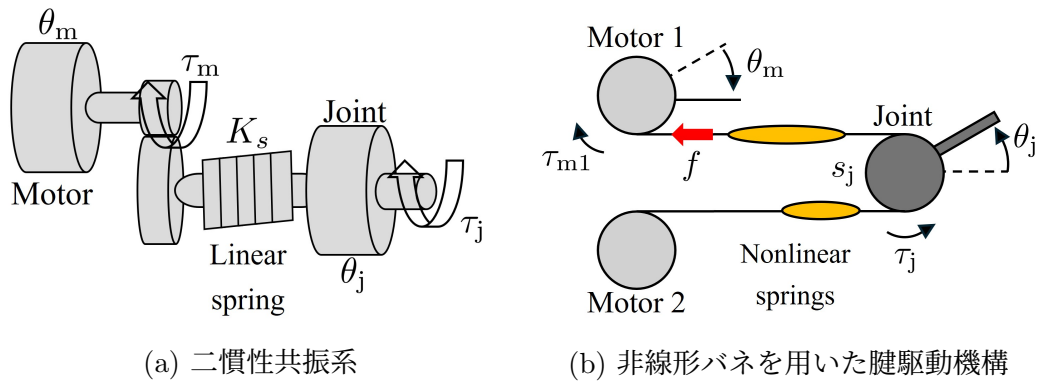


図 2.1: 制御対象

2.2 非線形バネを用いた腱駆動機構

図 2.2 に 1 関節 2 本腱の非線形バネを用いた腱駆動機構の模式図を示す．図中の θ_m , τ_m はそれぞれモータの回転角とモータトルク, θ_j , τ_j はそれぞれ関節の回転角と関節トルクを示す．また, f はバネの張力である．本機構は, 2 つのモータと 1 つの関節が 2 本のバネを介したワイヤによって接続されており, 人間の筋骨格構造を模擬した機構となっている．2 本のバネ張力 f は 2 つのモータによって発生され, 関節トルク τ_j は 2 本のバネ張力の差により発生する．腱構造を用いることで, 可動部にアクチュエータがなく, 軽量なアームを実現することができる．また, 腱にバネを介すことでアームへの突発的な衝撃をバネが吸収することができ, 接触安全性の確保が可能となる．さらに次節で説明する非線形バネを用いることにより, 関節の機械剛性を調節することが可能になる．

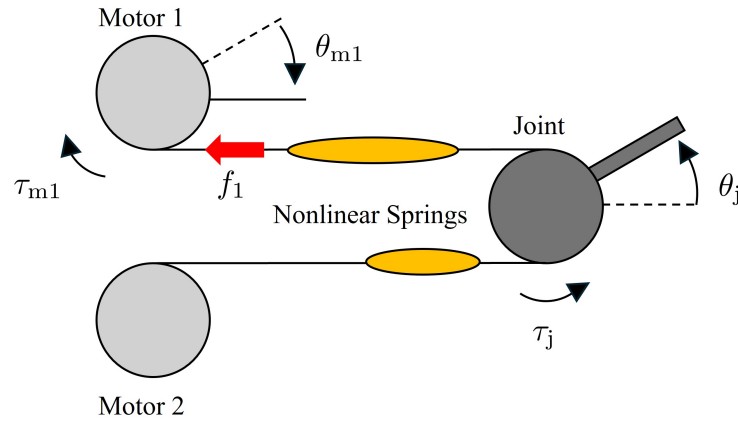


図 2.2: 非線形バネを用いた腱駆動機構

2.3 線形バネと非線形バネ

線形バネと非線形バネの特性 [6] をそれぞれ図 2.3a, 図 2.3b に示す. 図 2.3a から線形バネは伸び量 Δl 伸ばすのに必要な張力 Δf は動作点に依らず不変である ($\Delta f = \Delta f'$). よって線形バネの傾き, すなわちバネ剛性は一定である. 一方, 図 2.3b より非線形バネは動作点によって, 伸び量 Δl を伸ばすのに必要な張力 Δf が変化する ($\Delta f \neq \Delta f'$). よって, 非線形バネは動作点によって傾きが変化する. つまり非線形バネはそのバネ剛性が可変となる.

本研究で使用する非線形バネの伸び量 l_i と腱張力 f_i の近似特性式は, バネの特性に依存する定数 a_1, a_2, a_3 を用いて次式のように表される.

$$f(l) = a_1 e^{a_2 l} + a_3 \quad (2.1)$$

非線形バネのバネ剛性 z は (2.1) 式を伸び量 l で微分することで次式のように導出される.

$$z = \frac{df(l)}{dl} = a_2 f - a_2 a_3 = c f + d \quad (2.2)$$

ここで, $c = a_2, d = -a_2 a_3$ である.

すなわち, バネの張力 f を変化させることでバネ剛性 z を制御できる. この特性により, 本機構は関節剛性を機械的に調整することが可能となる.

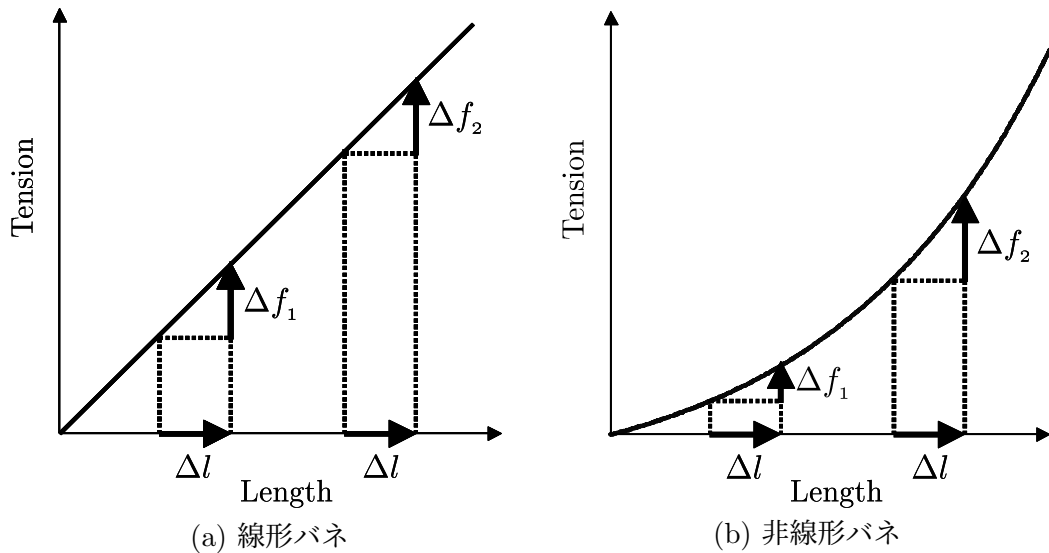


図 2.3: バネ特性

第3章 腱駆動機構の定式化

本章では, N 関節 M 本腱の腱駆動機構の定式化を行う.

3.1 運動学

非線形バネの伸び量 l は次式から計算される.

$$l = \mathbf{r}_m \boldsymbol{\theta}_m + \mathbf{J}_j \boldsymbol{\theta}_j \quad (3.1)$$

ここで, $\boldsymbol{\theta}_m$ はモータ角度ベクトル, $\boldsymbol{\theta}_j$ は関節角度ベクトル, \mathbf{r}_m はモータ半径で構成される対角行列, \mathbf{J}_j は腱空間から関節空間へのヤコビ行列 (関節のプーリ半径 r_j を要素とする $M \times N$ 行列) である. 関節トルク $\boldsymbol{\tau}_j$ はヤコビ行列 \mathbf{J}_j とバネ張力 \mathbf{f} により次式で表される.

$$\boldsymbol{\tau}_j = -\mathbf{J}_j^T \mathbf{f} \quad (3.2)$$

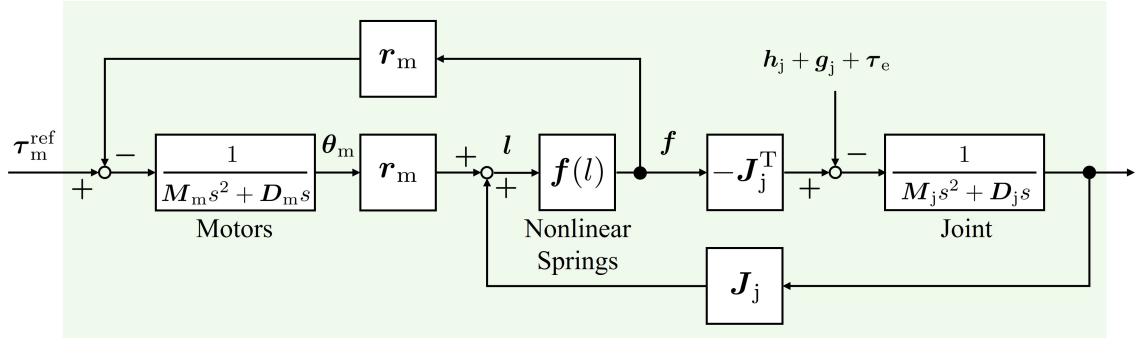
3.2 動力学

関節とモータの動力学はそれぞれ次式で表される.

$$-\mathbf{J}_j^T \mathbf{f} = \mathbf{M}_j \ddot{\boldsymbol{\theta}}_j + \mathbf{D}_j \dot{\boldsymbol{\theta}}_j + \mathbf{h}_j + \mathbf{g}_j + \boldsymbol{\tau}_e \quad (3.3)$$

$$\boldsymbol{\tau}_m = \mathbf{M}_m \ddot{\boldsymbol{\theta}}_m + \mathbf{D}_m \dot{\boldsymbol{\theta}}_m + \mathbf{r}_m \mathbf{f} \quad (3.4)$$

ここで, \mathbf{M}_j と \mathbf{M}_m はそれぞれ関節の慣性行列とモータの慣性行列である. \mathbf{D}_j と \mathbf{D}_m はそれぞれ関節の粘性行列とモータの粘性行列である. \mathbf{h}_j は遠心力やコリオリ力を表すベクトル, \mathbf{g}_j は重力ベクトル, $\boldsymbol{\tau}_e$ はアームが接触する環境から受ける接触トルクベクトル, $\boldsymbol{\tau}_m$ はモータの入力トルクベクトルを示している. 図 3.1 に非線形バネを用いた腱駆動機構のブロック線図を示す.


 図 3.1: N 関節 M 本腱の腱駆動機構のブロック線図

3.3 関節機械剛性

(2.2) 式で求まる z_i を用いて

$$\mathbf{K}_s = \text{diag}\{z_i, i = 1, \dots, M\} \quad (3.5)$$

とすると、関節機械剛性行列 \mathbf{K}_j は次式となる。

$$\mathbf{K}_j = \mathbf{J}_j^T \mathbf{K}_s \mathbf{J}_j \quad (3.6)$$

\mathbf{K}_j は $N \times N$ 行列であり、この \mathbf{K}_j の上三角部分の要素を並べたベクトル \mathbf{s}_j を構成する。

$$\mathbf{s}_j = \text{col}\{k_{uv}, u, v = 1, \dots, N, v \geq u\} \quad (3.7)$$

ここで、 k_{uv} は \mathbf{K}_j の第 u, v 要素を示す。この関節機械剛性ベクトル \mathbf{s}_j は z_i に関して線形であるので次式で書き換えられる。

$$\mathbf{s}_j = \mathbf{H} \mathbf{z} \quad (3.8)$$

ここで、 \mathbf{H} は $N(N+1)/2 \times M$ 行列、 $\mathbf{z} = (z_1, \dots, z_M)^T$ である。(2.2) 式により (3.8) 式は次式のように書き直すことができる。

$$\mathbf{s}_j = \mathbf{H}(\mathbf{c} \mathbf{f} + \mathbf{d}) \quad (3.9)$$

ここで、 $\mathbf{c} = \text{diag}\{c_1, \dots, c_M\}$ 、 $\mathbf{d} = (d_1, \dots, d_M)^T$ である。関節トルク τ_j および関節機械剛性 \mathbf{s}_j と腱張力 \mathbf{f} の関係は、(3.2) 式、(3.9) 式より次式で表すことができる。

$$\begin{bmatrix} \tau_j \\ \mathbf{s}_j - \mathbf{H} \mathbf{d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{J}_j^T \\ \mathbf{H} \mathbf{c} \end{bmatrix} \mathbf{f} = \mathbf{J}_a^T \mathbf{f} \quad (3.10)$$

ここで、 \mathbf{J}_a^T は拡張ヤコビ行列と呼ばれる。

第4章 制御器設計

本章では，本研究の制御対象である非線形バネを用いた1関節2本腿の腿駆動機構のブロック線図を図4.1に示す．その後，文献[5]で提案された制御系を非線形バネを用いた1関節2本腿の腿駆動機構に拡張し，制御系を説明する．また制御系の全体図を図4.3と図4.4に示す．

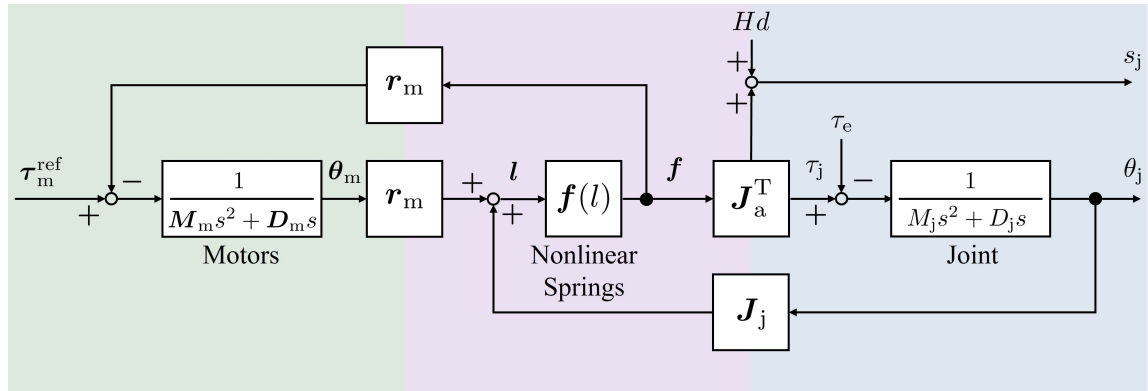


図 4.1: 制御対象

4.1 共振比制御

本研究では，共振比制御を内部ループに使用している[8]．特に低剛性での制御を考えていることから，関節側が振動しやすくなるためである．共振比制御では，モータと関節のエンコーダから読み取った値から(3.1)式を用いてバネの伸び量 l を算出する．そこから非線形バネの特性式(2.1)から腿張力 \hat{f} を求め， \hat{f} をFBすることで振動の抑制を行う．

4.2 接触トルク制御器

本研究では，図 4.2 に示す接触トルクオブザーバを用いて得られた推定接触トルク $\hat{\tau}_e$ と接触トルク指令値 τ_e^{ref} の差を比例ゲイン K_p 倍して FB する．

4.3 接触環境

接触する環境から受ける接触トルク τ_e は以下のように定義することができる．

$$\tau_e = \begin{cases} K_e(\theta_j - \theta_e) + D_e\dot{\theta}_j & (\theta_j \geq \theta_e) \\ 0 & (\theta_j < \theta_e) \end{cases} \quad (4.1)$$

ここで K_e , D_e , θ_e はそれぞれ接触する環境の剛性，粘性，角度を表している．

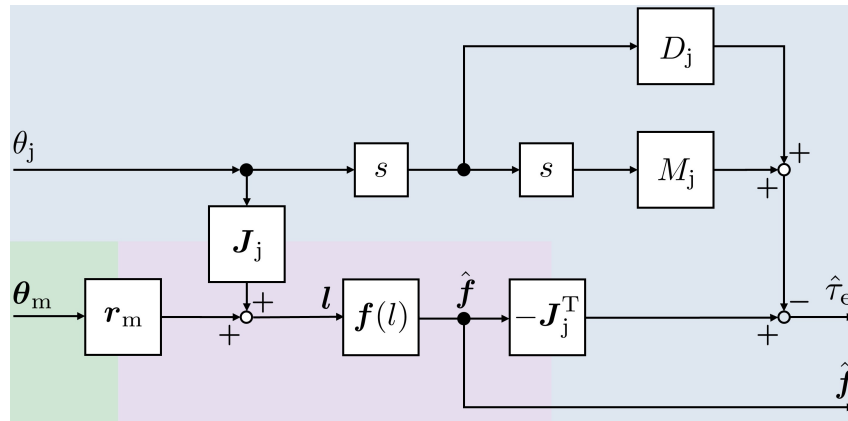


図 4.2: 接触トルクオブザーバ

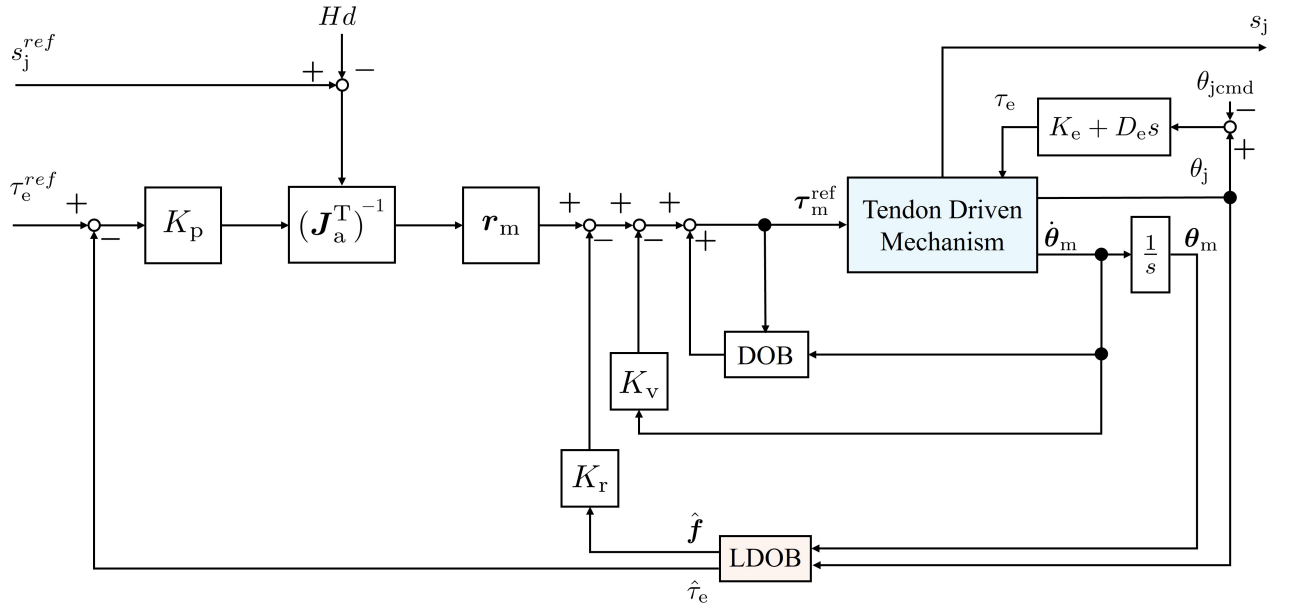


図 4.3: 接触トルク推定値をFBした接触トルク・剛性制御系

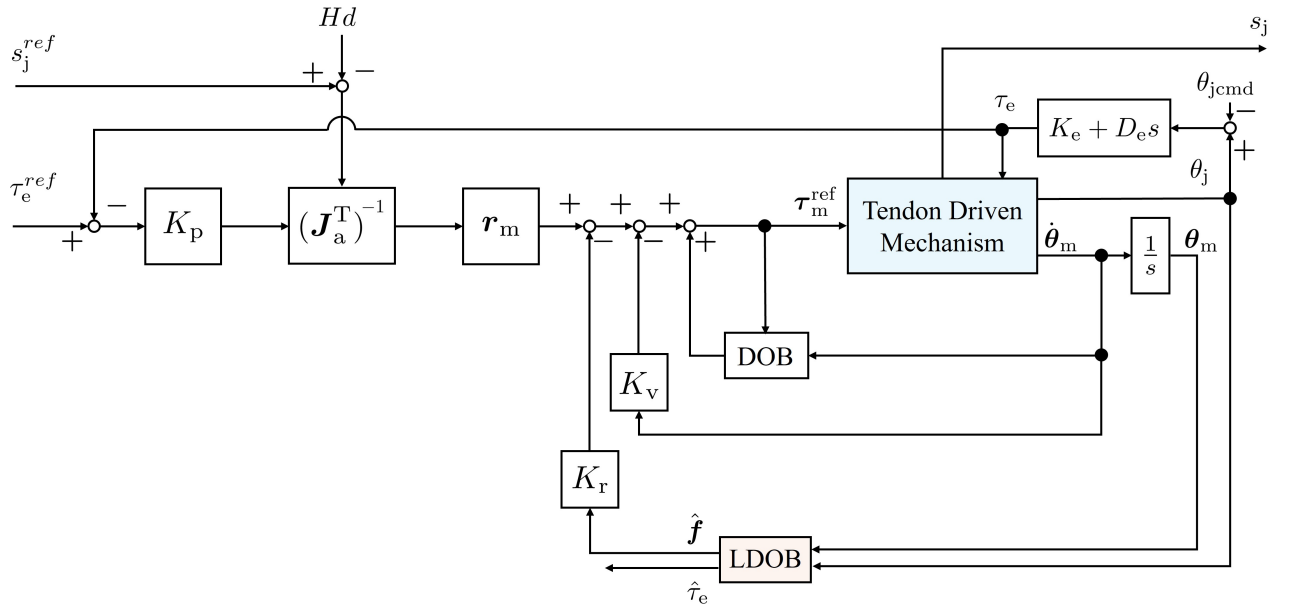


図 4.4: 接触トルクの真値をFBした接触トルク・剛性制御系

第5章 検証

本章では、目標値追従およびゼロトルク制御の検証を低剛性指令値を用いた場合と高剛性指令値を用いた場合の接触トルク応答を比較することで、低剛性指令値を与える利点について示す。

モータと関節にはエンコーダがついているためモータ角度 θ_m 、負荷角度 θ_j を検出可能である。制御系は図 4.3 と図 4.4 の 2 種類を用いて検証を行う。ここで図 4.3 は、接触トルクオブザーバによって推定された接触トルク $\hat{\tau}_e$ を FB した場合で、これを条件 1 としており、図 4.4 は、実際に発揮される接触トルクを計測できると仮定した接触トルク τ_e の真値を FB した場合で、これを条件 2 とする。制御対象のパラメータを表 5.1 に示す。用いる関節剛性指令値は、 $s_j^{\text{ref}} = 1.3[\text{Nm/rad}]$ である低剛性の場合と $s_j^{\text{ref}} = 13[\text{Nm/rad}]$ である高剛性の場合の 2 通りの検証を行った。

5.1 目標値追従

本検証は、低剛性指令値を用いた場合と高剛性指令値を用いた場合で物体と接触時の目標値追従の評価を行うことを目的とする。また、次の検証であるゼロトルク制御の際に、低剛性を用いた場合と高剛性を用いた場合の比較条件をできる限り対等にするためのコントローラゲインを決定する。

5.1.1 検証条件

接触環境は剛性 $K_e = 4.0[\text{Nm/rad}]$ 、粘性 $D_e = 0.4[\text{Nms/rad}]$ としている。制御開始 0[s] で、関節剛性指令値 s_j^{ref} を与え、6[s] で接触トルク指令値 $\tau_e^{\text{ref}} = 0.1[\text{Nm}]$ のステップ入力を与える。接触トルク応答 τ_e にて、オーバーシュートなし、目標値誤差 2[%] 以内で定義したときの整定時間が早くなるコントローラゲインを表 5.2 に示す。

表 5.1: 制御対象のパラメータ

M_m	Motor inertia	0.0015[kgm ²]
D_m	Motor viscosity	0.0045[Nms/rad]
r_m	Motor radius	0.0550[m]
M_j	Joint inertia	0.0072[kgm ²]
D_j	Joint viscosity	0.0051[Nms/rad]
r_j	Joint radius	0.0200[m]
T_s	Sampling time	1[ms]

表 5.2: コントローラゲイン

条件	K_p	K_v	K_r
高剛性条件 1	80	20	0.995
高剛性条件 2	80	20	0.995
低剛性条件 1	200	4	1.05
低剛性条件 2	200	4	1.05

5.1.2 検証結果

関節剛性応答を図 5.1 から図 5.4 に示す．図中の青線は関節剛性指令値 s_j^{ref} ，赤線は関節剛性の応答値 s_j を示している．またステップ応答を印加した場合の接触トルク応答を図 5.5 から図 5.8 に示す．図中の青線は接触トルクの真値 τ_e ，赤線は接触トルクの推定値 $\hat{\tau}_e$ を示している．ステップ応答を印加時の，それぞれの条件における整定時間を表 5.3 に示す．

関節剛性応答について，高剛性と低剛性の比較では，高剛性よりも低剛性のほうが，立ち上がりが遅くなる結果となった．推定値と真値の条件による比較では，剛性応答に関してあまり大きな差は確認できなかった．接触トルク応答について，高剛性と低剛性の比較では，表 5.3 からわかるように低剛性指令値を与えたほうが早い整定時間を示した．高剛性指令値を与えた場合はコントローラゲインを大きくしすぎると不安定化を起こすため，整定時間を早くすることがしにくい結果となった．推定値と真値の条件を問わず低剛性を用いた場合のほうが早い応答を示しており，このことから低剛性を用いることで応答の改善が見られた．推定値と真値の条件による比較では，接触トルク応答に関してもあまり大きな差は確認できなかった．

表 5.3: 接触トルク目標値追従検証における各条件の整定時間

検証条件	整定時間 [s]
高剛性条件 1	0.341
高剛性条件 2	0.349
低剛性条件 1	0.168
低剛性条件 2	0.146

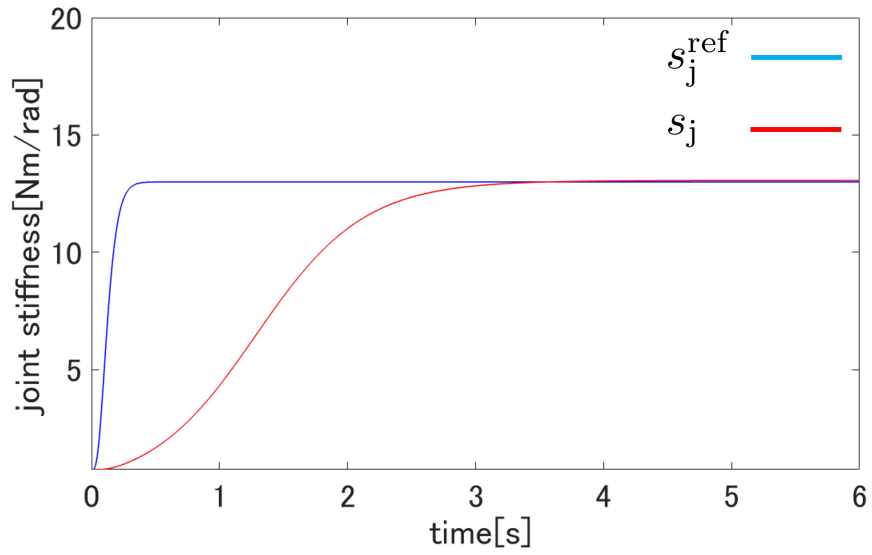


図 5.1: 目標値追従制御の高剛性条件 1 の s_j^{ref} と s_j の応答結果

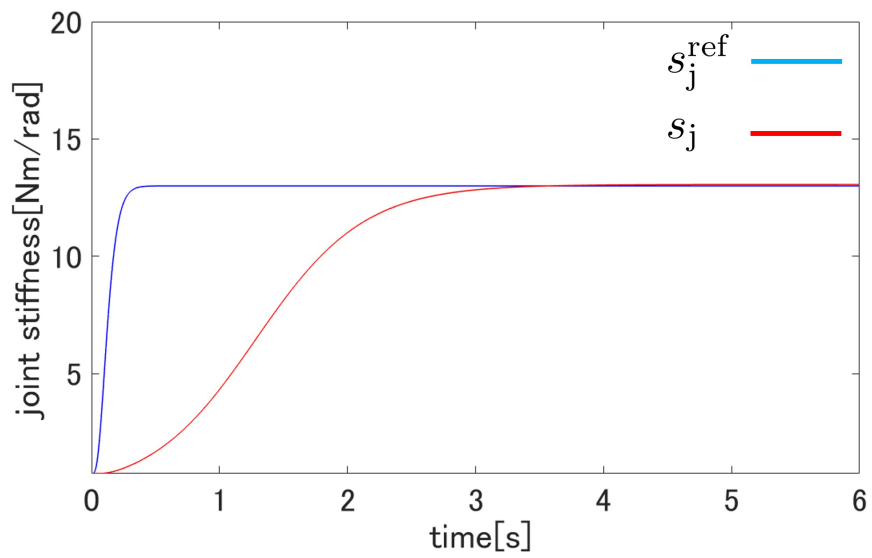


図 5.2: 目標値追従制御の高剛性条件 2 の s_j^{ref} と s_j の応答結果

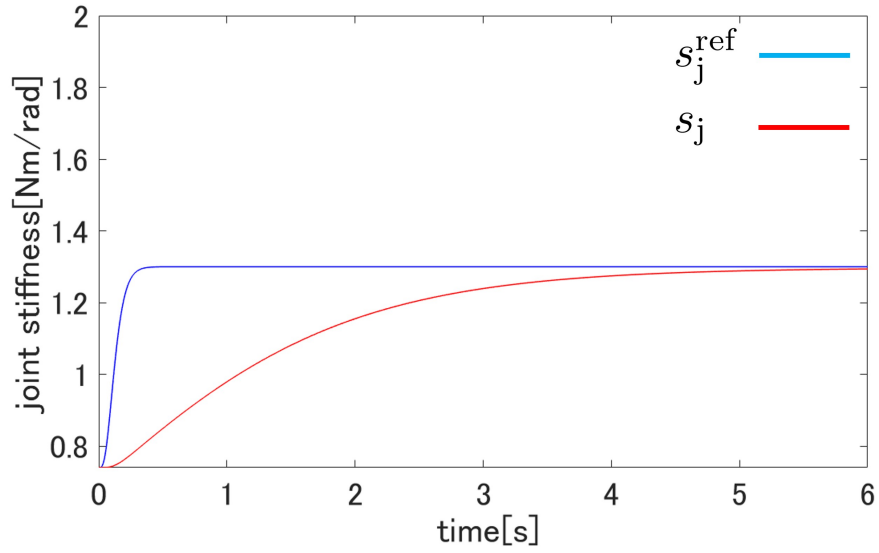


図 5.3: 目標値追従制御の低剛性条件 1 の s_j^{ref} と s_j の応答結果

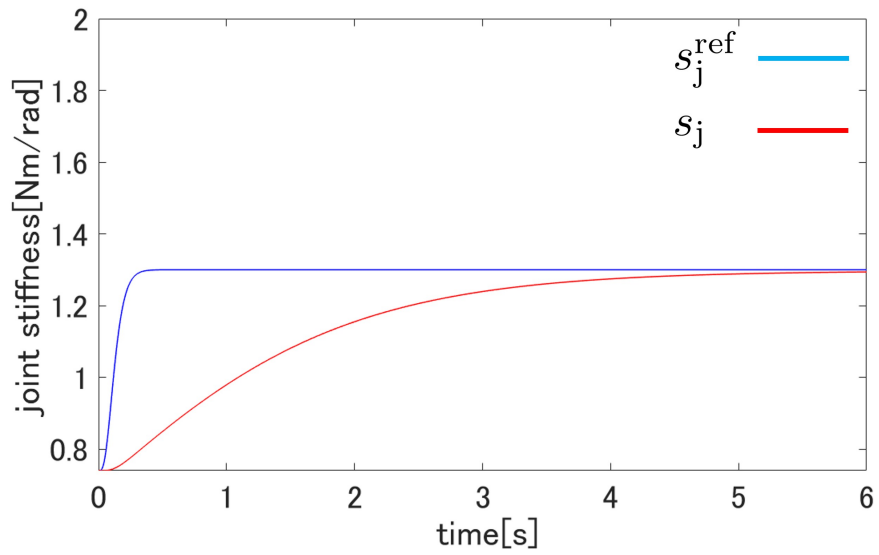


図 5.4: 目標値追従制御の低剛性条件 2 の s_j^{ref} と s_j の応答結果

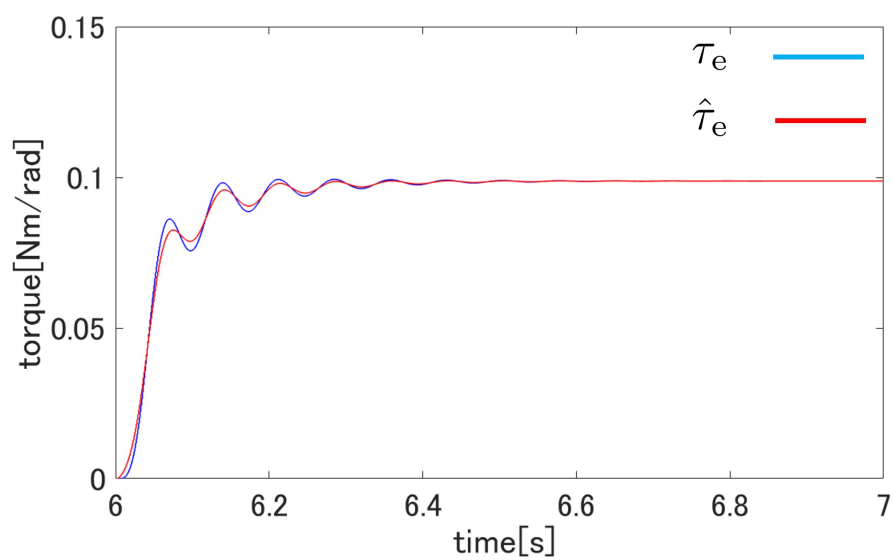


図 5.5: 目標値追従制御の高剛性条件 1 の τ_e と $\hat{\tau}_e$ の応答結果

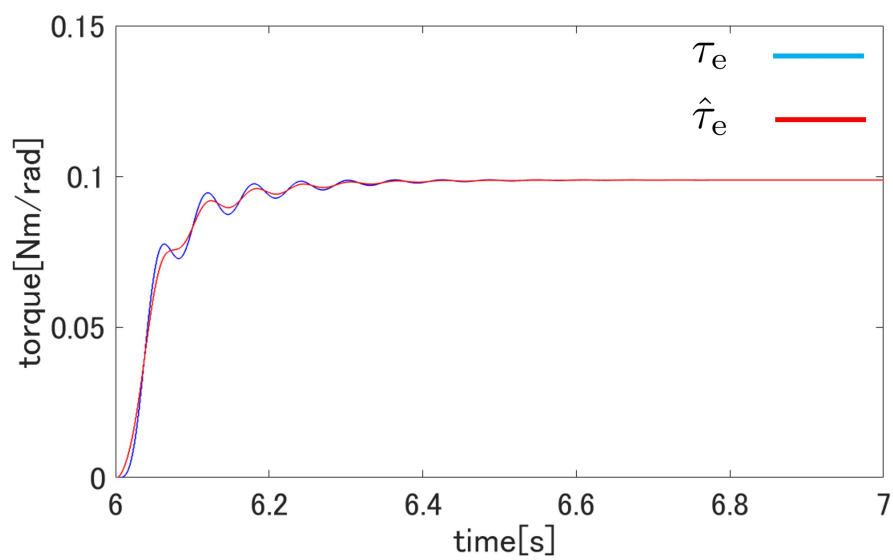


図 5.6: 目標値追従制御の高剛性条件 2 の τ_e と $\hat{\tau}_e$ の応答結果

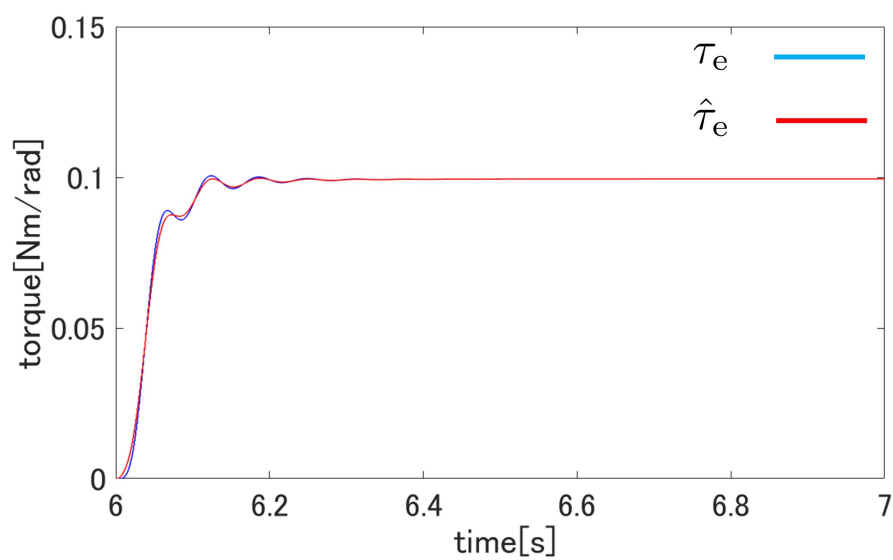


図 5.7: 目標値追従制御の低剛性条件 1 の τ_e と $\hat{\tau}_e$ の応答結果

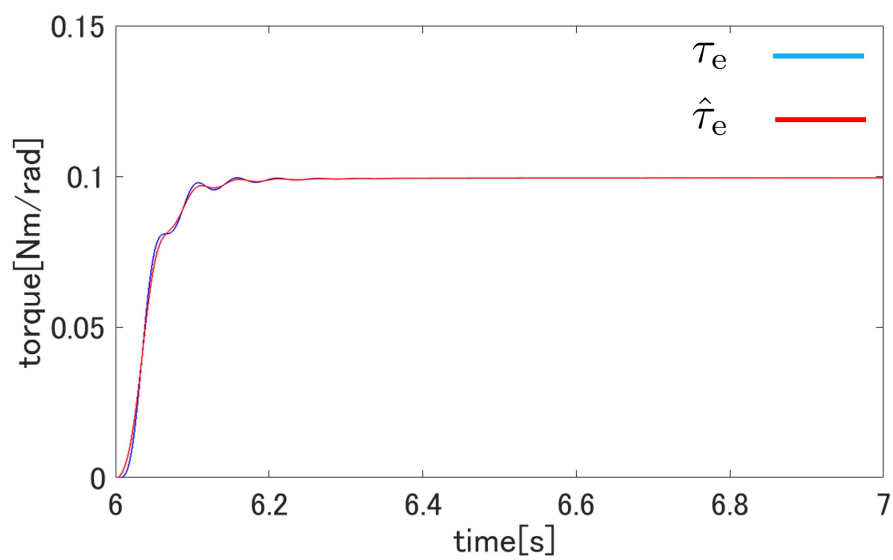


図 5.8: 目標値追従制御の低剛性条件 2 の τ_e と $\hat{\tau}_e$ の応答結果

5.2 ゼロトルク制御

関節側に角度外乱が印加されたときの高剛性と低剛性の接触トルク応答 τ_e を比較することで低剛性を用いる利点の検証を目的とする。

5.2.1 検証条件

制御対象パラメータは前節と同様で表 5.1 に示し、コントローラゲインは前節の結果から表 5.2 に示したものをを用いる。

ゼロトルク制御として、接触トルク指令値を $\tau_e^{\text{ref}} = 0$ とし、関節側に位置外乱を与えた時の接触動作を行った。関節側のトルク外乱としては、人間が関節側をある角度まで動かした場合を想定している。本検証は関節側にモータがあると仮定し、接触環境を模擬する。関節側に与えられる外乱の角度として $\theta_{\text{lcmd}} = 0.2\sin(\pi t)[\text{rad}]$ を与え $K_e = 0.5[\text{Nm/rad}]$, $D_e = 0.5[\text{Nms/rad}]$ を用いた。この時の接触トルク τ_e を以下に定義する。

$$\tau_e = (-\theta_{\text{lcmd}} + \theta_i)K_e + (-\theta_{\text{jcmd}} + \theta_j)D_e s \quad (5.1)$$

5.2.2 検証結果

シミュレーション結果を図 5.9 から図 5.14 に示す。図 5.9 から図 5.12 は各条件の下に行った接触トルク値の応答結果で、図中の青線は接触トルクの真値、赤線は接触トルクの推定値を示している。また図 5.13 と図 5.14 は条件 1 における各剛性指令値を用いた場合の関節角度の応答結果で、青線が関節角度の値、赤線が外乱の関節角度を示している。ゼロトルク制御の検証では、同じ剛性では接触トルクの推定値 $\hat{\tau}_e$ を FB する場合と真値 τ_e を FB する場合にかかわらず、接触トルク応答値に大きな変化は見られなかった。次に剛性を変化させた場合、図 5.9 と図 5.11 を比較して明らかのように低剛性を用いることで接触トルクを小さくすることができており、より良いゼロトルク制御の実現ができています。これは図 5.13 と図 5.14 の比較から、低剛性を用いた場合は関節角度にある程度追従できているのに対して、高剛性は追従できていないことから明らかである。以上の結果から、低剛性を用いることでより正確なゼロトルク制御の実現が可能となる。

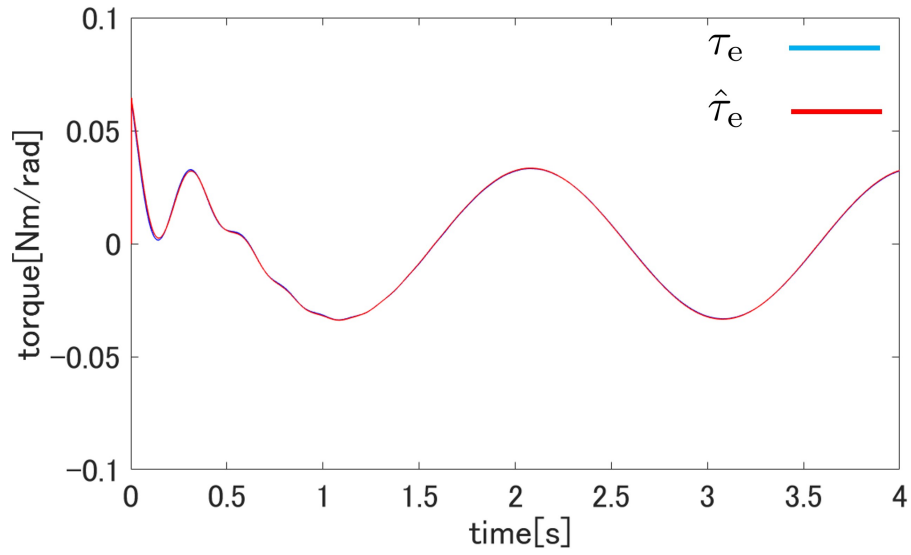


図 5.9: ゼロトルク制御の高剛性条件 1 の τ_j と $\hat{\tau}_j$ の応答結果

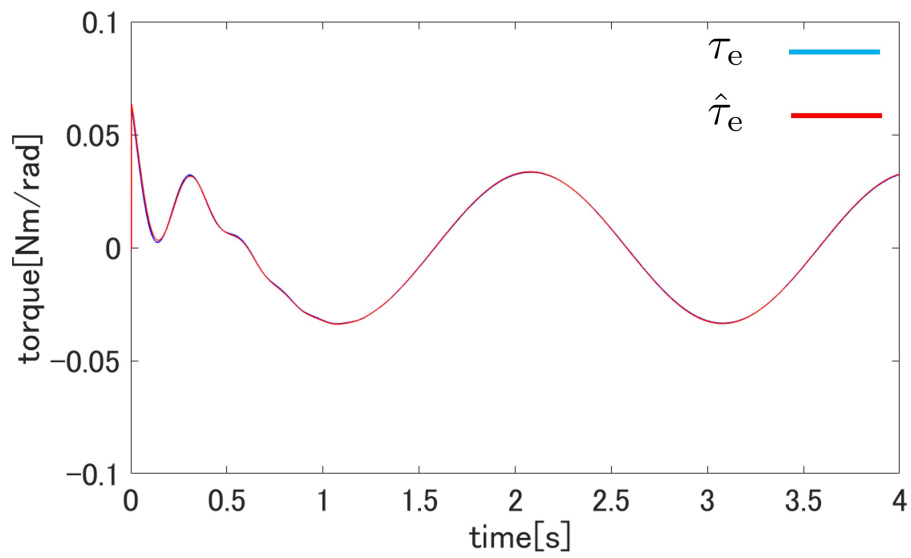


図 5.10: ゼロトルク制御の高剛性条件 2 の τ_e と $\hat{\tau}_e$ の応答結果

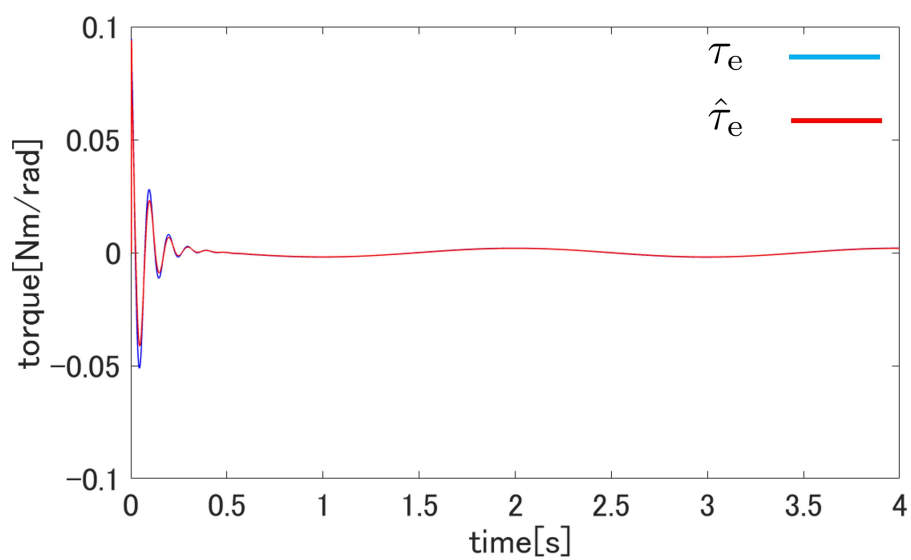


図 5.11: ゼロトルク制御の低剛性条件 1 の τ_e と $\hat{\tau}_e$ の応答結果

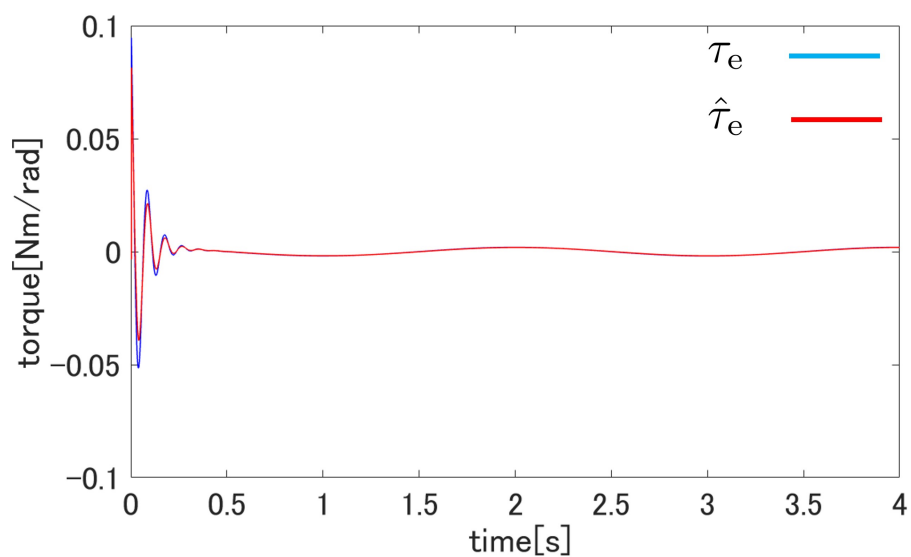


図 5.12: ゼロトルク制御の高剛性条件 2 の τ_e と $\hat{\tau}_e$ の応答結果

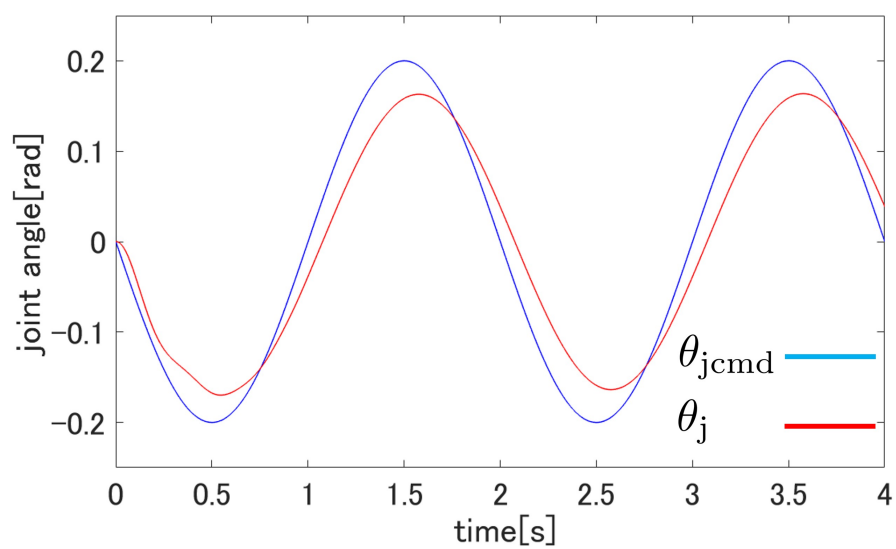


図 5.13: ゼロトルク制御の高剛性条件 1 の θ_j と θ_{jcmd} の応答結果

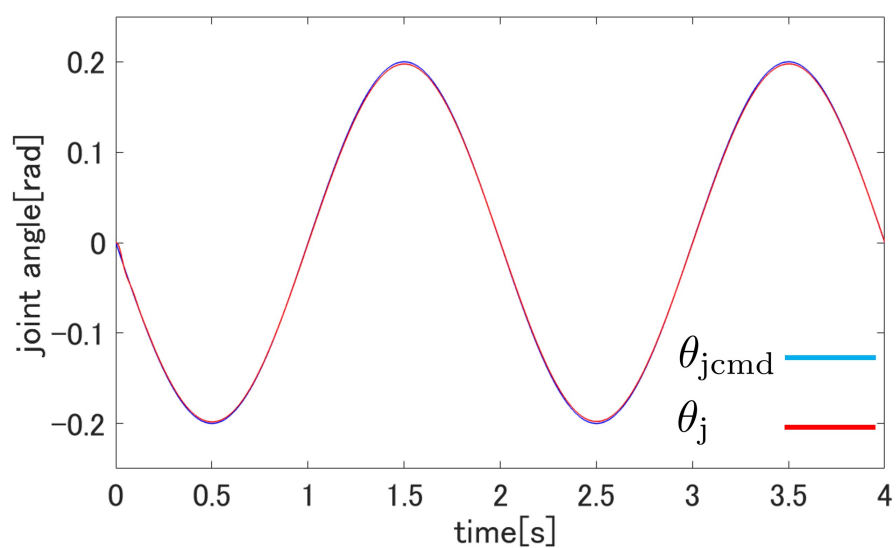


図 5.14: ゼロトルク制御の低剛性条件 1 の θ_j と θ_{jcmd} の応答結果

第6章 結言

本論文では、文献 [5] の制御系を非線形バネを用いた腱駆動機構に拡張した。また、関節トルク・剛性制御に着目し、非線形バネを用いた腱駆動機構において低剛性を用いる利点について検証を行った。

共振比制御を導入した PD 制御器により、接触トルク制御を行い、その際接触トルクは反力オブザーバを用いて推定した。また非線形バネを用いた剛性制御を適用し、関節剛性を可変とした。

上記の制御系を用いた目標値追従応答では関節剛性指令値に低剛性を与えることでより早い整定時間を実現することが可能であることを確認した。また、ゼロトルク制御の検証では、接触が起きたとき高剛性よりも低剛性のほうがより正確な接触トルクを実現した。

今後の課題として、制御対象に非線形バネを用いているため、解析を行い、その非線形性にあった適切なコントローラゲイン決定ができるよう可変ゲインの導入を考える必要がある。

参考文献

- [1] Michael Zinn, Oussama Khatib, Bernard Roth, and J. Kenneth Salisbury: “Playing It Safe - A New Actuation Concept for Human-Friendly Robot Design”, *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Volume 11, Issue 2, pp. 12–21 (2004)
- [2] 人間共存型ロボット研究専門委員会: 「人間共存型ロボットシステムにおける技術課題」, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.2, pp.288～294, 1998
- [3] David W. Robinson, Jerry E. Pratt, Daniel J. Paluska, and Gill A. Pratt: “Series Elastic Actuator Development for a Biomimetic Walking Robot”, *Advanced Intelligent Mechatronics, 1999.Proceedings. 1999 IEEE/ASME International Conference on. IEEE*, pp. 561–568, 1999.
- [4] 景山達也: 「非線形バネを用いた腱駆動アームの可変機械剛性に着目した位置・剛性制御に関する研究」, 三重大学 修士論文 平成 28 年度
- [5] 祖父江瑛将: 「静止摩擦を考慮した低負荷トルク制御における低剛性体を用いた時の利点に関する研究」, 三重大学 修士論文 令和元年度
- [6] K. Haiya, S. Komada, J. Hirai, ”Tension control for tendon mechanisms by compensation of nonlinear spring characteristic equation error”, Proc. of 11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, pp.42-47, March, 2010.
- [7] Takashi Yoshioka, Akinori Yabuki, Yuki Yokokura, Kiyoshi Ohishi, Toshimasa Miyazaki, Thao Tran Phuong, ”Stable force control of industrial robot based on spring ratio and instantaneous state observer.” IEEJ Journal of Industry Applications 5.2 (2016): 132-140.
- [8] 結城和明, 村上俊之, and 大西公平. ”共振比制御による 2 慣性共振系の振動抑制制御.” 電気学会論文誌. D, 産業応用部門誌 113.10 (1993): 1162-1169.

謝辞

本研究の遂行及び本論文の作成にあたり、丁寧かつ適切な御指導と御助言を頂きました三重大大学教授 駒田 諭 先生に深く感謝致します。また、本研究の遂行において、根本的な問題や検討が不十分である点など広い視野で助言してくださいました同大学教授 弓場井 一裕 先生、同大学助教 矢代 大祐 先生に深く感謝致します。そして、本研究の貴重な御意見を頂きました同大学准教授 山村 直紀 先生、同大学助教 小山 昌人 先生に深く感謝致します。

日頃から研究に関する日常業務において御助力頂きました、同大学技術職員 中村 勝 氏に深く感謝致します。

本研究の遂行にあたり、本研究グループの先輩として親身な御指導を頂きました同大学院 有賀 光紀 氏、同大学院 富山 礁太 氏、同大学院 山口 英也 氏に深く感謝致します。

また、研究室の同期として、同じ時を過ごした高井 寛人 君、渡邊 晃康 君に深く感謝致します。今後の御活躍を心より期待しております。

そして、同じ研究グループとして共に研究を進め、貴重な経験を頂いた、岡田 達弥 君、澤木 篤哉 君、浅野 竜輝 君、亀谷 幸汰 君、佐藤 大翔 君、水谷 駿斗 君に深く感謝致します。

さらに、日頃から多くのご協力を頂いた電機システム研究室の皆さんに深く感謝致します。

最後に、25年の長きに渡り常に温かく見守り、あらゆる面で惜しみなく援助して下さいました家族に心から感謝致します。ありがとうございました。