

—修士学位論文—

非線形バネを用いた
腱駆動機構の剛性楕円制御

Stiffness Ellipse Control of Tendon Mechanisms
with Nonlinear Springs

平成 22 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
奥村 文博

目 次

| | | |
|-------|-------------------|----|
| 第 1 章 | 緒言 | 1 |
| 1.1 | 研究背景と目的 | 1 |
| 1.2 | 論文の構成 | 2 |
| 第 2 章 | 非線形バネを用いた腱駆動機構 | 3 |
| 2.1 | 腱駆動機構 | 3 |
| 2.2 | 線形バネと非線形バネ | 4 |
| 第 3 章 | 腱駆動機構の定式化 | 5 |
| 3.1 | 運動方程式 | 5 |
| 3.2 | 運動学 | 6 |
| 3.3 | 関節剛性 | 7 |
| 3.4 | 制御可能性 | 8 |
| 第 4 章 | 腱駆動機構の制御系 | 9 |
| 第 5 章 | 剛性楕円制御アルゴリズム | 11 |
| 5.1 | 剛性の変換 | 12 |
| 5.2 | 剛性楕円 | 13 |
| 5.3 | 楕円制御アルゴリズム | 15 |
| 5.4 | 機械剛性による楕円制御アルゴリズム | 16 |
| 5.5 | 制御剛性による楕円制御アルゴリズム | 17 |
| 5.6 | ハイブリッド剛性制御 | 19 |
| 第 6 章 | シミュレーション | 20 |
| 6.1 | シミュレーション対象 | 20 |
| 6.2 | 機械剛性シミュレーション条件 | 22 |
| 6.3 | 機械剛性シミュレーション結果 | 23 |
| 6.4 | 制御剛性シミュレーション条件 | 27 |

| | | |
|------------|-----------------------------------|----|
| 6.5 | 制御剛性シミュレーション結果 | 29 |
| 6.6 | ハイブリッド剛性制御シミュレーション | 31 |
| 6.7 | タスクへの応用例 | 37 |
| 第 7 章 結言 | | 38 |
| 参考文献 | | 39 |
| 謝辞 | | 41 |
| 付 録 A 強化学習 | | 42 |
| A.1 | Actor-Critic 法 | 42 |
| A.2 | 連続空間の構成 | 43 |
| A.3 | 連続空間における Actor-Critic 法 | 44 |
| 論文目録 | | 46 |

第1章 緒言

1.1 研究背景と目的

近年，高齢社会における人手不足の問題から，病院やオフィスなどで人間と共生するロボットの実現が期待されている．人間環境においては，予期しない衝突などによる危険の防止や人間やモノとの接触を伴うタスクを行うことが予想されるため，安全性 [1][2] が要求される．また，人間が従来行ってきたような様々なタスクへの対応が要求されるため，汎用性が要求される．一般的なロボットのように関節部にモータを用いた機構では，ギア比が高いために関節が硬く，十分な柔軟性を得ることは困難である．制御的に柔軟な関節機構を達成する方法 [3][4] は存在するが，制御周期を超えるような外力への対応が不可能であるため，十分とは言い難い．また，接触時の衝撃に対して不安定化しやすいという問題も存在する．その解決策として，機械的に柔軟な関節機構を持たせる研究が行われており，機械インピーダンスを調節可能な関節メカニズム MIA (Mechanical Impedance Adjuster)[5]，柔軟性を持ったアクチュエータを用いる方法 [6]，非線形バネを用いた腱駆動機構 [7][8] などがある．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特性により優れた柔軟性を実現していることに着目し，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対象とする．非線形バネは動作点によって弾性係数が変化することから可変弾性要素と呼ばれる．この性質から，非線形バネを用いた腱駆動機構は機械的にバネ剛性を調節可能なシステムである．すなわち，バネ剛性を調節することで，関節の硬さである関節剛性を機械的に制御することが可能である．

人間は作業をする際に，その作業を行うのに適切な剛性に制御していることが知られている [7][9]．このことから，ロボットも人間と同じように剛性を適切に制御することで，多様なタスクへの対応が可能となると考えられる．しかし，この特性を生かすためには以下の2つの問題が存在する．1つ目の問題は，タスクはアーム先端で行うことが多いことに對し，非線形バネを用いた腱駆動機構で制御できるのは関節剛性であり，剛性の座標が一致していないことである．2関節にまたがる腱（以下，二関節腱とする）を有する腱駆動は任意の先端剛性を実現できるが，その制御法が確立できてい

ないことが問題である．2 つ目の問題は，タスクに対する剛性の指標が確立されていないことである．

本論文では，特に 1 つ目の問題に焦点をあてる．先端剛性は，剛性楕円として表現できることが知られている [9]．そこで，先端剛性の指標である剛性楕円の制御法を示し，機械剛性と制御剛性の両方に適用する．また，両手法を統合したものをハイブリッド剛性制御として提案する．本提案手法の有効性を計算機シミュレーションによって示す．

1.2 論文の構成

本論文は全 7 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

本研究の対象である非線形バネを用いた腱駆動機構の概要について説明する．

第 3 章 腱駆動機構の定式化

腱駆動機構における運動学，動力学の定式化を行う [10]．

第 4 章 腱駆動機構の制御系

非線形バネを用いた腱駆動機構の制御系を広義に説明する．

第 5 章 剛性楕円制御アルゴリズム

剛性楕円についての説明を行い，剛性楕円制御アルゴリズムの提案を行う．

第 6 章 シミュレーション

提案する剛性楕円制御アルゴリズムの有効性をシミュレーションによって示す．

第 7 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．

2.1 腱駆動機構

1-Link 腱駆動機構の模式図を図 2.1 に示す． θ , τ_m , r はそれぞれモータの角度，トルク，半径， q , τ_j はそれぞれ関節の角度とトルク， f は非線形バネの張力（縮み方向を正とする）を表す．モータと関節にはエンコーダが取り付けられ，それぞれの角度 θ と q が検出可能である．モータと関節は非線形バネを介したワイヤーで接続される．一般的に，ワイヤー駆動ロボットは，可動部にアクチュエータが無いため，アームが軽量である．更に駆動伝達経路中に非線形バネを挿入することで，衝撃力が吸収でき，機械的に関節剛性を調節可能となる．以上の特徴から，非線形バネを用いた腱駆動機構は高い柔軟性を示す．

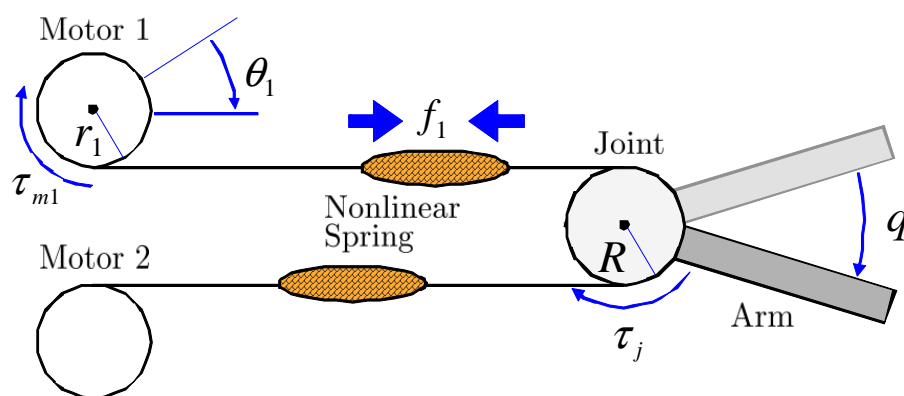


図 2.1: 1-Link 腱駆動機構

2.2 線形バネと非線形バネ

線形バネと非線形バネの特性をそれぞれ図 2.2, 図 2.3 に示す。図 2.2 より, 線形バネはバネの伸び量, すなわち動作点に依存せず, 変化量 Δl 伸ばすのに必要な力 Δf は変化しない ($\Delta f_1 = \Delta f_2$)。一方, 図 2.3 より, 非線形バネは動作点によって, 変化量 Δl 伸ばすのに必要な力 Δf が変化する ($\Delta f_1 \neq \Delta f_2$)。つまり, 非線形バネは動作点によってバネの硬さ, すなわちバネ剛性を機械的に変化させることが可能な可変剛性特性を有する。

本研究で使用する非線形バネの特性は (2.1) 式で表わされる。

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

(2.1) 式において, l はバネの伸び量, a_1, a_2, a_3 はバネの特性に依存する定数である。すなわち, バネの伸び量を変化させることでバネ剛性を制御するシステムとなる。この特性を利用することで, 非線形バネを用いた腱駆動機構は, 関節剛性を機械的に調節することが可能となる。

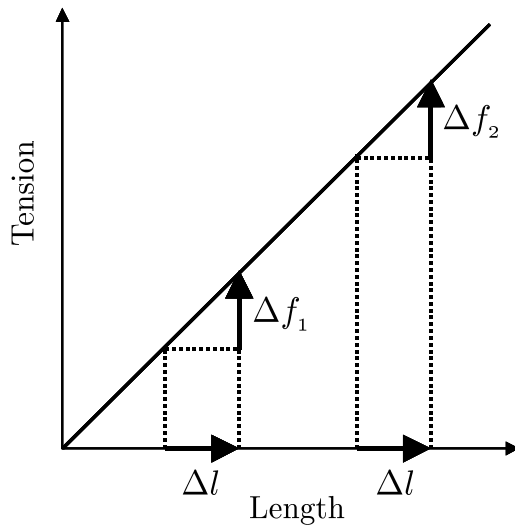


図 2.2: 線形バネの特性

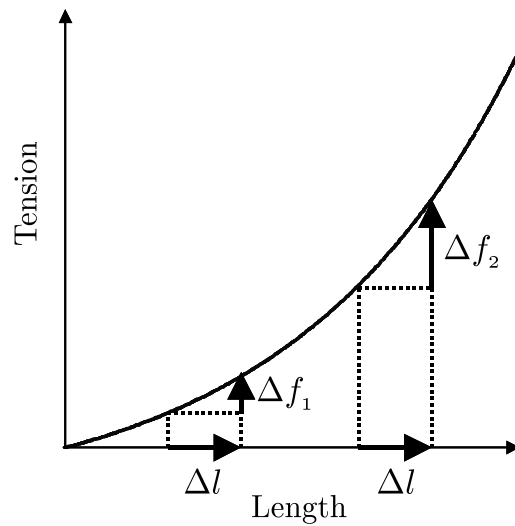


図 2.3: 非線形バネの特性

第3章 腱駆動機構の定式化

本章では、 N 関節 M 本腱機構の腱駆動機構における動力学、運動学の定式化を行う [10] .

3.1 運動方程式

関節とモータの運動方程式は、それぞれ (3.1) 式、(3.2) 式で表される .

$$\begin{aligned} -J_j^T f &= M_j(q)\ddot{q} + D_j\dot{q} + \tau_j^{\text{fric}} \\ &\quad + h_j(q, \dot{q}) + g_j(q) + \tau_j^{\text{ext}} \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\tau_m = M_m\ddot{\theta} + D_m\dot{\theta} + \tau_m^{\text{fric}} + r f \quad (3.2)$$

ここで、 M_j はアームの慣性行列、 M_m はモータの慣性行列 (対角行列)、 D_j と D_m はそれぞれ、関節とモータの粘性係数行列 (対角行列)、 τ_j^{fric} 、 τ_m^{fric} はそれぞれ関節、モータの摩擦トルクベクトル、 h_j は遠心力やコリオリ力を表すベクトル、 g_j は重力ベクトル、 τ_j^{ext} はアームが接触する環境から受ける外力トルクベクトル、 τ_m はモータの入力トルクベクトル、 θ と q はそれぞれモータと関節の角度ベクトルを表わす . r はモータ半径を要素とする対角行列、また J_j は関節ヤコビ行列 (関節空間から腱空間へのヤコビ行列、すなわち関節のプーリ半径を要素とする $M \times N$ の行列) である .

3.2 運動学

非線形バネの伸び量 l は (3.3) 式から計算される .

$$l = r\theta + J_j q \quad (3.3)$$

また , 仮想仕事の原理より関節トルク τ_j と腱張力 f の関係は (3.4) 式で表わすことができる .

$$\tau_j = -J_j^T f \quad (3.4)$$

(3.4) 式より , 腱張力 f には (3.5) 式の関係がある .

$$\begin{aligned} f &= A_1 \tau_j + A_2 \xi = A_1 \tau_j + f_b \\ A_1 &= J_j (J_j^T J_j)^{-1} \\ A_2 &= I_M + A_1 + J_j^T \end{aligned} \quad (3.5)$$

ここで , (3.5) における ξ は M 次元の任意のベクトルで , f_b はバイアス張力を表わす . また , I_M は M 次の単位行列である . 第 1 項は関節駆動のための成分であり , 第 2 項のバイアス張力は , 関節駆動に関わらない剛性に関係する腱張力である . 非線形バネで発生させる張力は , 負の値をとることができないため , バイアス張力は非線形バネがたるまないような値をとる必要がある .

3.3 関節剛性

(2.1) 式をバネの伸び量 l で微分することで, バネ剛性 z を (3.6) 式のように導出することができる .

$$z = \frac{\partial f}{\partial l} = a_2 f - a_2 a_3 = c f + d \quad (3.6)$$

ここで, $c = a_2$, $d = -a_2 a_3$ である .

i 番目の腱のバネ剛性を z_i とすると, バネ剛性行列は (3.7) 式のように表わされる .

$$\mathbf{K} = \text{diag.}\{z_i, i = 1, \dots, M\} \quad (3.7)$$

(3.7) 式を用いて, 関節剛性行列 S_j は, (3.8) 式で表わすことができる .

$$S_j = \mathbf{J}_j^T \mathbf{K} \mathbf{J}_j \quad (3.8)$$

S_j は $N \times N$ 正定値対称行列であり, この S_j の上三角部分の要素を並べたベクトル s_j を (3.9) 式のように構成する .

$$s_j = \text{col.}\{S_{juv}, u, v = 1, \dots, N, v \geq u\} \quad (3.9)$$

ここで, S_{juv} は S_j の第 u, v 要素を示す . この関節剛性ベクトル s_j が z_i に関して線形であるので (3.10) 式で表現できる .

$$s_j = \mathbf{H} \mathbf{z} \quad (3.10)$$

ここで, \mathbf{H} は $N(N+1)/2 \times M$ の行列であり, $\mathbf{z} = (z_1, \dots, z_M)^T$ である . (3.6) 式より, (3.10) 式は (3.11) 式のように書き直すことができる .

$$s_j = \mathbf{H}(c f + d) \quad (3.11)$$

ここで, $c = \text{diag.}\{c_1, \dots, c_M\}$, $d = (d_1, \dots, d_M)^T$ である .

3.4 制御可能性

駆動冗長度 α は (3.12) 式で定義される .

$$\alpha = M - N \quad (3.12)$$

関節トルク τ_j 及び関節剛性 s_j と腱張力 f の関係は , (3.4) 式 , (3.11) 式より (3.13) 式のように表すことができる .

$$\begin{bmatrix} \tau_j \\ s_j - Hd \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -J_j^T \\ Hc \end{bmatrix} f = J_a^T f \quad (3.13)$$

ここで , J_a^T は拡張ヤコビ行列と呼ばれ , $N(N+3)/2 \times M$ の行列である . (3.13) 式より , 腱駆動機構の関節トルク τ_j の全要素が独立に制御可能であるための条件は (3.14) 式で表される .

$$\text{rank } J_j^T = N \quad (3.14)$$

また , 関節剛性 s_j の全要素が独立に制御可能であるための条件は次式で表される .

$$\text{rank } H = \frac{N(N+1)}{2} \quad (3.15)$$

関節トルク τ_j と関節剛性 s_j の全要素が独立に制御可能であるための条件は次式で表される .

$$\text{rank } J_a^T = \frac{N(N+3)}{2} \quad (3.16)$$

ここで , (3.14) 式と (3.15) 式を同時に満足していても , (3.16) 式を満たすとは限らないことに注意しなければならない . (3.16) 式を満足するような腱駆動機構を完全腱駆動機構といい , 本論文ではこの機構を対象とする .

第4章 腱駆動機構の制御系

非線形バネを用いた腱駆動機構の制御系のブロック線図を図4.1に示す[8][11]．関節角度制御器によって生成される関節トルク指令値 τ_{jref} と関節剛性指令値 s_{jref} を張力変換器によって張力指令値 f_{ref} へ変換する．張力変換器は，(3.13) 式の議事逆行列を利用したものである．この制御系の応答は，内部の張力制御系に依存するため，張力制御系は高い目標値追従性能が要求される．張力制御系は，[11] と同様に設計しているため，本論文では説明を省略する．

図4.1からも分かるように，剛性制御の座標は関節であり，タスクを行う先端と座標が一致していないという問題がある．そこで，図4.1に示される制御系を拡張し，先端座標での剛性である剛性楕円制御法を提案する．提案する制御法のブロック図を図4.2に示す．ここで， A_M, B_M, ϕ_M は機械剛性による剛性楕円のパラメータ， A_c, B_c, ϕ_c は制御剛性による剛性楕円のパラメータである．剛性楕円は先端剛性に基づくものであるので，剛性制御の座標を一致させることができる．次章から剛性楕円の説明及び，提案アルゴリズムの詳細を説明する．

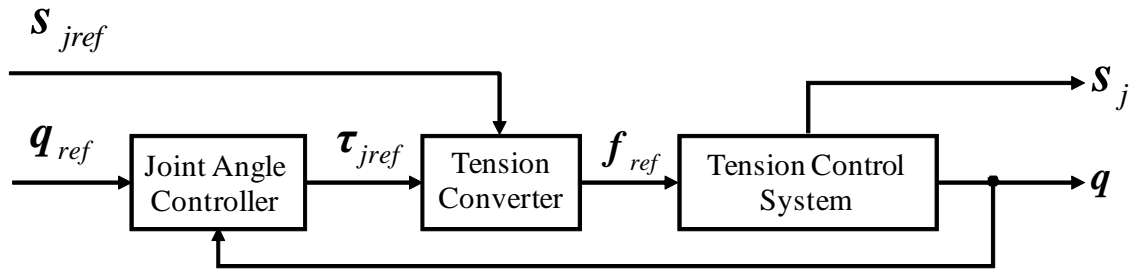


図 4.1: 腱駆動機構の制御系

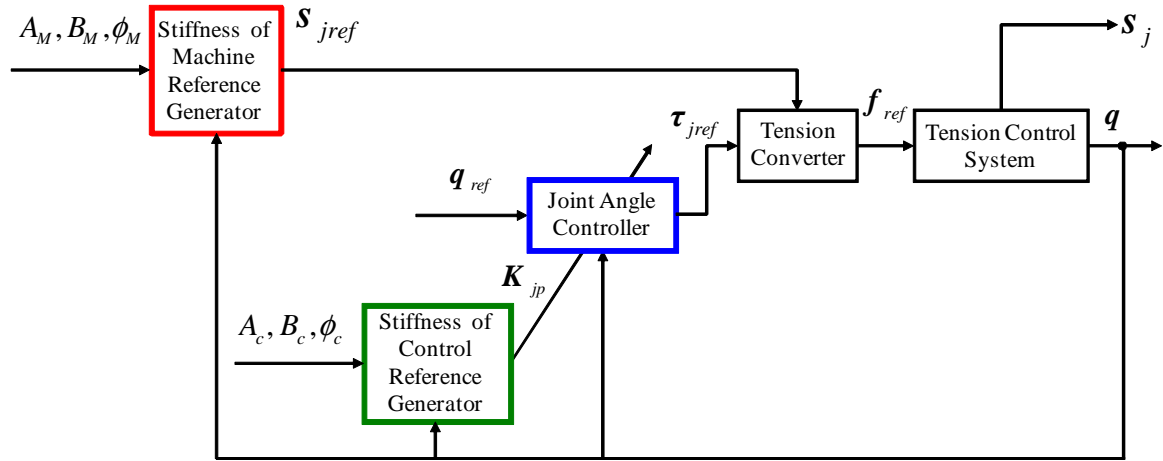


図 4.2: ハイブリッド剛性制御系

第5章 剛性楕円制御アルゴリズム

本章では剛性楕円の導出に関する説明を行い，提案する剛性楕円制御アルゴリズムを示す．本論文では，図 5.1 に示すような二関節腱を有する 3 対 6 筋腱駆動機構を対象に取り扱うが，二関節腱を有する関節剛性可変機構であれば，腱駆動機構に限らず適応可能な手法である．図 5.1 において， K は各腱のパネ剛性， R は関節のプーリ半径， l はリンク長， q は関節角度を表わす．また， K_1, K_2 は第一関節駆動にかかる成分， K_3, K_4 は第二関節駆動にかかる成分， K_5, K_6 は両関節駆動にかかる成分である．

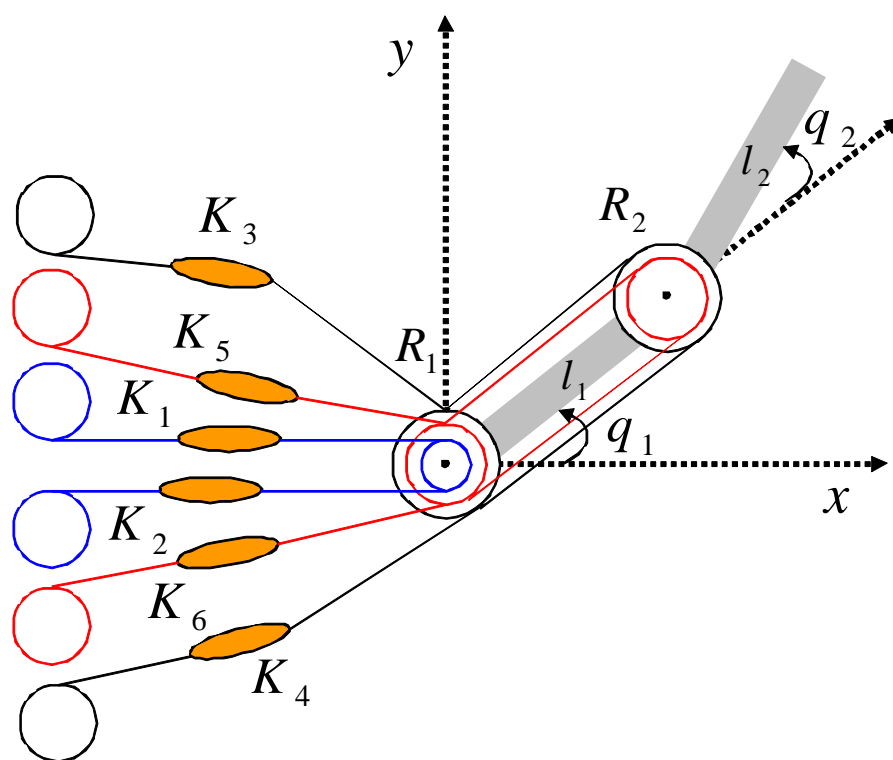


図 5.1: シミュレーション対象

5.1 剛性の変換

前章で示したように，腱駆動機構において従来制御されてきた剛性は関節剛性であり，先端剛性ではない．そこで，本節では剛性の変換を示す．

本研究で用いる 3 つの剛性（バネ剛性，関節剛性，先端剛性）間の変換の模式図を図 5.2 に示す．図 5.2 において， J_j は関節ヤコビ行列， J は関節空間から作業空間へのヤコビ行列である．腱空間から関節空間への変換，すなわちバネ剛性行列 K から関節剛性行列 S_j への変換は，(3.8) 式によって行われる．関節空間から作業空間への変換，すなわち関節剛性行列 S_j から先端剛性行列 S_p への変換は，(5.1) 式によって行われる．

$$S_p = (J(q)^T)^{-1} S_j (J(q))^{-1} \quad (5.1)$$

本論文の対象は二関節腱を有する 3 対 6 筋腱駆動機構であるので，関節剛性行列 S_j と先端剛性行列 S_p の構造はそれぞれ (5.2) 式，(5.3) 式で対角行列として表現される．

$$S_j = \begin{bmatrix} S_{j11} & S_{j12} \\ S_{j12} & S_{j22} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$$S_p = \begin{bmatrix} S_{p11} & S_{p12} \\ S_{p12} & S_{p22} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

(5.2) 式における非対角要素は，制御に二関節腱が必要なパラメータである．(5.3) 式より，先端剛性は二次元平面上で定義されるので，剛性楕円として表現することができる [12]．次節で剛性楕円について説明する．

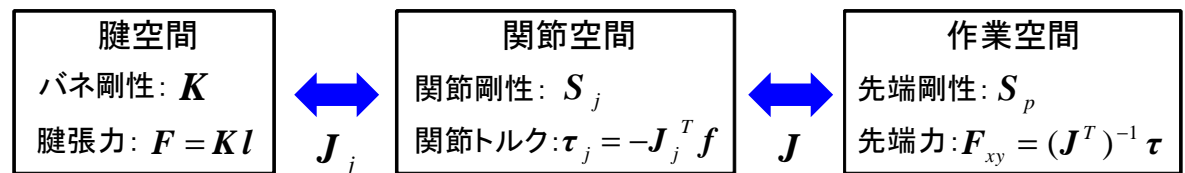


図 5.2: 剛性の変換

5.2 剛性楕円

アーム先端の剛性楕円は，図 5.3 のように表わされる．剛性楕円を導出するために，アーム先端のポテンシャルエネルギー ϵ を (5.4) 式から求める．

$$\begin{aligned}
 \epsilon &= \begin{bmatrix} \Delta x & \Delta y \end{bmatrix} \mathbf{S}_p \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \\
 &= S_{p11}\Delta x^2 + 2S_{p12}\Delta x\Delta y + S_{p22}\Delta y^2 \\
 &= 1
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

ここで， Δx ， Δy はアーム先端部の微小変位を表わす．また，(5.4) 式において，ポテンシャルエネルギー $\epsilon = 1$ として考えている．(5.4) 式で算出された先端のポテンシャルエネルギー ϵ から，固有値・固有ベクトルを利用することで (5.5) 式のように剛性楕円を求めることができる [12]．

$$\begin{aligned}
 (A \cos^2 \phi + B \sin^2 \phi) \Delta x^2 + (A \sin^2 \phi + B \cos^2 \phi) \Delta y^2 \\
 + 2(A - B) \sin \phi \cos \phi \Delta x \Delta y = 1
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

剛性楕円は，(5.5) 式中で示される短軸 A ，長軸 B ，傾き ϕ の 3 つのパラメータで表わされる．

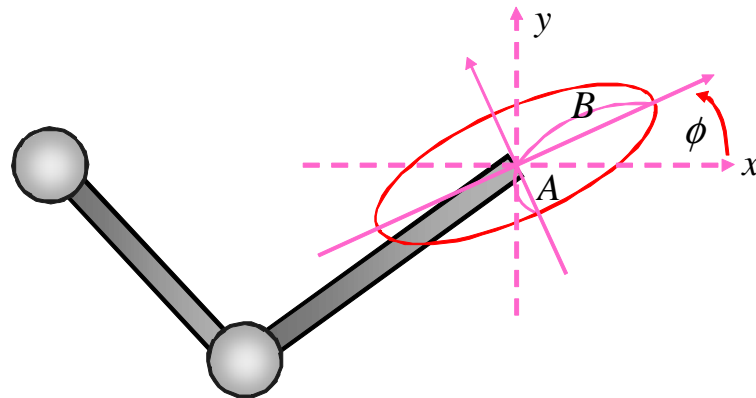


図 5.3: 剛性楕円

剛性楕円は先端剛性によって特性が決まるため，先端剛性の値によって形状が変化する．先端剛性は (5.1) 式によって求められることから，これはすなわち，ヤコビ行列 J の変化と関節剛性行列 S_j の変化によって形状が変化することを意味する．

そこで本論文では，任意の剛性楕円制御が可能なアルゴリズムを提案する．次節でそのアルゴリズムを説明する．

5.3 楕円制御アルゴリズム

先端剛性が姿勢と関節剛性の 2 つのパラメータによって変化することに注目する．これを利用し，姿勢に関する項であるヤコビ行列 J と剛性楕円の指令値 A, B, ϕ から剛性楕円を達成可能な関節剛性指令 s_{jref} を導出し，その関節剛性を制御することによって任意の剛性楕円を制御する手法を提案する．提案手法のアルゴリズムを以下で示す．

1．剛性楕円の指令値である短軸 A ，長軸 B ，傾き ϕ を設定する．

2．(5.4)，(5.5) 式から導出される (5.6) 式を用いて剛性楕円の指令値から先端剛性 S_p を算出する．

$$\begin{aligned} S_{p11} &= A \cos^2 \phi + B \sin^2 \phi \\ S_{p12} &= (A - B) \sin \phi \cos \phi \\ S_{p22} &= A \sin^2 \phi + B \cos^2 \phi \end{aligned} \quad (5.6)$$

3．先端剛性 S_p から関節剛性 S_j へ (5.7) 式を用いて変換する．

$$S_j = J(q)^T S_p J(q) \quad (5.7)$$

(5.7) 式のヤコビ行列 J 内に関節角度 q が含まれているので，姿勢に応じた関節剛性指令値が算出される．

4．算出した S_j を関節剛性指令値として与える．

算出された関節剛性行列 S_j を (3.9) 式を用いて s_{jref} として関節剛性指令値とする．

この提案アルゴリズムを達成する条件は，関節剛性指令 s_{jref} を全て達成可能なことである．具体例を挙げると，非対角要素である s_{12} を制御するには機構的に二関節腱を有している必要があるため，二関節腱を有していない機構では，短軸 A ，長軸 B ，傾き ϕ の 3 つの制御パラメータのうちの 2 つしか制御ができないということである．

5.4 機械剛性による楕円制御アルゴリズム

前節で示した提案アルゴリズムを機械剛性楕円制御に適応する際のブロック図を図 5.4 に示す．ここで， A_M ， B_M ， ϕ_M はそれぞれ，機械剛性による短軸，長軸，傾きを表わす．図 5.4 は図 4.2 の制御系における Stiffness of Machine Reference Generator として組み込まれ，機械剛性による剛性楕円を制御するのに必要な関節剛性指令値を与える．このようにすることで，機械剛性による剛性楕円制御が可能となる．

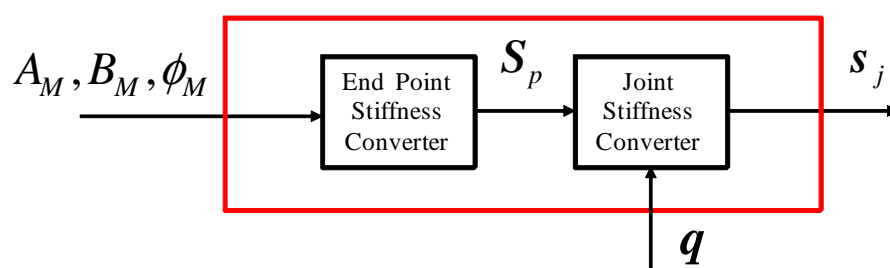


図 5.4: 機械剛性変換器

5.5 制御剛性による楕円制御アルゴリズム

機械剛性とは，制御対象そのものが有する機構的な剛性である．それに対しここで扱う制御剛性とは，アームの位置制御器によって発生する剛性である．すなわち，定常的には比例ゲインのことを指す．これらの違いを以下で述べる．機械剛性は制御剛性が寄与しない範囲で主に効いてくるものであり，アームに機械的な柔らかさを持たせることや撃力などへの対応に対して有効とされる．それに対し，制御剛性は，理想的には制御周期内で機械剛性に対して支配的に効いてくるものである．そこで，本節では制御剛性を機械剛性と同様に制御する方法を示す．

制御剛性は，定常的に比例ゲインと等価とみなせることから，図 4.1 における関節角度制御器中の比例ゲインを制御剛性による関節剛性と考える．図 4.1 中の関節角度制御器は，図 5.5 のように設計されている．図 5.5 中のフィードフォワード補償器は，(3.1) 式の関節の動力学方程式から導出した (5.8) 式を用いている．

$$\begin{aligned}\tau(\mathbf{q}_{\text{ref}}) = & \mathbf{M}_j(\mathbf{q}_{\text{ref}})\ddot{\mathbf{q}}_{\text{ref}} + \mathbf{D}_j\dot{\mathbf{q}}_{\text{ref}} \\ & + \mathbf{h}_j(\mathbf{q}_{\text{ref}}, \dot{\mathbf{q}}_{\text{ref}}) + \mathbf{g}_j(\mathbf{q}_{\text{ref}})\end{aligned}\quad (5.8)$$

ここで，提案する剛性楕円制御アルゴリズムを適用するには非対角要素が必要となるため，比例ゲインの構造を (5.9) 式のようにする．

$$\mathbf{K}_{jp} = \begin{bmatrix} K_{jp11} & K_{jp12} \\ K_{jp12} & K_{jp22} \end{bmatrix}\quad (5.9)$$

このような構造をとることによって，制御剛性による剛性楕円制御が可能となる．この手法を表わすブロック図を図 5.6 に示す．ここで，短軸 A_c ，長軸 B_c ，傾き ϕ_c は制御剛性における剛性楕円パラメータである．このブロック図を図 4.1 の関節角度制御器に適用することで制御剛性による剛性楕円制御が可能となる．また，制御剛性による剛性楕円制御アルゴリズムは，機械剛性による剛性楕円制御アルゴリズムの適用範囲のように対象が二関節腱を有する剛性可変アームでなければならないという制限はない．すなわち，この提案手法は全ての 2-Link 機構に対して適用可能である．

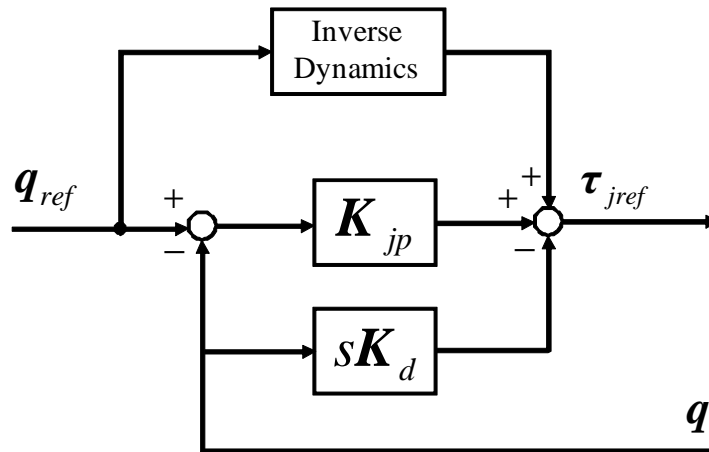


図 5.5: 関節角度制御器

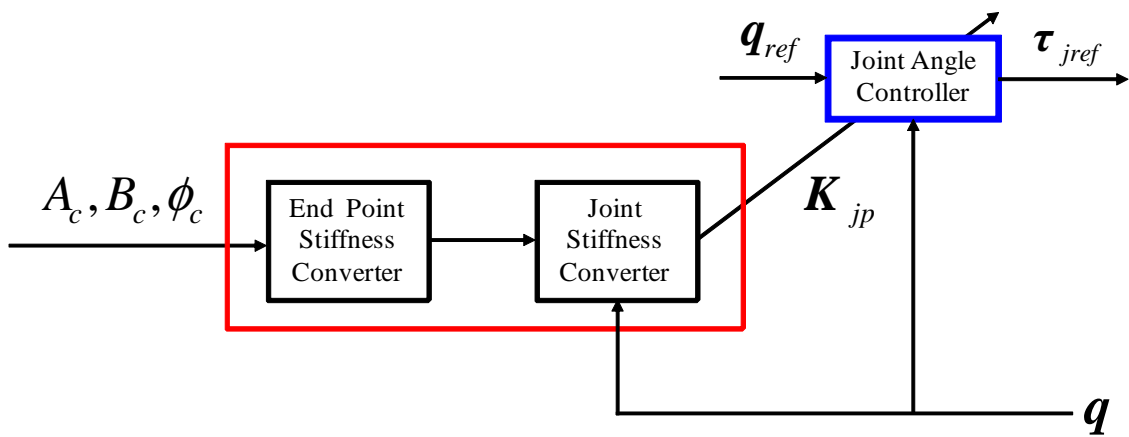


図 5.6: 制御剛性変換器+関節角度制御器

5.6 ハイブリッド剛性制御

機械剛性による剛性楕円制御と制御剛性による剛性楕円制御はそれぞれ独立に行うことができるため，統合可能である．この 2 つの制御を統合した剛性制御をハイブリッド剛性制御として提案する．図 4.1，図 5.4 と図 5.6 を統合した制御系が図 4.2 である．機械剛性における剛性楕円パラメータを短軸 A_M ，長軸 B_M ，傾き ϕ_M ，制御剛性における剛性楕円パラメータを短軸 A_c ，長軸 B_c ，傾き ϕ_c とすることで機械剛性の剛性楕円パラメータと制御剛性の剛性楕円パラメータは独立に設定可能となる．制御剛性は，理想的には制御周期内で機械剛性に対して支配的に寄与するが，実際には制御剛性の寄与する時間領域は制御系の遅れなどの影響を受ける．そのため，制御周期内であっても実際には制御剛性が寄与しない領域は生じてしまう．このことから，制御剛性の寄与しない領域で寄与する機械剛性制御が必要であり，両手法を統合したハイブリッド剛性制御は有効な手法である．

第6章 シミュレーション

図 4.2 に示す制御系を用いて計算機シミュレーションによって提案法の有効性を示す．シミュレーションの対象には，図 5.1 に示す二関節腱を有する 3 対 6 筋腱駆動機構を用いる．

6.1 シミュレーション対象

図 5.1 における，関節ヤコビ行列 J_j は (6.1) 式で表わされる．

$$J_j = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ -R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \\ 0 & -R_2 \\ R_1 & R_2 \\ -R_1 & -R_2 \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

ここで， R_i は i 番目の関節のプーリ半径である．

(3.7) 式，(3.8) 式，(6.1) 式から，この機構の関節剛性行列 S_j の各要素は (6.2) 式で表わされる．

$$\begin{aligned} S_{j11} &= R_1^2(K_{12} + K_{56}) \\ S_{j12} &= R_1 R_2 K_{56} \\ S_{j22} &= R_2^2(K_{34} + K_{56}) \end{aligned} \quad (6.2)$$

ここで， $K_{12} = K_1 + K_2$ ， $K_{34} = K_3 + K_4$ ， $K_{56} = K_5 + K_6$ である．これらのパラメータは，主動腱と拮抗腱のバネ剛性の和を表わしている．(6.2) 式より，非線形バネを用いた腱駆動機構は，バネ剛性の和の制御によって関節剛性を制御することが示されている．(3.9) 式より，関節剛性ベクトルは (6.3) 式で表わされる．

$$\begin{aligned} s_{j11} &= R_1^2(K_{12} + K_{56}) \\ s_{j12} &= R_1 R_2 K_{56} \\ s_{j22} &= R_2^2(K_{34} + K_{56}) \end{aligned} \quad (6.3)$$

全ての関節剛性の要素が制御可能なことから，このシミュレーション対象は，提案アルゴリズムの条件を満たしている．

また，剛性楕円制御アルゴリズムで用いる (5.7) 式中のヤコビ行列 J は，図 5.1 から (6.4) 式のように求められる．

$$J = \begin{bmatrix} -l_1 \sin q_1 - l_2 \sin q_{12} & -l_2 \sin q_{12} \\ l_1 \cos q_1 + l_2 \cos q_{12} & l_2 \cos q_{12} \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

ここで，(6.4) 式中の l_1, l_2 はリンク長であり，関節角度 q_1 と q_2 の和を $q_{12} = q_1 + q_2$ と定義している．

制御対象のパラメータを表 6.1 にそれぞれ示す．また，張力制御系における制御器パラメータは [9] と同様に設計しているため省略する．この対象において，機械剛性楕円制御，制御剛性楕円制御，剛性ハイブリッド制御の有効性をそれぞれ示す．

表 6.1: 制御対象のパラメータ

| | | | Motor1 | Motor2 | Motor3 | Motor4 |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Inertia [$10^{-3}\text{kg}\cdot\text{m}^2$] | | | 5.81 | 4.53 | 5.05 | 3.64 |
| Viscosity [$10^{-3}\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$] | | | 4.49 | 3.51 | 4.03 | 3.75 |
| Radius [10^{-2}m] | | | 5.50 | 5.50 | 5.50 | 5.50 |
| | | | Motor5 | Motor6 | Joint1 | Joint2 |
| Inertia [$10^{-3}\text{kg}\cdot\text{m}^2$] | | | 4.63 | 3.98 | 2.00 | 0.89 |
| Viscosity [$10^{-3}\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$] | | | 4.99 | 3.52 | 4.0 | 4.00 |
| Radius [10^{-2}m] | | | 5.50 | 5.50 | 1.50 | 1.50 |
| | | | Link1 | Link2 | | |
| Mass [kg] | | | 0.38 | 0.26 | | |
| Length [m] | | | 0.25 | 0.20 | | |
| Mass center [m] | | | 0.12 | 0.10 | | |
| | Spring1 | Spring2 | Spring3 | Spring4 | Spring5 | Spring6 |
| a_1 | 5.0 | 5.2 | 5.5 | 5.7 | 5.7 | 5.1 |
| a_2 | 187 | 192 | 182 | 179 | 186 | 185 |
| a_3 | −5.0 | −5.2 | −5.5 | −5.7 | −5.7 | −5.1 |

6.2 機械剛性シミュレーション条件

まず，機械剛性による剛性楕円制御に関する検証を行う．このシミュレーションでは，制御対象の姿勢の変動に対して一定の剛性楕円を制御する．姿勢の変化は図 6.1 に示される通りである．

- ・ 短軸 $A_M = 120[N/m]$
- ・ 長軸 $B_M = 240[N/m]$
- ・ 楕円の傾き $\phi_M = 0[deg]$

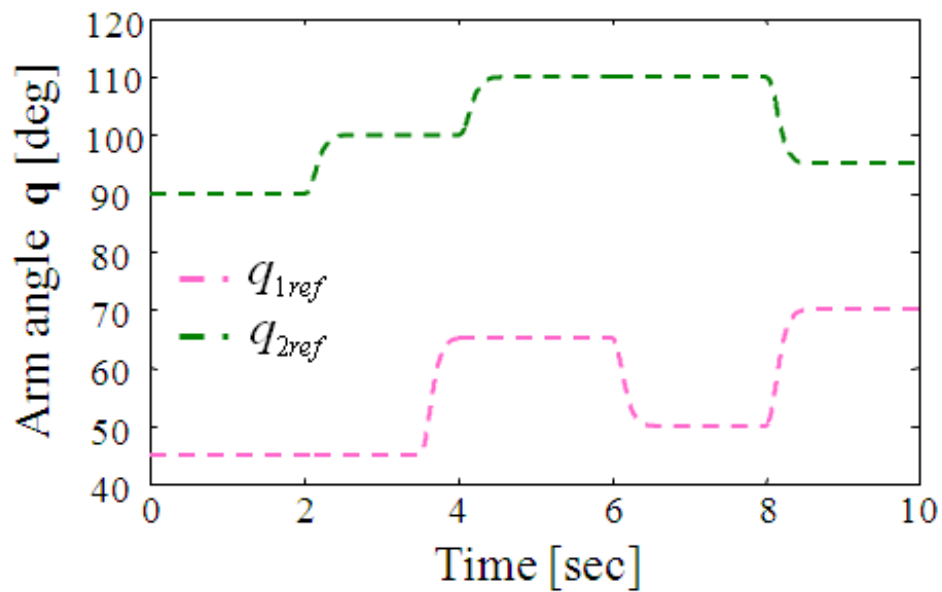


図 6.1: 関節角度指令値

6.3 機械剛性シミュレーション結果

機械剛性による剛性橢円制御シミュレーション結果を図 6.2～図 6.6 に示す．図 6.2～図 6.5 は剛性橢円の形状を表わす．図 6.2 は，初期姿勢における剛性橢円を表わしており，望みの剛性橢円が制御出来ていることが分かる．図 6.3～図 6.5 は，姿勢が変化したときの剛性橢円をそれぞれ示しており，姿勢の変動を伴っても望みの剛性橢円の制御ができていることが確認できる．図 6.6 は，上から，関節角度と関節剛性の時間応答を表わしている．この結果から，姿勢の変化と関節剛性の変化が対応していることが分かる．よって，望みの剛性橢円を制御するには関節剛性を姿勢に応じて調節する必要があることが分かり，提案アルゴリズムの有効性がいえる．今回は姿勢に応じて一定の剛性橢円を制御するシミュレーション結果を示したが，剛性橢円指令値を可変にして制御することも可能であり，提案法は汎用性のあるアルゴリズムである．

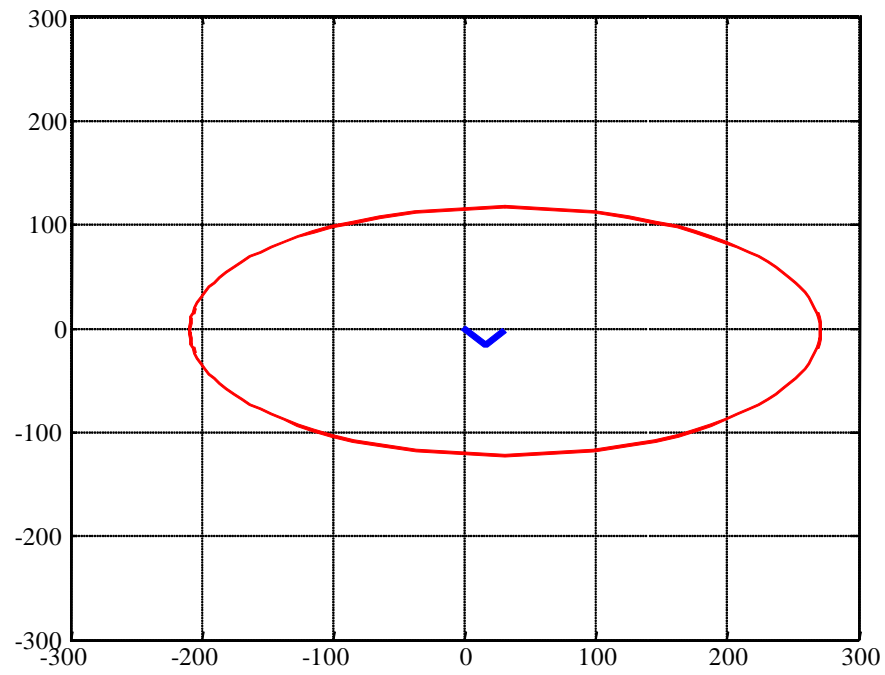


図 6.2: 剛性楕円 ($q_1 = 45$, $q_2 = 90$)

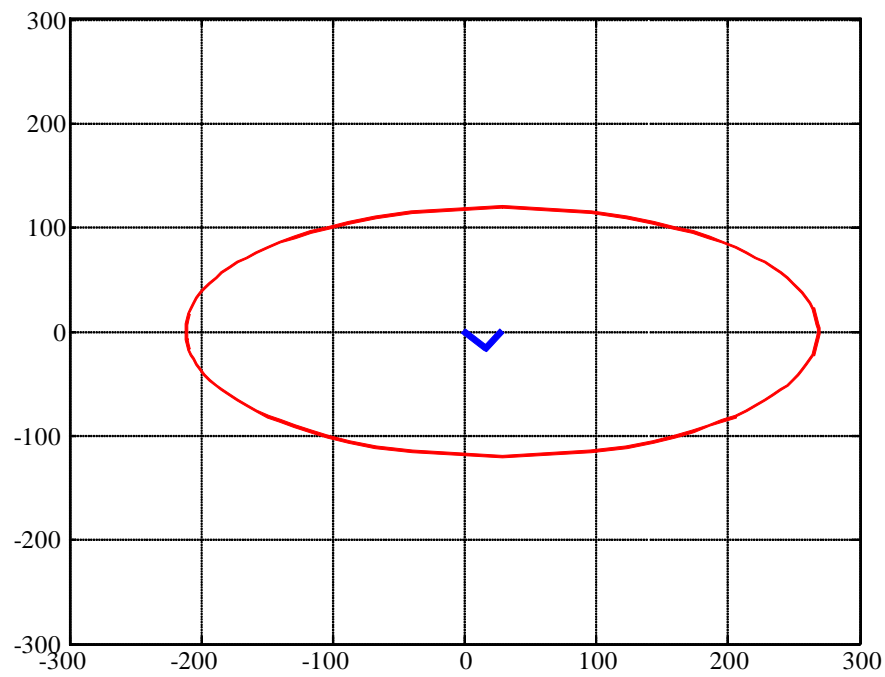


図 6.3: 剛性楕円 ($q_1 = 45$, $q_2 = 100$)

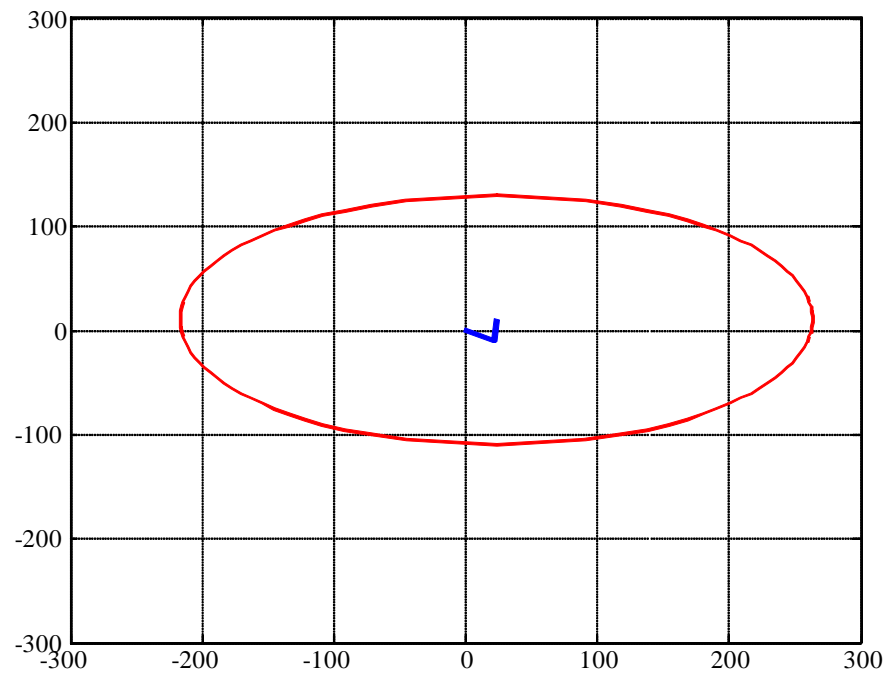


図 6.4: 剛性楕円 ($q_1 = 65$, $q_2 = 110$)

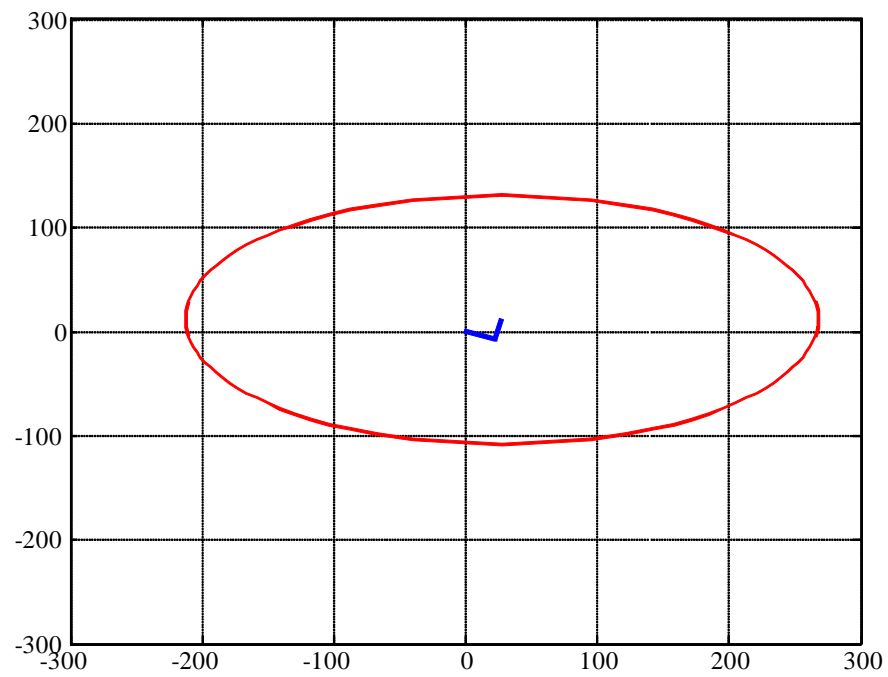


図 6.5: 剛性楕円 ($q_1 = 70$, $q_2 = 95$)

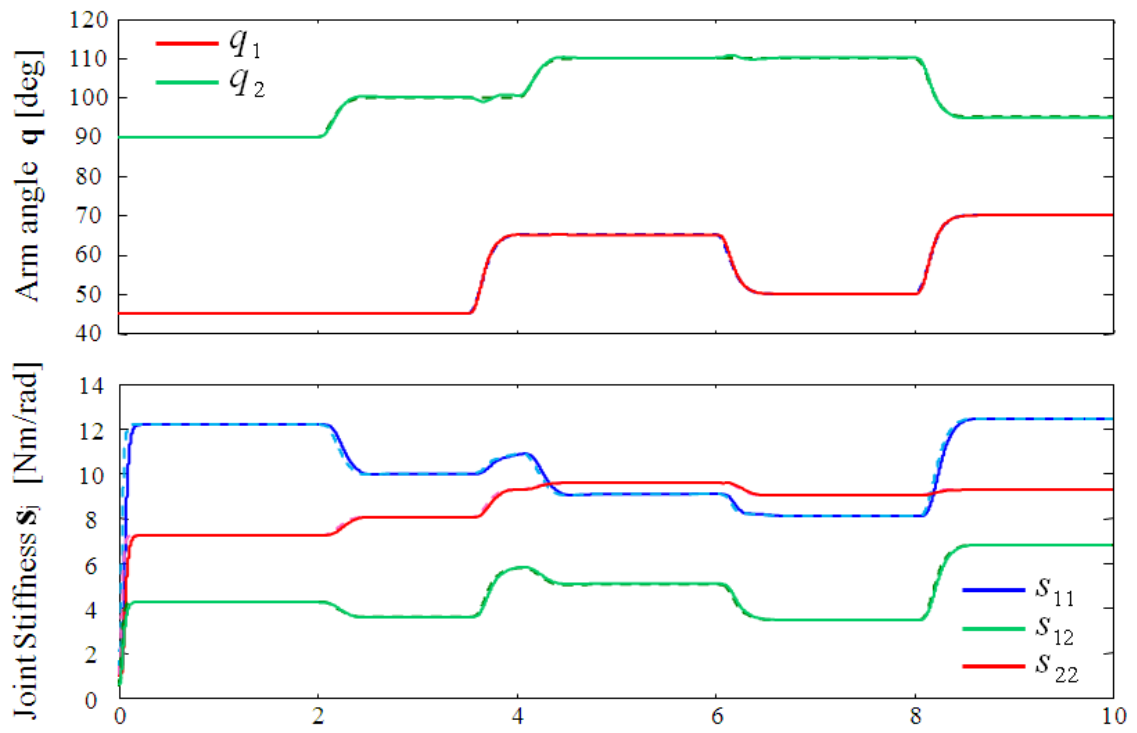


図 6.6: 関節角度と関節剛性応答

6.4 制御剛性シミュレーション条件

次に，制御剛性による剛性楕円制御に関する検証を行う．制御剛性が制御できているかは定常特性から判断する．

図 6.7 のように，アーム先端に外力が加わるとする．このとき，外力 F_{out} は (6.5) 式で表わされる

$$\mathbf{F}_{out} = \begin{bmatrix} F \cos \theta_{out} \\ F \sin \theta_{out} \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

ここで， F ， θ_{out} は外力の絶対値，外力の入力方向である．定常状態ではフックの法則より，先端の変位理論値 ΔP は (6.6) 式で表わされる．

$$\Delta P = \begin{bmatrix} \frac{F \cos \theta_{out}}{B_c \cos \phi_c} \\ \frac{F \sin \theta_{out}}{A_c \sin \phi_c} \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

ここで， A_c ， B_c ， ϕ_c は剛性楕円の短軸，長軸，傾きである． x 方向， y 方向の剛性楕円の軸の大きさを剛性として，外力の x 方向成分， y 方向成分から算出することで変位の理論値が求められる．

(6.6) 式より，定常状態における変位の理論値を算出することができることから，アーム先端の定常偏差を評価することで制御剛性による剛性楕円が制御できているかを評価する．ここでは，条件 1 と条件 2 のように異なる姿勢と剛性楕円でシミュレーション検証を行う．外力の入力方向は， $45[deg]$ ずつ向きを変えて行う．

条件

- ・ 姿勢 : $q_1 = -30[deg]$, $q_2 = 60[deg]$
- ・ 剛性楕円指令 : $A_c = 50[N/m]$, $B_c = 500[N/m]$, $\phi_c = 0[deg]$
- ・ 外力 : $F = 0.1[N]$

条件

- ・ 姿勢 : $q_1 = -20[deg]$, $q_2 = 60[deg]$
- ・ 剛性楕円指令 : $A_c = 50[N/m]$, $B_c = 500[N/m]$, $\phi_c = 20[deg]$
- ・ 外力 : $F = 0.1[N]$

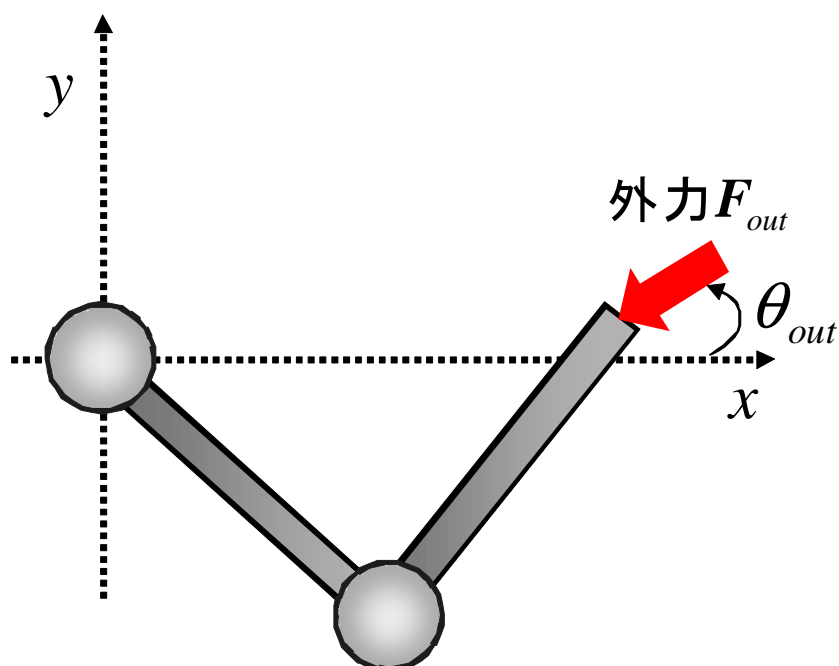


図 6.7: 問題設定

6.5 制御剛性シミュレーション結果

図 6.8 , 図 6.9 にアーム先端の変位理論値とシミュレーションによって得られた測定値を示す．実線で書かれているのが理論値で， \circ で表わされているのが測定値である．どちらの結果も，誤差が若干あるものの，理論値に近い結果となっていることがわかり，良好な結果といえる．誤差の原因は，姿勢によって外力に対して抗しやすい姿勢があることなどが原因と考えている．しかし，生じている誤差は 10 % 未満であり，それほど問題ではないと考えられる．よって，制御剛性においても剛性楕円を制御できているといえる．

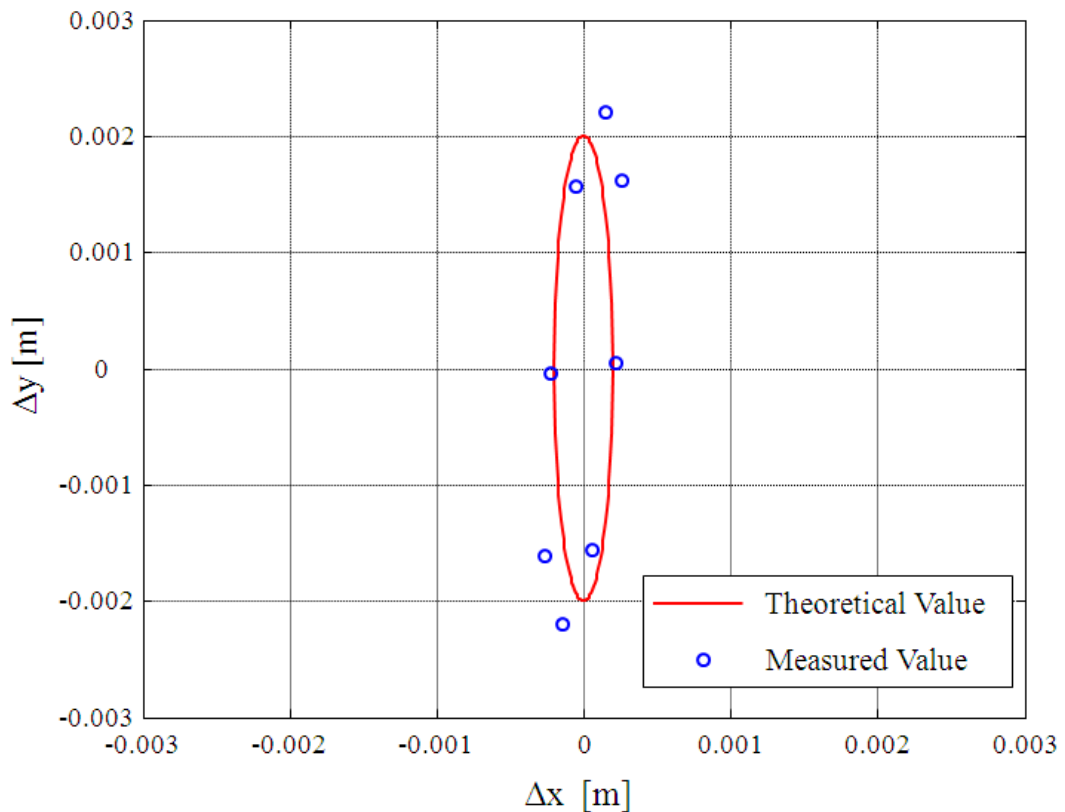


図 6.8: 理論値と結果の比較 (条件)

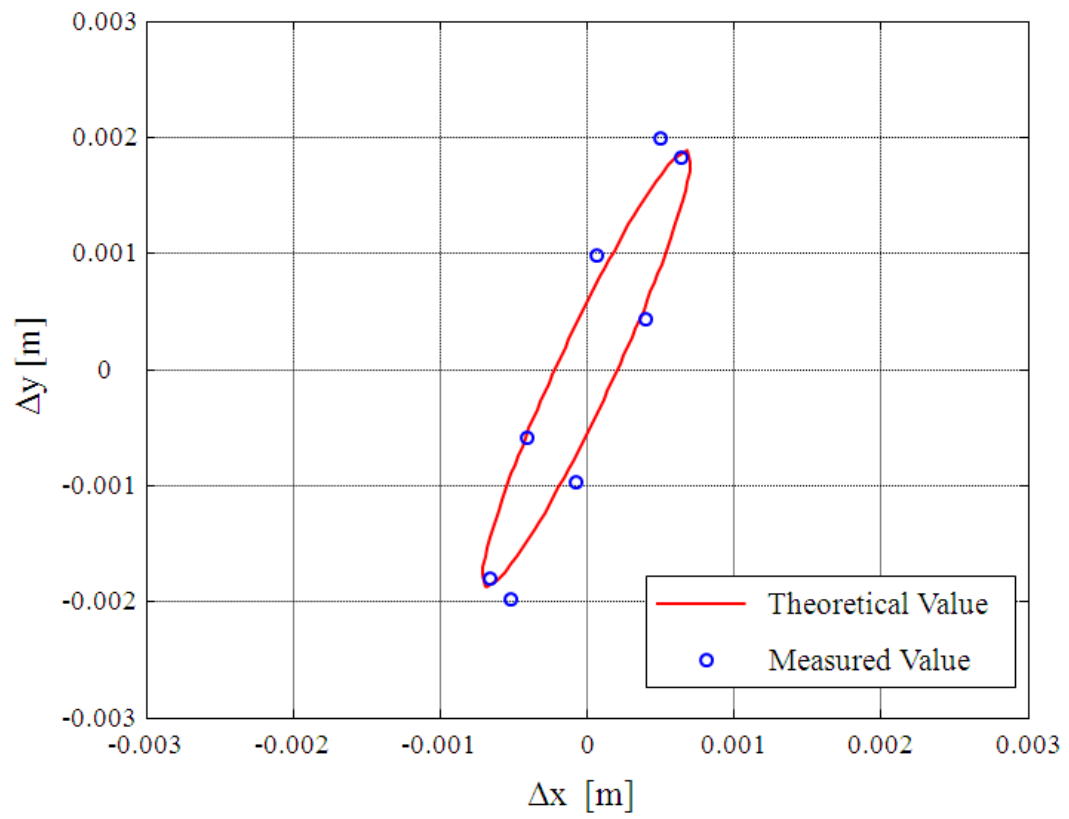


図 6.9: 理論値と結果の比較（条件 ）

6.6 ハイブリッド剛性制御シミュレーション

前節までで機械剛性による剛性楕円制御と制御剛性による剛性楕円制御に対する提案法の有効性がそれぞれ示された．ここでは，機械剛性と制御剛性を同時に制御する際に機械剛性が制御剛性に対してどのように寄与するのかについてシミュレーションによって考察する．

前述の通り，機械剛性は制御剛性の寄与しない範囲で主に効くものである．機械剛性が影響する割合は制御周期や制御系の応答遅れにも依存するが，ここでは本研究で設定している $1[ms]$ で検証する．張力制御系の制御性能は [11] の論文と同様である．

制御剛性の検証と同様に，図 6.7 のようにアーム先端に外力が加わるとする．入力される外力は， $F = 1[N]$ ， $\theta_{out} = 0[deg]$ ，姿勢の指令を $q_{1ref} = -30[deg]$ ， $q_{2ref} = 60[deg]$ として，以下の条件で外力に対する過渡応答特性を解析する．このように設定することによって，それぞれの剛性の変化による影響と機械剛性と制御剛性の寄与する時間領域について考察できる．

- ・条件 A：制御剛性を固定して機械剛性のみを変化させて検証

制御剛性の剛性楕円パラメータを $A_c = 20[N/m]$ ， $B_c = 200[N/m]$ ， $\phi_c = 0[deg]$ と一定に設定し，機械剛性の剛性楕円パラメータを以下の条件（図 6.10）で与える．

条件 A- ：機械剛性楕円指令： $A_M = 50[N/m]$ ， $B_M = 500[N/m]$ ， $\phi_M = 0[deg]$

条件 A- ：機械剛性楕円指令： $A_M = 50[N/m]$ ， $B_M = 500[N/m]$ ， $\phi_M = 20[deg]$

条件 A- ：機械剛性楕円指令： $A_M = 20[N/m]$ ， $B_M = 200[N/m]$ ， $\phi_M = 0[deg]$

- ・条件 B：機械剛性を固定して制御剛性のみを変化させて検証

制御剛性の剛性楕円パラメータを $A_M = 50[N/m]$ ， $B_M = 500[N/m]$ ， $\phi_M = 0[deg]$ と一定に設定し，機械剛性の剛性楕円パラメータを以下の条件（図 6.11）で与える．

条件 B- ：制御剛性楕円指令： $A_c = 20[N/m]$ ， $B_c = 200[N/m]$ ， $\phi_c = 0[deg]$

条件 B- ：制御剛性楕円指令： $A_c = 30[N/m]$ ， $B_c = 300[N/m]$ ， $\phi_c = 0[deg]$

条件 B- ：制御剛性楕円指令： $A_c = 30[N/m]$ ， $B_c = 300[N/m]$ ， $\phi_c = 10[deg]$

- ・条件 C：ベースに対する機械剛性による変化特性と制御剛性による変化特性を検証
条件 A，B から得られた結果を比較して検証する．パラメータは以下のものを用いる．

条件 C- : 機械剛性楕円指令 : $A_M = 50[N/m]$, $B_M = 500[N/m]$, $\phi_M = 0[deg]$, 制御剛性楕円指令 : $A_c = 20[N/m]$, $B_c = 200[N/m]$, $\phi_c = 0[deg]$

条件 C- : 機械剛性楕円指令 : $A_M = 50[N/m]$, $B_M = 500[N/m]$, $\phi_M = 0[deg]$, 制御剛性楕円指令 : $A_c = 30[N/m]$, $B_c = 300[N/m]$, $\phi_c = 0[deg]$

条件 C- : 機械剛性楕円指令 : $A_M = 20[N/m]$, $B_M = 200[N/m]$, $\phi_M = 0[deg]$, 制御剛性楕円指令 : $A_c = 20[N/m]$, $B_c = 200[N/m]$, $\phi_c = 0[deg]$

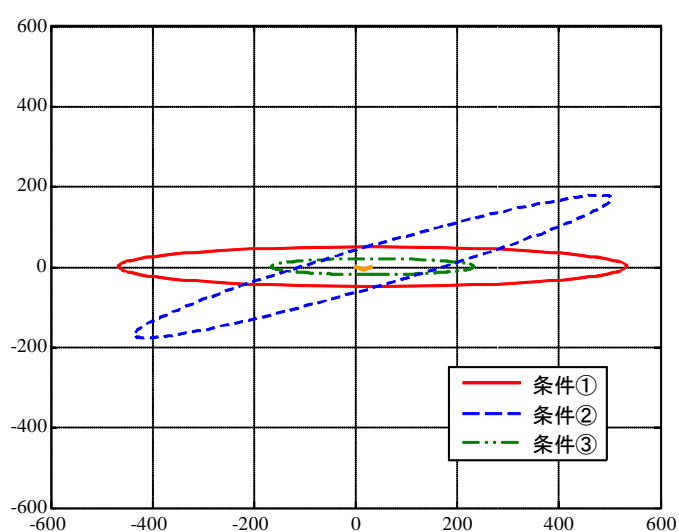


図 6.10: 条件 A の機械剛性楕円

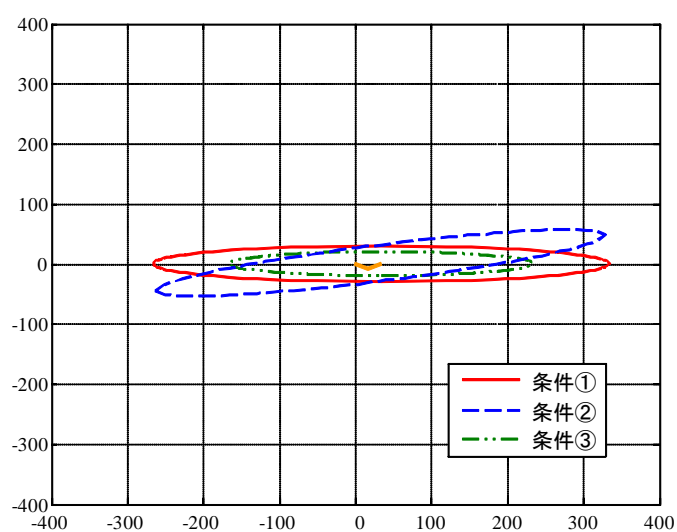


図 6.11: 条件 B の制御剛性楕円

条件 A ~ C で行ったシミュレーションの過渡応答を図 6.12 ~ 図 6.15 に示す。

図 6.12 より、条件 1 が最も外乱抑圧特性が高いことがわかる。これは、条件 1 に比べ外力の方向に対して剛性を大きくしているためである。機械剛性の変化による影響が生じる時間は全ての条件でほぼ同じである。また、制御剛性を変えたパターンにおいても同じ時間から影響が生じていることを確認しており、コントローラゲインによる機械剛性の効く時間への影響はほぼないものと考えられる。そして、定常状態における収束値は条件 1 ~ 3 の全てで同じ結果となり、定常状態では制御剛性が支配的である。

図 6.13 より、条件 1 が最も外乱抑圧特性が高いことがわかる。これも同様に、条件 1 に比べ外力の方向に対して剛性を大きくしているためと考えられる。制御剛性の変化による影響が生じる時間は全ての条件でほぼ同じであるが、機械剛性に比べて遅いことがわかる。制御剛性が効いてくる時間は機械剛性に対して遅れていることがわかる。

条件 C において剛性の影響の生じる時間を比較したものが図 6.14 であり、それを一部拡大したものが図 6.15 である。機械剛性による影響が $0.015[\text{sec}]$ 頃から生じているのに対し、制御剛性による影響は $0.030[\text{sec}]$ 頃から生じている。このことから、 $0.015 \sim 0.030[\text{sec}]$ の間は機械剛性が支配的に効いていることがわかる。これは、実際の制御系には理想状態とは異なり、遅れがあるためと考えられる。これを検証するために、条件 C と全く同様の条件で制御系の応答遅れを増やした条件で過渡応答を検証した。その結果の拡大図を図 6.16 に示す。図 6.15 に比べて、図 6.16 は制御剛性の寄与する時間が遅れていることが分かる。このことから、制御剛性の寄与する範囲は制御系の性能にも依存することが示される。

以上の結果から、過渡応答のレベルで機械剛性が支配的に効く領域があることが示され、その領域は制御周期だけでなく、制御系の応答にも影響されることが示された。これは、機械剛性と制御剛性をそれぞれ任意に制御可能であることが意味を持つことを示す結果となる。以上のことから、提案法であるハイブリッド剛性制御の有効性が示された。

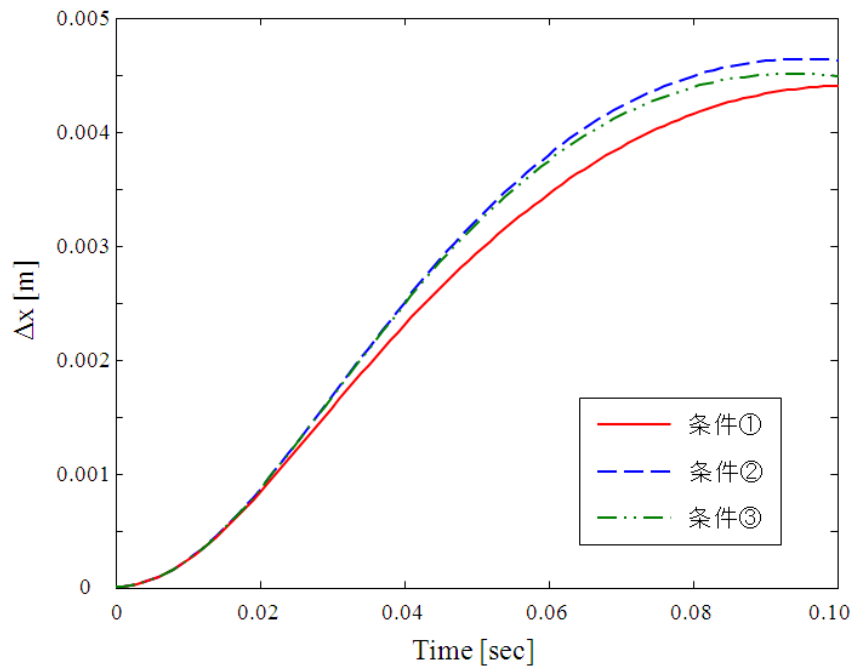


図 6.12: 外力に対する手先の過渡応答結果 (条件 A)

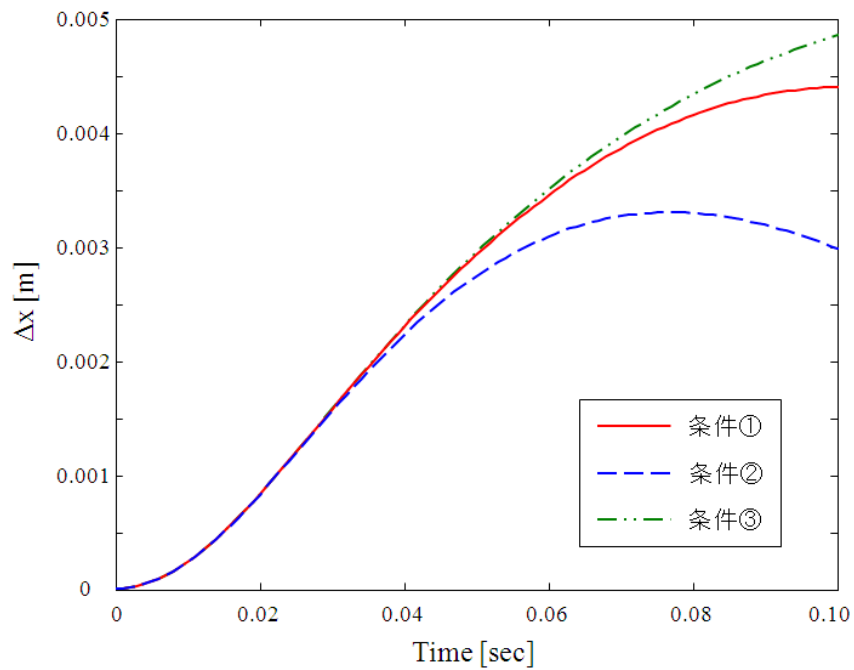


図 6.13: 外力に対する手先の過渡応答結果 (条件 B)

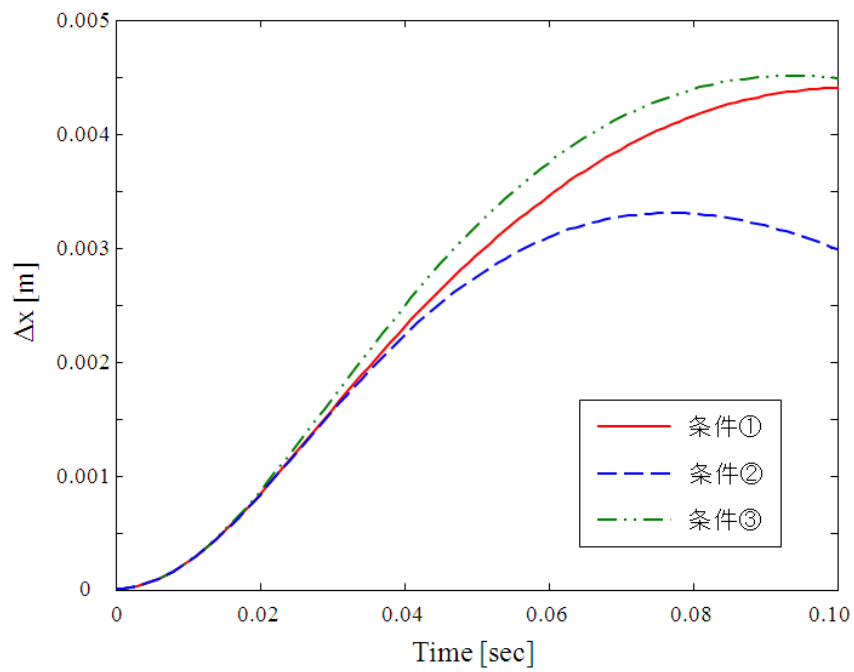


図 6.14: 外力に対する手先の過渡応答結果 (条件 C)

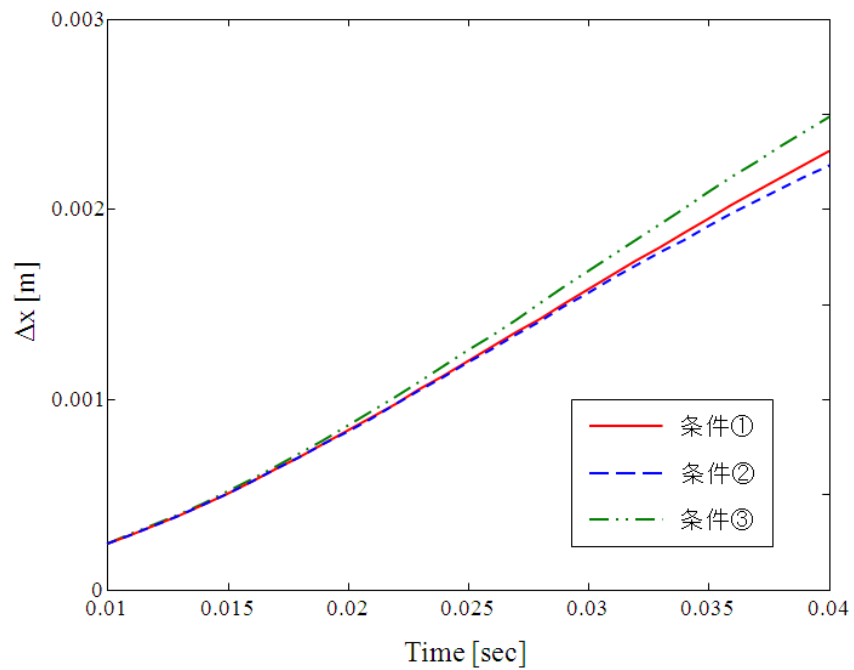


図 6.15: 外力に対する手先の過渡応答結果拡大図 (条件 C)

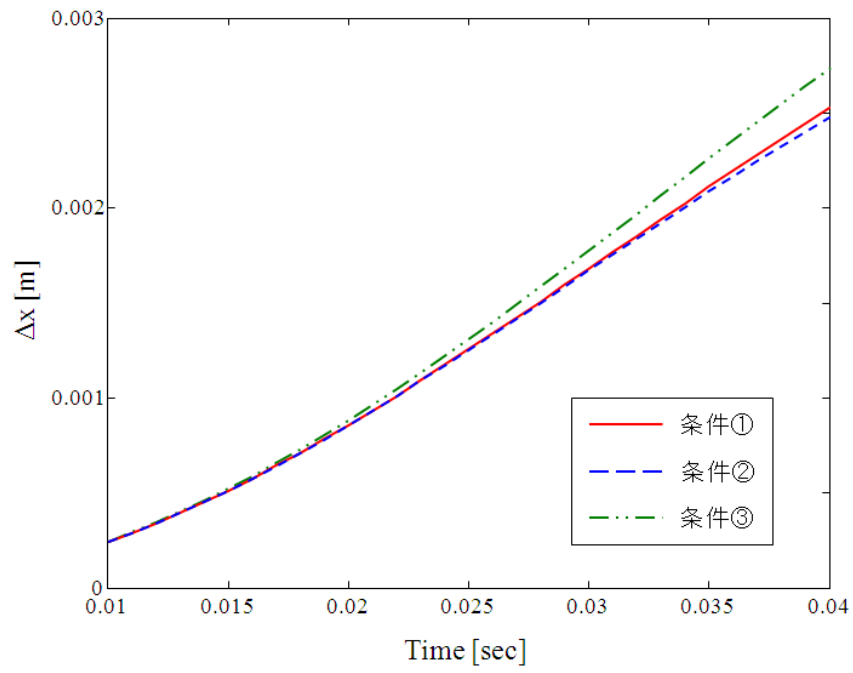


図 6.16: 外力に対する手先の過渡応答結果拡大図 (条件 C)

6.7 タスクへの応用例

ハイブリッド剛性制御を用いて、タスクに適した剛性をどのように設定するかについて述べる。今回は、柔らかい物体の受け取りタスクを想定する。柔らかい物体に対し、剛性を大きくしていると接触時に衝撃で壊れる恐れがある。このようなケースに対して、人間は剛性を小さくして対応していることから、ロボットアームでも同様に考える。つまり、衝撃を受ける際に、対象物に危害を加えないことを重視して制御するということである。

この問題設定を剛性のハイブリッド制御に対して言い換えると、機械剛性を小さくし、制御性能を損なわないレベルで制御剛性を設定すればよいということになる。すなわち、物体を受け取る際に発生する衝撃に対して機械剛性で柔らかく対応し、受け取って以降の制御剛性の支配する領域は制御剛性に任せるということである。剛性ハイブリッド制御が可能なのは本論文で示していることからこの制御は達成可能である。機械剛性が制御可能なことは、剛性を大きくしてアームを硬くするよりも剛性を低くしてアームに柔らかさを持たせることができるという点のメリットの方が大きいと考えられる。そのため、剛性を機械的に変化させられるという点で、様々なタスクへの応用が効くと考えられる。

また、外乱抑圧に重点をおく場合は、機械剛性・制御剛性を共に大きくすることによって有効に作用することは前節で示されている。

タスクに適した剛性は、付録 A で説明する強化学習を用いて多様なタスクに適応して獲得することを考えている。

第7章 結言

従来研究では剛性が関節座標で制御されており，アームがタスクを行う先端と剛性の座標が対応していないという問題が存在した．そこで，剛性の座標を変換し，姿勢の情報を考慮することで任意の剛性橢円を制御可能なアルゴリズムを機械剛性，制御剛性の双方に提案した．また，機械剛性による剛性橢円制御と制御剛性による剛性橢円制御を統合して，ハイブリッド剛性制御として提案した．本論文では，シミュレーションによって機械剛性橢円制御，制御剛性橢円制御，ハイブリッド剛性制御の有効性を示した．また，ハイブリッド剛性制御の利用例を示した．

今後の研究課題としては，本論文の提案手法はシミュレーションによって有効性が確認されているが，実機実験を行っていない．そのため，実機実験によって有効性を確認する必要がある．また，タスクに適した剛性を様々なタスクに対して検証する必要がある．タスクに適した剛性に関しては，付録 A に示す強化学習を用いることで獲得できると考えている．付録 A に示す手法を利用して様々な剛性を設定できるようにすることも研究課題となる．

なお本研究は科研費 (21560460) の助成を受けたものである．

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] Ronald Van Ham, Thomas G. Sugar, Bram Vanderborght, Kevin W. Hollander, Dirk Lefeber: “Compliant Actuator Designs”, *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Volume 16, Issue 3, pp. 81–84 (2009)
- [3] Reibert, M.H. and Crag, J.J: “Hybrid position/force control of manipulators”, *ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 103, pp. 2–12 (1981)
- [4] Hogan, N: “Impedance control: An approach to manipulation”, *ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 107, pp. 1–23 (1985)
- [5] 森田，富田，植田，菅野：「関節の機械インピーダンスを調節可能な力制御ロボットアームの開発」，日本ロボット学会誌，Vol. 16, No. 7, pp. 1001–1006 (1998)
- [6] 宇野 元雄：「ゴム人工筋とロボットへの応用」，油圧と空気圧，Vol. 17, No. 3, pp. 175–180 (1985)
- [7] 朴 贊逸，小林 博明：「腱駆動ロボットの作業に適した関節剛性の GA による制御」，日本ロボット学会誌，Vol. 24, No. 4, pp. 482–488 (2006)
- [8] 小澤 隆太，小林 博明：「非線形弾性腱を持つ腱駆動ロボット機構の定力制御」，日本ロボット学会誌，Vol. 19, No. 3, pp. 372–379 (2001)
- [9] 伊藤 宏司 “身体知システム論”，共立出版，2005
- [10] 兵頭 和人，小林 博明，大鐘 大介，山本 圭治朗：「冗長腱を持つ腱駆動機構ロボット機構の剛性制御」，日本ロボット学会誌，Vol. 17, No. 4, pp. 493–502 (1999)

第 7 章 結言

- [11] 灰屋 和勇, 駒田 諭, 平井 淳之, “ 腱駆動機構における非線形バネの特性式誤差補償による張力制御 ”, 電気学会論文誌 D ,vol. 130, No. 6, pp. 816-823 (2010)
- [12] 大島 徹, 熊本 水頼 “ 二関節筋機能を有するロボットアーム ”, 日本機械学会論文集 (C 編), 61 巻 592 号 (1995)
- [13] 三上 貞芳, 皆川 雅章 “ 強化学習 ”, 森北出版 (2000)

謝辞

本研究の遂行ならびに修士論文作成にあたり，終始丁寧なご指導を頂きました三重大学大学院工学研究科教授 平井 淳之 先生に深く感謝致します．また，先生には技術者，研究者，そして社会人の先輩として大変貴重なご意見を頂きましたことをこの場を借りて深く感謝致します．本研究の遂行および修士論文作成にあたり，適切な御指導を頂きました同大学准教授 駒田 諭 先生に深く感謝致します．また日頃から本研究の遂行及び学生生活において，貴重な御意見を頂きました同大学准教授 弓場井 一裕 先生に心から感謝の意を表します．また，日頃から公私ともに大変お世話になりました技術職員 中村 勝 氏に心から感謝致します．

本研究を遂行するにあたり，同グループの先輩として親身なご指導をいただきました灰屋 和勇 氏，また同グループとして共に協力し合った，森 翔太 君，柏木 宏康 君，野崎 泰弘 君に心より感謝致します．今後の御活躍を心より期待しております．

そして，研究室での生活を共にした臼井 伸充 君，杉野 貴基 君，鈴木 克哉 君，藤井 宏樹 君，水谷 彰孝 君，山口 敦由 君，ならびに電機システム研究室の皆様には，有意義な研究室生活が送れたことに心から感謝致します．

最後に，大学院への進学を含め，これまで何一つ不自由なく学生生活を送らせて頂いた両親に心から感謝します．

付 録 A 強化学習

強化学習 [13] とは、目標の出力（教師信号）をエージェント（学習の主体）に与えない能動学習である。具体的には、最適解が未知である状況下において、エージェントが行った行動に対して状態がどのように変化したのかを報酬に基づいて評価し、試行錯誤を繰り返して累積報酬が最大になるような行動を学習する。ここで述べる報酬とは、設計者がタスクによって任意に設定する評価関数である。

A.1 Actor-Critic 法

強化学習の手法として、図 A.1 に示す Actor-Critic 法を選択する。この理由は、離散空間に適応することが多い強化学習において、連続空間への拡張が容易に行えるためである。

この手法の概要を簡潔に述べると、Actor で行動 Y を決定し、行動 Y により状態 X_t が変化する。その状態 X_t から報酬 r に基づいて Critic がその行動 Y に対する評価を学習し、TD 誤差 δ を算出して学習パラメータの更新を行う。この繰り返しによって、環境から得られる累積報酬 R_t を最大にする学習を行う。

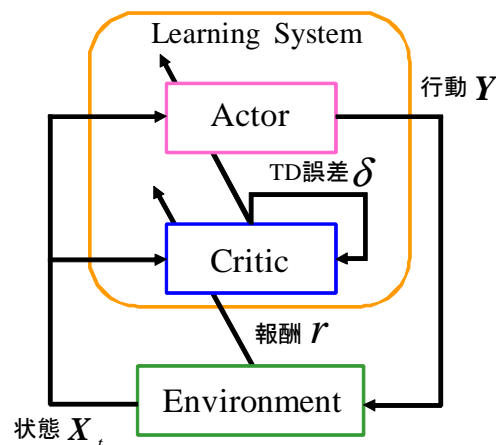


図 A.1: Actor-Critic

A.2 連続空間の構成

連続空間の構成は，図 A.2 に示す GRBF を用いる．RBF とは，関数の中心を表わすパラメータを持ち，状態入力とその中心との距離によって値が決まる関数である．ここでは，関数としてガウス関数を用いるため GRBF と定義する．状態量を X_t を用いることで，(A.1) 式，(A.2) 式のように特徴ベクトル X_{vt} を表わすことができる．

$$X_{vt} = \exp(-X_t - c)^T D (X_t - c) \quad (\text{A.1})$$

$$D = \text{Diag}.\left(\frac{1}{2d}\right) \quad (\text{A.2})$$

ここで， c は関数の中心位置を表わすベクトルであり，ガウス関数の平均に相当するものである．また， D は関数が補間する範囲を表わすものであり，分散に相当するものであり，パラメータ d によって決定する．このように補間することで，強化学習における連続空間を表現することができる．

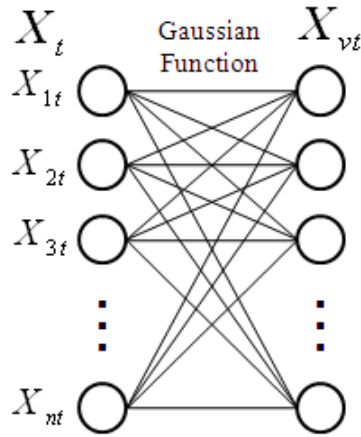


図 A.2: GRBF

A.3 連続空間における Actor-Critic 法

特徴ベクトル X_{vt} を用いて、状態を評価する状態価値関数 $V(X_t)$ は (A.3) 式のように表わされる．

$$V(X_t) = \sum_i^n w X_{vt} \quad (A.3)$$

ここで、 w は Critic の重み関数ベクトルである．この計算によって、今の状態を評価し、前の状態の評価値と比較し、更新パラメータとなる TD 誤差 δ を (A.4) 式によって算出する．

$$\delta = r_t + \gamma V(X_{t+1}) - V(X_t) \quad (A.4)$$

r_t は環境から得た報酬、 γ は割引率、 $V(X_{t+1})$ は現在の状態価値関数、 $V(X_t)$ は前の状態における状態価値関数である．報酬 r_t は、設計者が任意に設定することが可能である．この TD 誤差 δ を用いて、Actor と Critic をそれぞれ更新する．Critic の重み関数の更新は、勾配法を用いて (A.5) 式のように行う．

$$w \leftarrow w + \alpha \delta \frac{\partial V(X_t)}{\partial w} \quad (A.5)$$

ここで、 α は Critic の学習率である．

Actor の出力 Y は、特徴ベクトルを用いて (A.6) 式、(A.7) 式によって決定される．

$$Y = (Y_{\max} - Y_{\min}) f(\mu + \sigma n) + Y_{\min} \quad (A.6)$$

$$\mu = \sum_i^n v X_{vt} \quad (A.7)$$

ここで、 Y_{\min} 、 Y_{\max} は出力（行動）の最小値、最大値、 f はシグモイド関数、 σn は探索ノイズ、 v は Actor の重み関数である．探索ノイズ n には白色雑音を用いる． v と特徴ベクトル X_{vt} によって導出される μ が出力に大きく依存する部分であり、このパラメータが最適となれば、出力が最適になるといえる．Actor の重み関数 v を Critic のときと同様に、勾配法を用いて (A.8) 式のように行う．

$$v \leftarrow v + \beta \delta \frac{\partial V(X_t)}{\partial v} \quad (A.8)$$

ここで、 β は Actor の学習率である．

このアルゴリズムの繰り返しによって、Actor が報酬に基づく最適な出力を学習することが可能である．

第 A 章 結言

本論文で提案した制御系への学習の適用例を図 A.3 に示す．図 A.3 は，機械剛性の剛性楕円パラメータを学習するという設定の学習モデルである．タスクに対して学習することで，そのタスクに適切な剛性の学習が可能であると期待される．本システムは，1-Link 腱駆動機構に対して適用し，手法の有効性は示している（目録 (2) 参照）．

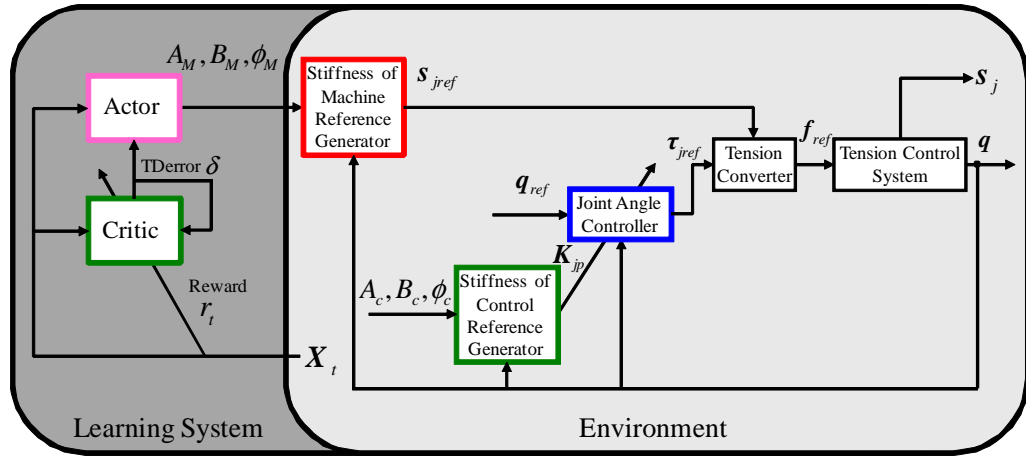


図 A.3: 学習モデル

論文目録

- (1) 奥村文博，駒田諭，平井淳之：「強化学習を用いた腱駆動機構の関節剛性の獲得」，平成 21 年電気学会産業応用部門大会ヤングエンジニアポスターコンペティション講演論文集，Y-64(2009.9)
- (2) 奥村文博，駒田諭，平井淳之：「衝撃的外力に対する腱駆動機構の適切な関節剛性の獲得」，平成 21 年電気関係学会東海支部連合大会講演論文集，O-329(2009.9)
- (3) 奥村文博，駒田諭，平井淳之：「関節剛性可変アームの剛性橢円制御」，第 11 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会，1L1-2，pp. 735–738(2010.12)
- (4) 奥村文博，駒田諭，平井淳之：「非線形バネを用いた腱駆動機構の剛性橢円制御」，電気学会研究会資料 産業計測制御研究会，IIC-11-021(2011.3 発表予定)