

複写可

平成20年度 修士学位論文

受動要素を利用したロボットの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

和阪 学弘



目次

第1章 緒言.....	1
1.1 はじめに.....	1
1.2 研究目的 位置づけ.....	3
第2章 指のパワーアシスト.....	4
2.1 手指関節.....	4
2.1.1 手指関節の動き.....	4
2.1.2 手指関節の筋肉の配置.....	4
2.1.3 筋の力学的性質.....	4
2.2 指のパワーアシスト.....	7
2.3 人間の筋骨格特性.....	9
第3章 インピーダンス制御のモデル化.....	11
3.1 インピーダンス制御.....	11
3.2 位置制御ベースと力制御ベース.....	11
3.3 回転系のインピーダンス制御のモデル化.....	12
3.3.1 従来の回転系のインピーダンス制御.....	12
3.3.2 提案する回転系のインピーダンス制御.....	15
3.4 並進系のインピーダンス制御のモデル化.....	17
3.4.1 従来のインピーダンス制御.....	17
3.4.2 提案するインピーダンス制御.....	19
第4章 シミュレーションによる解析.....	21
4.1 安定性のシミュレーション.....	21
4.1.1 安定性とは.....	21
4.1.2 ラウス・フルビッツの安定判別方法.....	22
4.2 目標値誤差のシミュレーション.....	23
4.2.1 目標値誤差.....	23
4.2.2 シミュレーション方法.....	23
4.2.3 シミュレーション結果.....	25
4.2.4 考察.....	33
第5章 結言.....	34
参考文献.....	35
謝辞.....	36

第1章

緒言

1.1 はじめに

パワーアシスト代表される人間支援機器は建設、流通、家庭、オフィスなどにおいて活躍が期待されている。その中でも、ロボットにより人を介護する方法が注目されている。なぜなら、現在の日本は少子化に伴い更なる超高齢化社会になると予想されているため介護に関わる負担は深刻な問題となる。被介護者が介護者の手を借りずに自立行動を行えることは介護者、被介護者双方の負担の軽減、生活の質の向上につながると考える。

現在装着型パワーアシストとして期待されているのが、ロボットスーツである。Fig.1.1で示しているロボットスーツは⁽¹⁾、例えば車椅子生活を余儀なくされている人の歩行をサポートするのに役立つ。筋肉が衰えた高齢者も重たい荷物を軽々と持てるようになり。筋肉の衰えや脊髄損傷などによって身体の機能不全を来した装着者の動作を支援するのに役立つロボットである。この場合、人間が装置を装着するので、自分の意思どおりにロボットが協調作業できるかが重要となってくる。

人間とロボットの協調作業時におけるロボットの制御方法としては、インピーダンス制御が広く利用されている。しかし、インピーダンス制御を適用する場合、制御系を簡単に構成することができるが、制御系の遅れにより、剛性の高い物体に接触すると不安定になることがある^{(2),(3)}。また、操作性を良くするために制御系のインピーダンスを下げると、不安定性はさらに増すことが知られている。

そこで、この問題を解消するために、従来の位置制御ベースのインピーダンス制御よりも安定で操作性の良い制御システムが構築できることを示す。

本研究では、指のパワーアシストシステムを例に考える。主に、日本で発生する指の障害は、交通事故などが原因で指を曲げることができるが、伸ばすことができないといった障害を持った患者が多く発生しているからである。Fig.1.2に示すような従来の指の装具は、指に対して機構が大きいために、大型の機器になってしまうものや、バネなどを使い、指を引っ張ることができる装具が使われてきた。バネを使った場合は、バネで指を引っ張って伸ばすことができるが、曲げるときにはバネが逆に抵抗となる構造になってしまう。これでは、指を伸ばすときはいいが、指を曲げるときには負担がかかり、細かい作業がしにくい構造となっている。そこで、我々は、この構造に制御システムを加えることで問題を解決することができると考え、制御システムについて研究することにした。また、最適な制御システムが開発することができれば、将来的には複雑な機構を省略することができ、機器は小型化することができると思う。

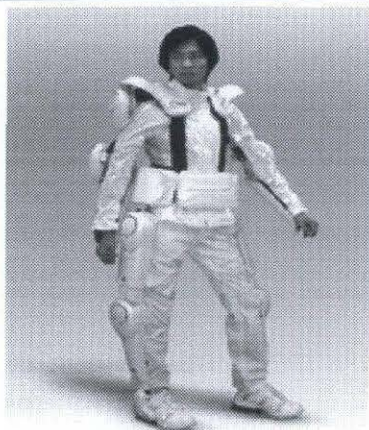
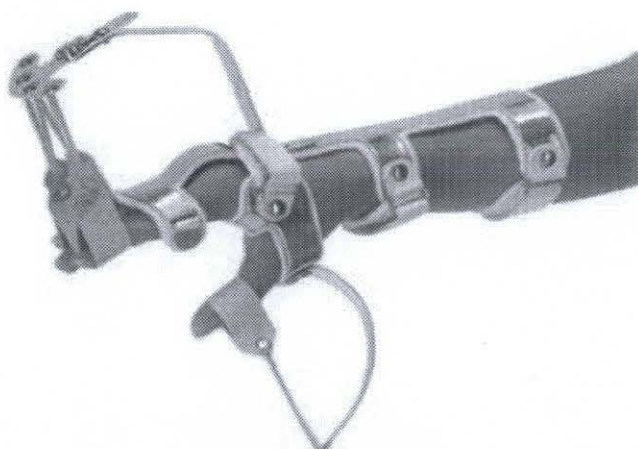
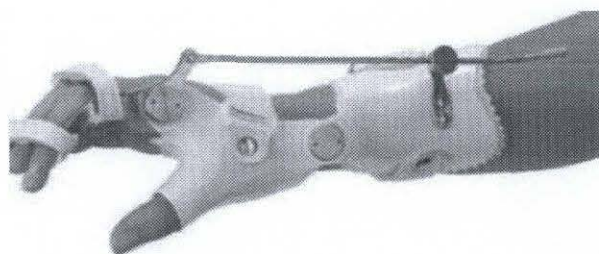


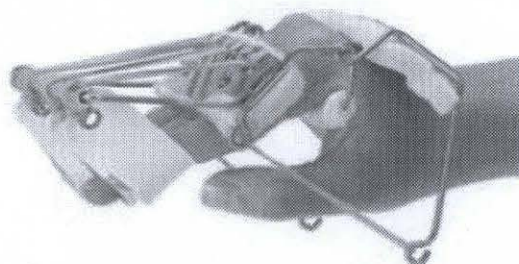
Fig.1.1 Robot suit



(a) Dynamic splint



(b) Engen model



(c) Knuckle bender



(d) Mallet finger splint

Fig.1.2 An example of upper extremity orthosis (splint)

1.2 研究目的 位置づけ

本研究の目標は、神経・筋肉などの疾患から、指を曲げる動作（屈曲）をする能力は残っているが、指を伸ばす動作（伸展）機能は失ってしまっている患者のための指のパワーアシストを開発することである。これにより、使用者の快適性の向上、装置の小型化ができると考えている。具体的に本研究では、インピーダンス制御系の検討を行う。

以前より、人間の指のパワーアシストの研究は行われている。その中の例をいくつかあげる。

中沢らは、人間の手の構造を解析し、その機構を模範することでロボットが人間に近い動作機能が持つと、考え二本の指でコップを把持した場合の関節に対するモーメントを加え、各関節の機能的な指関節のインピーダンス特性について調べた⁽⁴⁾が、あくまでも測定しただけであって、設計の段階まではいったっていない。

上肢の装着型のパワーアシストの研究について田口らは、患者の腱の動作を模倣する機構を用いたパワーアシストグローブの開発を行い、リハビリテーション医療に適用する可能性や、筋力の衰える疾患の医療器具として使用できる可能性を示した⁽⁵⁾が、装置の大型が問題となり凡庸性にはかける。

小林らは、自力動作が困難な人が意思により動作が可能にすることを目的に肩部から上腕部に掛けて、エンコーダ等を用いて、肩関節の動きである腕の外転、屈曲等の動きを検出し、動作角度とアクチュエータの供給圧力の関係を階段型3層 NN を用いてバックプロバケーション法により学習をさせている⁽⁶⁾が、持ち運んでできるような大きさではないので、手軽にリハビリすることができないといった問題点がある。

内野らは、非介助者が人の手を借りずに自立行動を行うために、訓練を必要としない、感覚的にロボットハンドを操作することが可能なハプティックデバイスを用いたマスタースレーブハンドシステムの開発を行っている⁽⁷⁾が、機構的な影響を受けるような機器になっている。

手指のリハビリテーション機器の研究として、川崎らは、手指のリハビリテーション支援システムの研究として、PIP 関節の屈折・伸展、MP 関節の屈折・伸展、内外転動作を各ごとに補助できるデバイスを開発し、患者の健側動作を患側に再現するように動作補助を与える方法を行った。鍵握み動作については、有効な結果が得られた⁽⁸⁾が、対立握みの再現や指が硬い患者に対して高出力のデバイスが必要であるという問題点が明らかになっている。

以上のことから、本研究は指の残存機能を応用している点やインピーダンス制御を応用した手法など従来にはない研究となっており、今後の応用・発展につながると考える。

第2章

指のパワーアシスト

2.1 手指関節

2.1.1 手指関節の動き

人間の手指関節は、骨・関節の柱は筋腱系の円滑な動きによりきわめて多彩な動きを示す。手指関節の構造は、拇指・示指・中指・環指・小指の5指に分離して存在している。手指の基本的な動きは、母指を除く他指関節の動きは、屈曲・伸展・内転・外転・内旋・外旋・対立・復立・分回に分類される。また、拇指は他の手指関節とは違い、手掌より外側・掌側にそれぞれ約 30° の傾きと 45° の手掌側に向く内旋位にある。

2.1.2 手指関節の筋肉の配置

Fig.2.1⁽⁹⁾は人間の右前腕の筋を示している。人間の手や指を動かす筋は屈筋群と伸筋群に区別される。これらの筋の筋腹は細長く、前腕腕の伸側と屈側でそれぞれ2つの筋層をなして走っている。そのうちの1層の筋は手全体を動かすものであり、もう1層は個々の指を動かすものである。

すべての屈筋群と伸筋群は上腕の遠位部あるいは前腕からおこり、細長い腱となって手や指に停止する。もし、これらの筋の筋腹が手にあたれば、手の容積が増大して手の細かい運動ができなくなる。

屈筋の腱も伸筋の腱も、一種のガイドレールを走っており、支帯と呼ばれる靭帯によってそれぞれの場所に保持されている。手関節を屈曲・伸展させて手を動かす筋は6つある。一部の筋は上腕から起こり、手関節を越えて中手骨に停止する。筋の走行と停止の具合によって、これらの筋は手を背側や掌側に伸展したり屈曲したりできる。

これより、人間の手関節と手部の動きに関連している筋肉は多数あることがわかる。基本的に、前腕と手部の前面にある筋肉は、屈曲に動き、後面にある筋肉は、伸展に動いていることがわかる。

2.1.3 筋の力学的性質

一般に、屈筋・伸筋をとともに弛緩させれば、関節は柔らかくなり、外部から自由に動かせる（インピーダンスが小さい）。逆に、屈筋・伸筋を同時に収縮させて、関節を非常

に固くすることもできる（インピーダンスが大きい）。一方，屈筋・伸筋の収縮力の差が関節の駆動トルクになる。このことは同じ駆動トルクを得ながら，筋の収縮レベルを変えることで，関節まわりの粘弾性特性を自由に調節できることを意味する。しかも，ロボットの関節サポートとは違ってフィードバックによらない。次に，この筋の可変粘弾性について考える。

筋収縮の力学的特性は，マクロ的には張力—長さ曲線，力—速度曲線という2つの基本関係で表わされることがよく知られている。Fig.2.2 に，等尺性収縮時（筋長一定）における張力—長さ関係を示す。生体長（生体内で，関係を中位にしたときの筋長）を100%として，種々の長さにおける張力を測定した結果である。筋が長くなるにつれて，張力が増加するという弾性特性が筋に備わっていることがわかる。さらに，Fig.の破線で示すように，張力は筋活動レベル α が増加するにつれて大きくなるとともに，その傾きも急になる。

一方，Fig.2.3 は，種々の筋活動レベルにおける力—速度関係である。筋力は，筋の短縮速度に反比例して減少しており，粘性特性を表している。また，Fig.の破線からわかるように，筋力は筋活動レベルに比例して増加し，その傾きも急になる。Fig.2.4 は，Fig.2.2, Fig.2.3 の関係を3次元的に表したものである。ただし，最大随意収縮（ $\alpha=1$ ）における筋力—筋長—短縮速度の関係であり， α が1より小さい場合は，Fig.の実線の内側に類似の関係が現れることになる。

これらの生理学的知見は，筋の収縮特性のマクロな特徴を浮き彫りにしている。すなわち，筋は，単なる力発生器として働くだけでなく，粘弾性要素の性質を備えていることがわかる。⁽¹⁰⁾

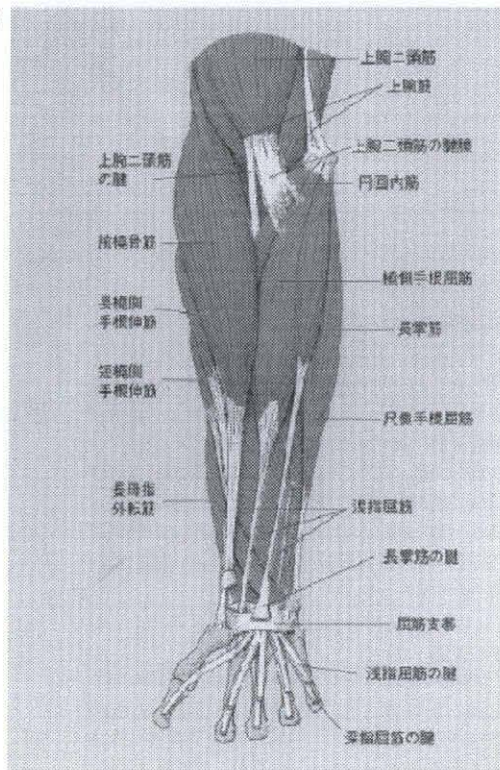


Fig.2.1 The line of the right forearm

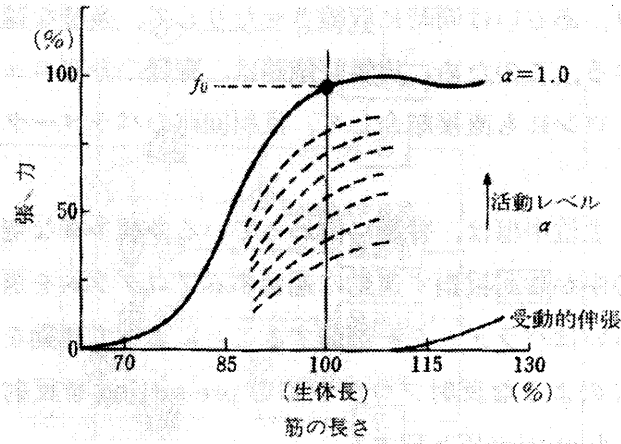


Fig.2.2 Tension-length relations

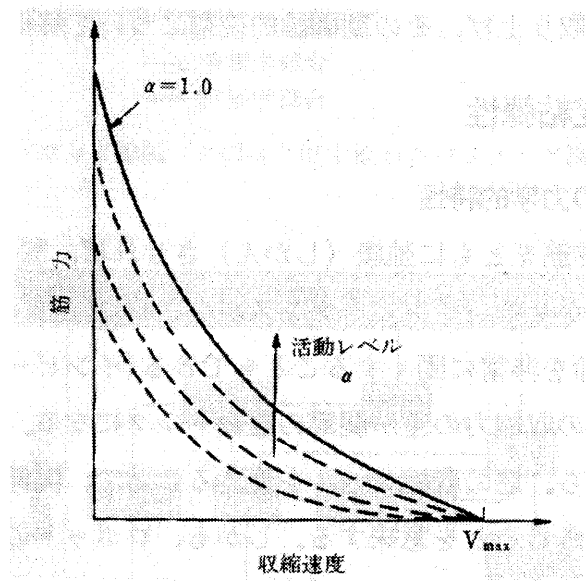


Fig.2.3 Power-speed relations

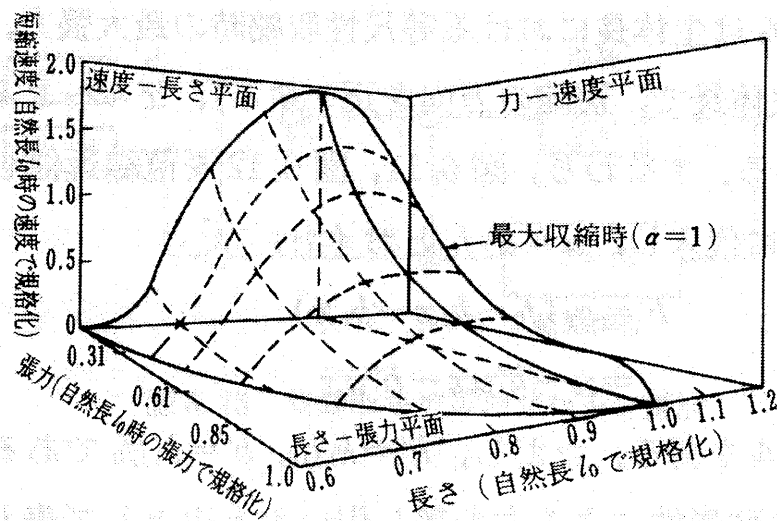


Fig.2.4 The three-dimensional indication of the muscular contraction characteristic

2.2 指のパワーアシスト

Fig.2.5 のように、人間の指は主に、伸ばす筋肉と、曲げる筋肉の二つの筋肉により駆動しているが、Fig.2.6 のように、もし事故などで片方の伸ばす筋肉が損傷した場合、その筋肉を人間支援機器などで補う必要がある。そこで、従来の損傷してしまった筋肉を伸ばすための装具を Fig.2.7 に示す。この従来のままでは、バネの位置が固定されているため、指を曲げる時に大きな力が必要となる。よって、指を使う用途によってバネの位置を変化させなければならない。そこで、筋肉の粘弾性特性が筋力により変化することを利用し、Fig.2.8 の様に、可変パラメータのインピーダンス制御により、損傷した筋肉を補うことを考える。Fig.2.9 に、従来のインピーダンス制御を組み込んだパワーアシストシステムを示す。従来では、堅いものを把持したときなど、環境の剛性が大きくなるとアクチュエータの応答遅れにより、システムが不安定になる。安定にするためには、アシストシステムの粘性をあげる必要があるが、操作性が低下する。そこで、Fig.2.10 に示すように、受動要素を組み込むことにより、システムを安定にしつつ、操作性を向上するための制御手法を提案する。

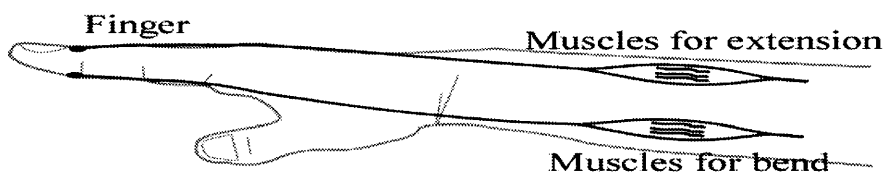


Fig.2.5 The drive system of fingers

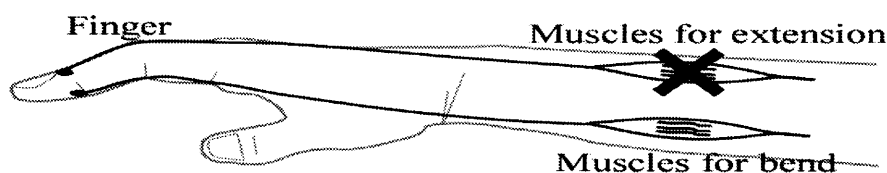


Fig.2.6 The drive system with no working muscle

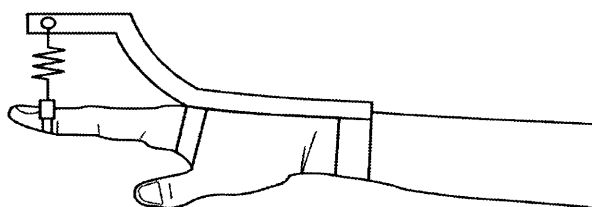


Fig.2.7 Usual tool for extending the



Fig.2.8 Model of an assist system of the finger by using impedance control

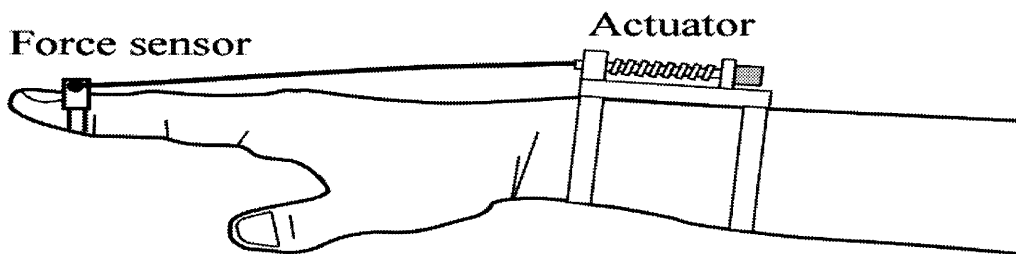


Fig.2.9 Usual impedance control method

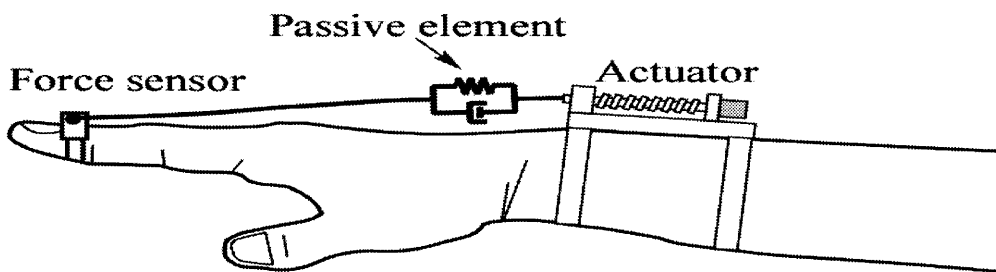


Fig.2.10 Proposed impedance control method with the passive elements

2.3 人間の筋骨格特性

はじめに、人間の筋骨格特性として腕を例にとる。人間の腕は筋肉と骨から構成される筋骨格系である。1つの関節につき、それを動作させる筋肉は最低2つあり、それ以外に、2つの関節を同時に駆動する筋肉も存在する。そのため、筋骨格モデルを構築するには大変な努力が必要である。近年では、デジタルヒューマン⁽¹¹⁾に代表されるように、人間のモデル化もされるようになってきた。たとえば、長谷らの研究では、人間の筋骨格モデルを用いて、人間の歩行シミュレーションができるようになってきている⁽¹²⁾。

ここでは簡単のため、肘周りの1自由度について筋骨格系を見る。肘から先の前腕は大きく分けて上腕二頭筋と上腕三頭筋の2つの筋肉から駆動されている。筋肉の特性については、さまざまに研究されているが、もっとも簡潔に表わされているものとして、式(2.1)に示す伊藤らのモデル⁽¹³⁾がある。

$$F = u - kux - bu\dot{x} \quad (2.1)$$

ここで、 F は筋により前腕を駆動する力、 u は筋自体の発生力、 x 筋の長さ、 k および b 定数である。式(2.1)より、筋全体の剛性は ku 、粘性は bu であり、それぞれ筋力に比例する非線形システムであることがわかる。Fig.2.11は、肘周りの筋骨格1自由度モデルを示したものである。ここで、 I は前腕の慣性モーメント、 θ は肘の回転速度であり肘を曲げる方向を正とする。また、添え字の f は上腕二頭筋に関するパラメータ、添え字の e は上腕三頭筋に関するパラメータを表す。肘周りの運動方程式は、

$$I\ddot{\theta} = d(F_f - F_e) \quad (2.2)$$

となる。ここで、 d は筋力が関節に作用するモーメント長さを示す。式(2.1)及び筋の長さと回転角度との関係、

$$d\theta = x_f = -x_e \quad (2.3)$$

を考慮すると式(2.4)は、

$$\frac{I\ddot{\theta}}{d} = u_f - u_e - d(k_f u_f + k_e u_e)\theta - d(b_f u_f + b_e u_e)\dot{\theta} \quad (2.4)$$

となる。ここでは、 $k_f = k_e = k$ 、 $b_f = b_e = b$ とすると、式(2.5)は、

$$\frac{I\ddot{\theta}}{d} = u_f - u_e - d(k_f u_f + k_e u_e)\theta - d(k\theta + b\dot{\theta})\dot{\theta} \quad (2.5)$$

で表わすことができる. 式(2.5)右辺の第1項($u_f + u_e$)は筋力の差を表しており, 前腕の駆動トルクとなる. 右辺第2項($d(k_f u_f + k_e u_e)\theta$)は, 前腕を駆動するさいの抵抗力となるものであり, その剛性, 粘性は筋力の和($u_f + u_e$)に比例して変化する. 特に, 式(2.5)のような形のシステムは双線形システムと呼ばれている.

以上からわかるように人間の腕は, 慣性, 剛性, 粘性特性をもつインピーダンスモデルで表現でき, 剛性と粘性が筋力に応じて変化する可変粘弾性特性を有している. 特に, 剛性の変化と同時に粘性も変化することはシステムの安定性の上でも重要な特性である. もし, 剛性のみが高くなればシステムの安定性は低下し, 上位中枢による高度な制御が必要となる. それは, 脳などの神経系に大きな負担をかけることになる. 剛性の増加に伴い粘性も増加する人間の筋骨格システムは脳などの高次システムに負担をかけない特性が備わっていると言える.

これは, 指にも関係していると考えられる.

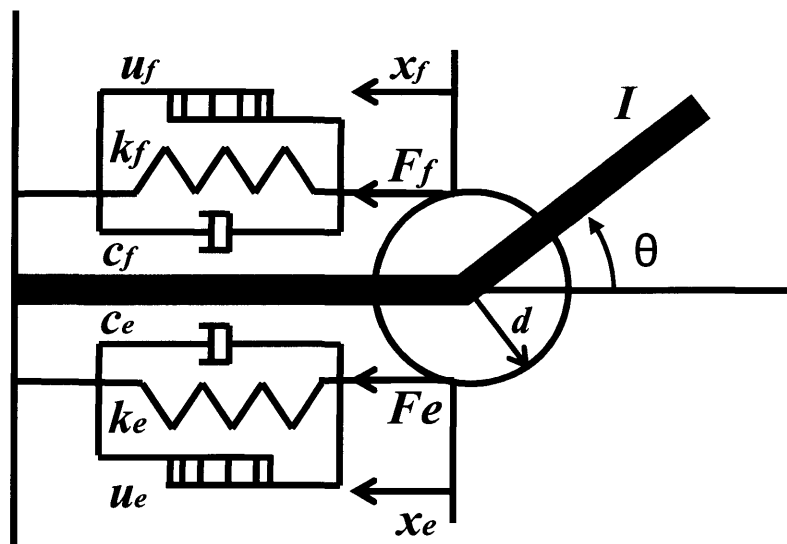


Fig.2.1 1 Muscles and bones model of the human elbow rotation

第3章

インピーダンス制御のモデル化

3.1 インピーダンス制御

インピーダンス制御とは効果器の外力に対する機械インピーダンスを、目的とする作業遂行に都合の良いように設定することによって位置及び力を制御する方法である。この方法はさらに、受動インピーダンス法と能動インピーダンス法に分けられる。受動インピーダンス法とは、バネ、ダンパなどの機械的要素のみによって手先効果的の機械インピーダンスを望ましいものに設定する方法である。また能動インピーダンス法とは、手先効果器の位置、速度、力などの測定値をフィードバックしてアクチュエータを駆動することにより、結果として得られる機械インピーダンスを望ましいものに設定する方法である。本研究では、受動インピーダンス法を用いて研究する。

3.2 位置制御ベースと力制御ベース

ロボットの力制御法には次の二つがあげられる。Fig.3.1 は位置制御をベースにしたロボットと人間との協調を表したブロック図である。ここで、 R 、 H はそれぞれ、ロボットおよび人間の伝達関数である。なお、Fig.3.1 は人間とロボットが直接、力を及ぼしあった場合を示している。人間とロボットが物体を強調して運ぶ場合には物体の慣性力が作用し、ロボットが物体を把持する伝達関数などが必要である。ここでは、簡単にするため、人間とロボットが直接力を及ぼし合う場合限定して話を進める。さて、位置制御ベースの力制御法では外力を受けることにより目標位置を変更し位置制御をするので、ロボットの入力力は力であり、出力は位置となる..

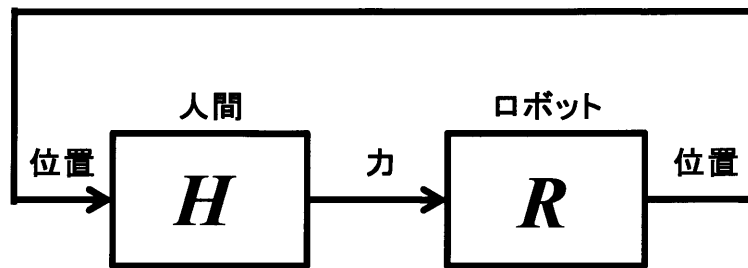


Fig.3.1 The positioning base robot and a human cooperation system

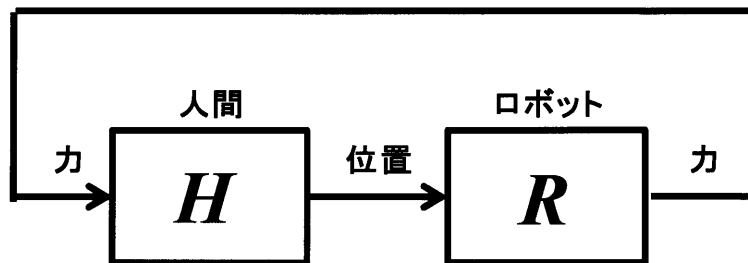


Fig.3.2 The force control base robot and a human cooperation system

3.3 回転系のインピーダンス制御のモデル化

3.3.1 従来の回転系のインピーダンス制御

Fig. 3.3 は回転系の従来のインピーダンス制御のモデルを示す。

壁に接している物は指を見立てており，円柱の形をしている．質量は m_e で重力を考えないものとする．

N は外から加えられた力， θ_d は指先の目標位置， m_d, c_d, k_d はインピーダンス制御における設定したい質量 [kg]，粘性 [N·s/m]，剛性 [N/m] を示す．

位置制御をベースとした回転系の目標インピーダンス制御は，次式で表わすことができる．

$$N = J_d \ddot{\theta}_d + c_d h^2 \dot{\theta}_d + k_d h^2 \theta_d \quad (3.1)$$

$$N = J_d \ddot{\theta}_d + \zeta_d \dot{\theta}_d + \kappa_d \theta_d \quad (\zeta_d = c_d h^2 \quad \kappa_d = k_d h^2) \quad (3.2)$$

$$T\ddot{\theta} + \theta = \theta_d \quad (3.3)$$

式(3.2)は Fig.3.3 におけるモーメントの式であり，以後， $\zeta = ch^2$ $\kappa = kh^2$ と表す．式

(3.3)は、位置 θ_d を目標に、実位置 θ を制御する位置制御を示す。ここでは、位置制御の特性を簡単に時定数 T の一次遅れとした。

Fig.3.3 にある H は環境のインピーダンスを示す。環境のインピーダンスとは、対象となる壁や筋肉などの外部環境を示す。式(3.4)は環境インピーダンスが指に及ぼすモーメント N_e を示す。

$$N_e = J_e \ddot{\theta}_e + \zeta_e \dot{\theta}_e + \kappa_e \theta_e \quad (3.4)$$

目標のバネ・ダンパーにかかるモーメントは、次の式(3.5)で表わされる。

$$N = N' - N_e \quad (3.5)$$

ここで示す N' は外力のことである。

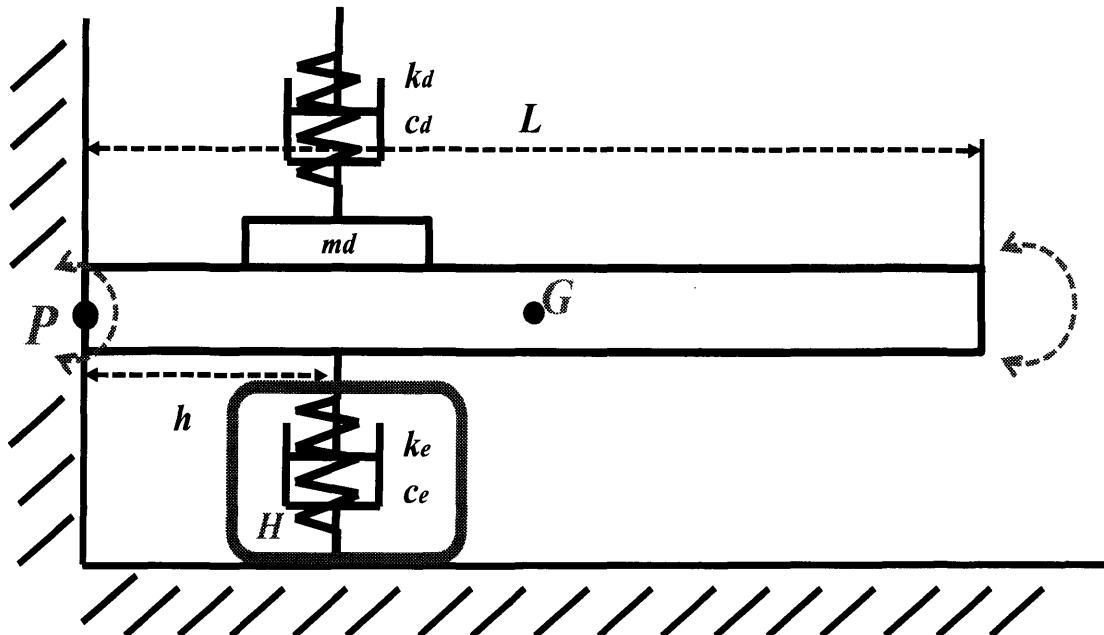
Fig.3.4 の伝達関数は以下のように表される

$$P_I = \frac{1}{J_d s^2 + \zeta_d s + \kappa_d} \quad (3.6)$$

$$P_c = \frac{1}{1 + Ts} \quad (3.7)$$

$$H = J_e s^2 + \zeta_e s + \kappa_e \quad (3.8)$$

ここで、 m_e , c_e , k_e は環境のインピーダンス特性、質量 [kg]、粘性 [N·s/m]、剛性 [N/m] を示す。位置制御ベースのインピーダンス制御では、 H で発生した力が加わることにより、実位置 x を目標位置 x_d に制御する位置制御である。



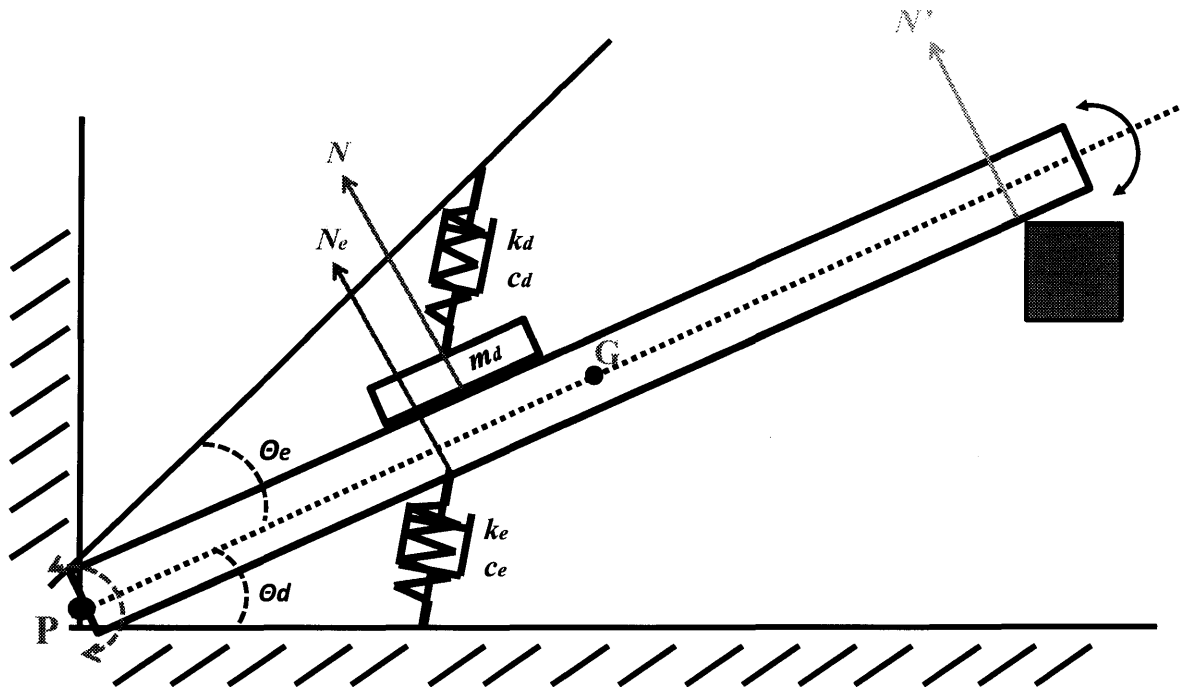


Fig.3.3 Impedance control model

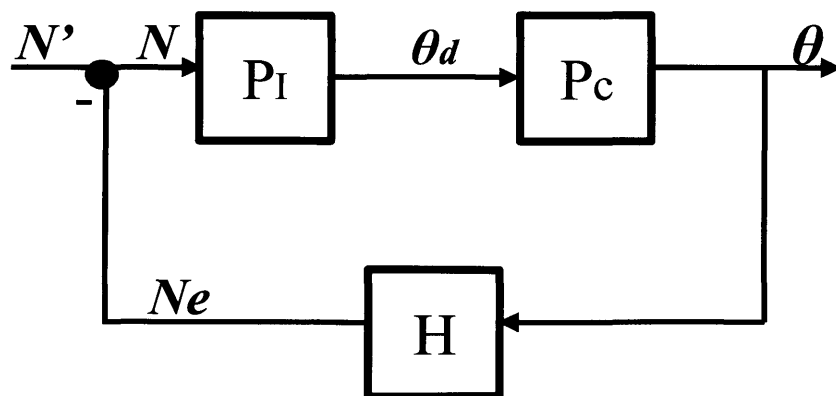


Fig.3.4 Impedance control block diagram

3.3.2 提案する回転系のインピーダンス制御

新しく提案する受動要素を利用したインピーダンス制御系を Fig.3.5 より説明する. 受動要素にかかるモーメントは, 質量 m_o , ダンパ c_o , ばね k_o により, 質量 m_o の変位 θ_d が変化する. このとき, モーメント力 N_o と変位 θ_d の関係は, 次式で表される.

$$N_o = \zeta_o(\dot{\theta}'_d - \dot{\theta}_d) + \zeta_o(\theta'_d - \theta_d) \quad (3.9)$$

そこから導き出せる運動方程式を次の式(3.10)に示す

$$J_p \ddot{\theta}'_d = N_o + N \quad (3.10)$$

よって, 式(3.10)に式(3.9)を代入すると

$$J_p \ddot{\theta}'_d + \zeta_o(\dot{\theta}'_d - \dot{\theta}_d) + \kappa_o(\theta_d - \theta'_d) = N \quad (3.11)$$

となる. P 点周りの慣性モーメントは式(3.12)の J_p で表わされる.

$$J_e = \frac{L^2}{12} m_e$$

$$J_p = J_e + m_e(PG) \quad (3.12)$$

Fig.3.6 に提案するインピーダンス制御のブロック線図を示す.

$$P_f = \frac{J_p s^2 + \zeta_o s + \kappa_o}{\zeta_o s + \kappa_o} \quad (3.13)$$

$$P_o = \frac{1}{c_o s + k_o} \quad (3.14)$$

回転系の場合, 固いものにあたった場合 θ が微小になることから並進系で考えることができる. そうすることにより, 式も簡潔化できよりシミュレーションが簡単になると考える.

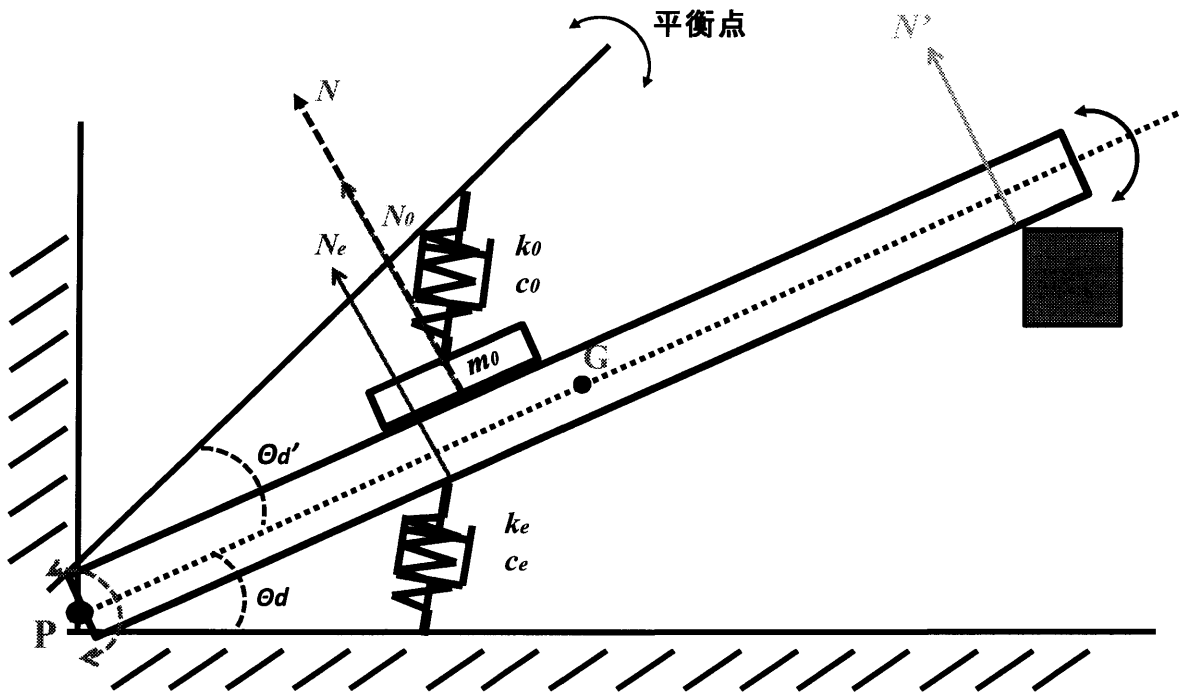


Fig.3.5 Impedance control model of proposed method

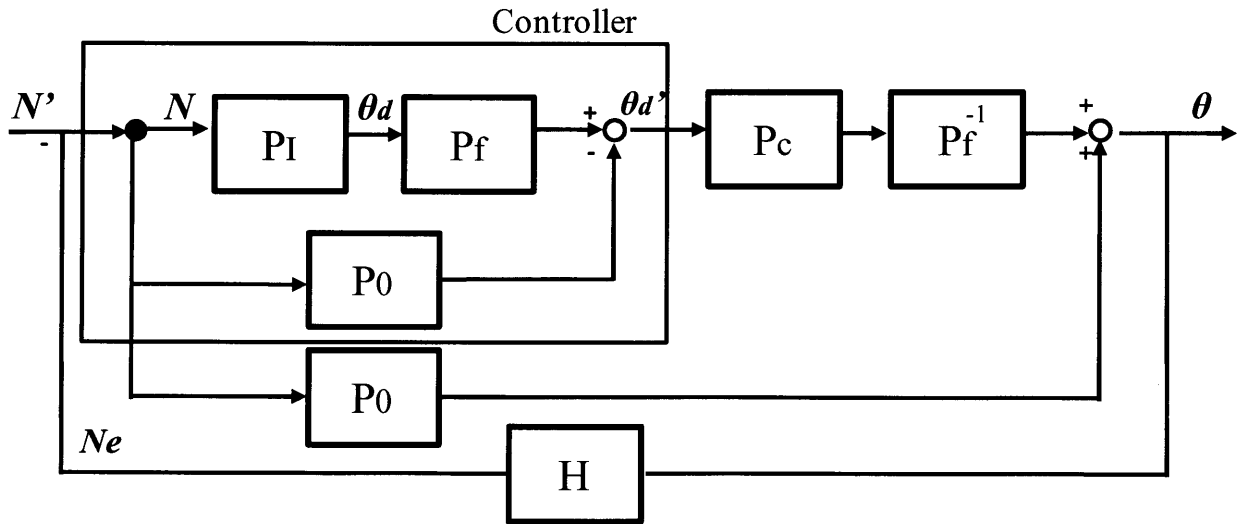


Fig.3.6 Block diagram of the proposed impedance control model

3.4 並進系のインピーダンス制御のモデル化

3.4.1 従来のインピーダンス制御

Fig.3.7 は並進系のインピーダンス制御のモデルを示す。

ただし、 f は指先から加えられた力、 x_d は指先の目標位置、 m_d 、 c_d 、 k_d はインピーダンス制御における設定したい質量 [kg]、粘性 [N·s/m]、剛性 [N/m] を示す。

従来の位置制御をベースとした並進系のインピーダンス制御は、次式で表すことができる。

$$f = m_d \ddot{x}_d + c_d \dot{x}_d + k_d x_d \quad (3.15)$$

$$T\dot{x} + x = x_d \quad (3.16)$$

式(3.15)は Fig.3.7 における運動方程式であり、式(3.16)は、位置 x_d を目標に、実位置 x を制御する位置制御を示す。ここでは、位置制御の特性を簡単に時定数 T の一次遅れとした。

Fig.3.8 は位置制御ベースのインピーダンス制御におけるブロック線図を示す。ここで、 H は環境のインピーダンスを示す。環境のインピーダンスとは、対象となる壁や筋肉などの外部環境を示す。

Fig.3.8 の伝達関数は以下のように表される。

$$P_l = \frac{1}{m_d s^2 + c_d s + k_d} \quad (3.17)$$

$$P_c = \frac{1}{1 + Ts} \quad (3.18)$$

$$H = m_e s^2 + c_e s + k_e \quad (3.19)$$

ここで、 m_e 、 c_e 、 k_e は環境のインピーダンス特性、質量 [kg]、粘性 [N·s/m]、剛性 [N/m] を示す。位置制御ベースのインピーダンス制御では、 H で発生した力が加わることにより、実位置 x を目標位置 x_d に制御する位置制御である。Fig.3.8 で示したブロック線図の伝達関数の安定条件から、時定数 T の関係式を求めると、剛性 k_e が大きくなると T を小さくする必要がある。そのため、位置制御ベースのインピーダンス制御を用

いた場合、物体などに接触し、剛性 k_e が大きくなるとシステムが不安定になりやすい。また、 c_d を大きくすると、 T を効果的に大きくすることが分かっているが、操作性が低下するといった問題が生じる⁽¹⁴⁾。

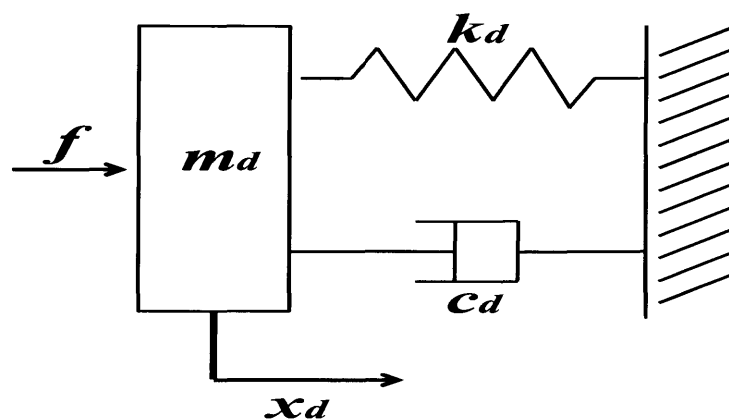


Fig.3.7 Impedance control model

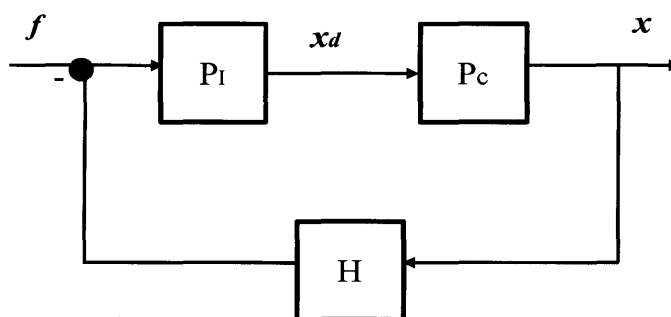


Fig.3.8 Impedance control block diagram

3.4.2 提案するインピーダンス制御

新しく提案する受動要素を利用したインピーダンス制御系を Fig.3.9 より説明する。外力 f が加えられると、付加された受動要素、質量 m_0 、ダンパ c_0 、ばね k_0 により、質量 m_0 の変位 x が変化する。このとき、力 f と変位 x との関係は、次式で表される。

$$m_0\ddot{x} + c_0(\dot{x} - \dot{x}_d') + k_0(x - x_d') = f \quad (3.20)$$

ここで、 x_d' [m] はばね、ダンパの受動要素の取り付け位置を表す。本提案手法では、力 f と変位 x の関係を式(1)となるように、受動要素取り付け位置 x_d' を修正する。そのため、力 f と式(1)から質量 m_0 の目標位置 x_d を計算し、次式より、受動要素取り付け位置の目標位置 x_d' を計算し、 x_d' に基づいて受動要素取り付け位置を位置制御する。

$$m_0\ddot{x}_d + c_0(\dot{x}_d - \dot{x}_d') + k_0(x_d - x_d') = f \quad (3.21)$$

Fig.3.10 に提案するインピーダンス制御のブロック線図を示す。

式(3.22)は式(3.21)をラプラス変換したものである。ここで示す、 P_f P_o はそれぞれの X_d' F の項にあたり、式(3.23) 式(3.24)であらわされる。

$$X = \frac{(c_0s + k_0)}{(m_0s^2 + c_0s + k_0)} X_d' + \frac{1}{(m_0s^2 + c_0s + k_0)} F \quad (3.22)$$

$$P_f = \frac{m_0s^2 + c_0s + k_0}{c_0s + k_0} \quad (3.23)$$

$$P_o = \frac{1}{c_0s + k_0} \quad (3.24)$$

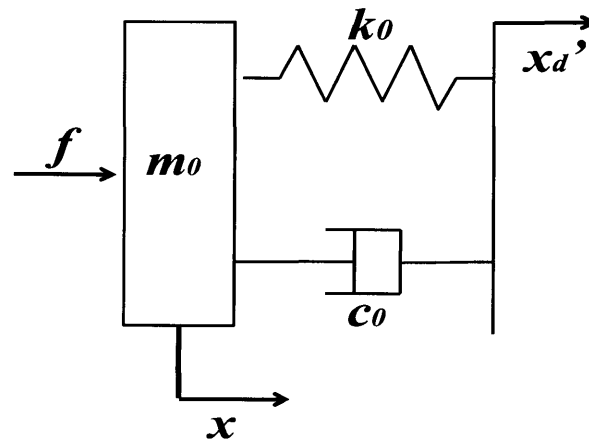


Fig.3.9 Impedance control model of proposed method

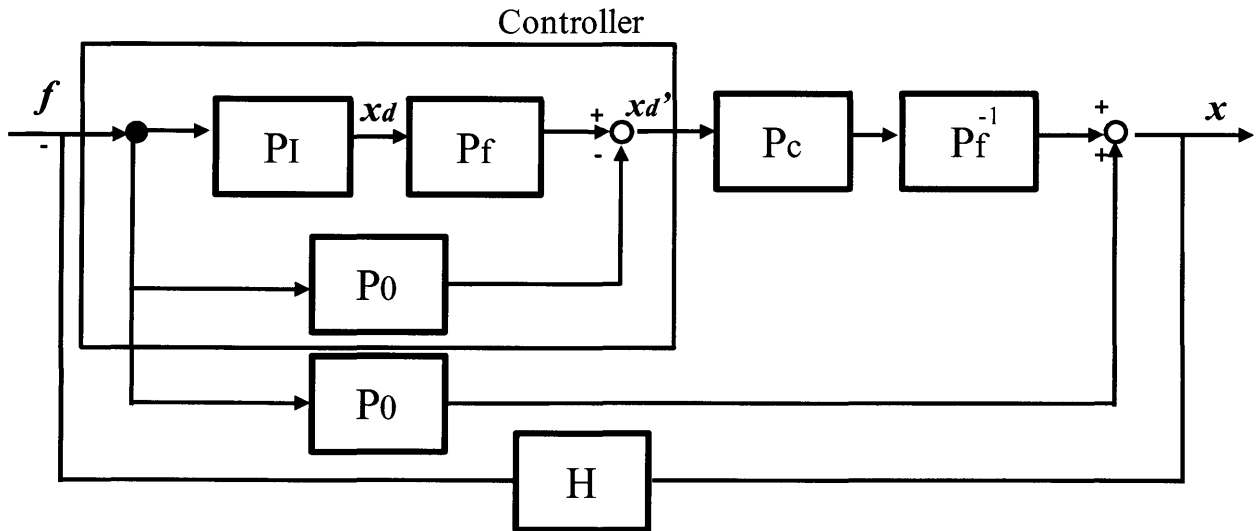


Fig.3.10 Block diagram of the proposed impedance control model

第4章

シミュレーションによる解析

4.1 安定性のシミュレーション

4.1.1 安定性とは

Fig.4.1 のようなシステムに任意の有界な入力 $u(t)$ を加えたとき、出力 $y(t)$ もやはり有界であるとき、そのシステムは安定であるという。「有界」とは大きさが有限であることであり、「有界な入力 $u(t)$ 」とはすべての t に対して $|u(t)| < 1$ であるような $u(t)$ である(例えばステップ信号や正弦波などは有界な入力である)。出力 $y(t)$ が有界とはすべての t に対して $|y(t)| < 1$ であること、すなわち発散しないことである。有界な入力に対しても出力が発散するとき、そのシステムは不安定であるという。安定か不安定かはシステムの特性であり、その伝達関数によって決まる。

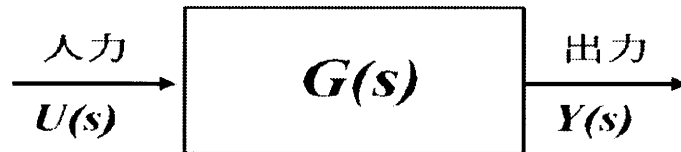


Fig.4.1 An input and output system

伝達関数 $G(s)$ が

$$G_s = \frac{n(s)}{d(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (4.1)$$

と表されるとき、このとき、 $d(s)=0$ の根を極と呼ぶ。すなわち、伝達関数の分母に注目し、それを=0とおいた代数方程式の根が極である。なお、 $n(s)=0$ の根は零点と呼ばれる。

式(4.1)の伝達関数において、分子多項式の次数は m 次であり、分母多項式の次数は n 次である。

伝達関数の分母多項式の次数をその伝達関数の次数と呼ぶ。(6.1) 式の伝達関数の次数
伝達関数の分母多項式の次数をその伝達関数の次数と呼ぶ。式(4.1)の伝達関数の次数は n

次である。n 次代数方程式の根は n 個の複素数であるので、n 次の伝達関数には n 個の極がある。

Fig.4.1 様な入力システムがあるとする。このシステムが安定かどうかは、伝達関数 $G(s)$ に注目し、安定である必要十分条件は、 $G(s)$ のすべての極の実部が負であることを示す。

4.1.2 ラウス・フルビッツの安定判別方法

つぎの n 次多項式がある。

$$a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 \quad (4.2)$$

この多項式が安定な多項式かどうかを、根を求めず、係数 $a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0$ から判別する方法がある。これはラウスの方法と呼ばれており、つぎの2つの条件をチェックする。

(1) 係数 $a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0$ がすべて正か調べる。もし1つでも負または0の係数があれば安定な多項式ではない。すべて正であればさらにつぎの条件を調べる。

(2) 係数 $a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0$ をもとに、つぎに示すラウス表をつくり、その最も左端の1列がすべて正の数となれば、式(4.1)は安定な多項式である（1つでも正でない数があれば安定な多項式ではない）。

<ラウス表のつくり方>

(i) まず、 $a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0$ をつぎのように2行にわたって並べる。

$$\begin{array}{l|l} \text{第1行} & a_n \quad a_{n-2} \quad a_{n-4} \quad \dots \\ \text{第2行} & a_{n-1} \quad a_{n-3} \quad a_{n-5} \quad \dots \end{array}$$

(ii) 上の2行を第 i 行と第 $i+1$ 行としたとき、その下にもう1行（第 $i+2$ 行）をつぎの規則によってつくる。

$$\begin{array}{l|l} \text{第 } i \text{ 行} & x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_k \quad x_{k+1} \quad \dots \\ \text{第 } i+1 \text{ 行} & y_1 \quad y_2 \quad \dots \quad y_k \quad y_{k+1} \quad \dots \\ \hline \text{第 } i+2 \text{ 行} & z_1 \quad z_2 \quad \dots \quad z_k \quad z_{k+1} \quad \dots \end{array}$$

$$z_k = -\frac{1}{y_1} \begin{vmatrix} x_1 & x_{k+1} \\ y_1 & y_{k+1} \end{vmatrix} = -\frac{1}{y_1} (x_1 y_{k+1} - x_{k+1} y_1)$$

(iii) 上の(ii) の操作ができなくなるまで(ii) を繰り返す。

一列目がすべて正ならば 安定となる。

4.2 目標値誤差のシミュレーション

4.2.1 目標値誤差

力 f 短形波状の外乱を入力した場合に、式(4.3)に示す様に、目標インピーダンスにより生成した位置制御の目標値 x_d と制御を行った出力 x の差の平均 e_m を求めた。以降では、目標値誤差と表している。

$$e_m = \frac{1}{0.5} \sum_{k=1}^N (x_d(k) - x(k))^2 \quad (4.3)$$

ここで、 k はサンプリング番号、 N はサンプリング数を示す。

4.2.2 シミュレーション方法

Table1, Table2, Table3, Table4 はシミュレーションで用いたパラメータの値を示す。受動要素のパラメータは筋肉特性を示す例として、環境のパラメータは、指先がフリーの場合 ($k_e=461$) と剛体に接触した場合 ($k_e=62500$) とした。

受動要素の値と目標インピーダンスの値が同じであると、 x' が一定になり制御する必要がない。そこで Table1, Table2, Table3 は目標インピーダンスである c_d, k_d を変化させることにより、 x' を変化させた場合、どのような特性を示すかをシミュレーションにより検討した。Table3, Table4 は、目標インピーダンスである c_d, k_d を同時に変化させ三次元グラフにしたものである。 T は位置制御の時定数を示す。

Table 1 An Example of Simulation Parameter

m_d [kg]	0.1
c_d [N·s/m]	10
k_d [N/m]	100~1000
m_o [kg]	0.0596
c_o [N·s/m]	10
k_o [N/m]	461
m_e [kg]	0.1286
c_e [N·s/m]	10
k_e [N/m]	461,62500
T	0.0001~0.1

Table 2 An Example of Simulation Parameter

m_d [kg]	0.1
c_d [N·s/m]	1~100
k_d [N/m]	461
m_0 [kg]	0.0596
c_0 [N·s/m]	10
k_0 [N/m]	461
m_e [kg]	0.1286
c_e [N·s/m]	10
k_e [N/m]	461,62500
T	0.0001~0.1

Table 3 An Example of Simulation Parameter

m_d [kg]	0.1
c_d [N·s/m]	0~10
k_d [N/m]	0~500
m_0 [kg]	0.0596
c_0 [N·s/m]	10
k_0 [N/m]	461
m_e [kg]	0.1286
c_e [N·s/m]	10
k_e [N/m]	461,62500
T	0.0001~0.1

Table 4 An Example of Simulation Parameter

m_d [kg]	0.1
c_d [N·s/m]	10~100
k_d [N/m]	400~1000
m_0 [kg]	0.0596
c_0 [N·s/m]	10
k_0 [N/m]	461
m_e [kg]	0.1286
c_e [N·s/m]	10
k_e [N/m]	461,62500
T	0.0001~0.1

4.2.3 シミュレーション結果

Table5 に目標剛性 k_d と位置制御の時定数 T を変化させた場合の目標値誤差 e_m を示す。 k_d は 100, 500, 1000 T は 0.001, 0.001, 0.01, 0.1 と変化させた。ただし、環境の剛性 k_e は 461 である。Fig.4.1 Fig.4.2 は $k_d=100, k_e=461, T=0.001, 0.1$ の時の目標位置 (細い実線), 従来手法の応答 (太い実線), 提案手法の応答 (点線) を示す。

Table 5 Mean error e_m for usual and proposed control method ($k_e=461$)

kd	T	0.0001	0.001	0.01	0.1
100	Usual	5.04×10^5	0.0049	0.3782	5.8764
	Proposed	0.2940	0.3601	0.9787	2.0134
500	Usual	4.84×10^5	0.0049	0.3215	3.3391
	Proposed	0.2093	0.2300	0.3283	0.3119
1000	Usual	5.35×10^5	0.0051	0.3190	2.4416
	Proposed	0.2290	0.2319	0.2279	0.3698

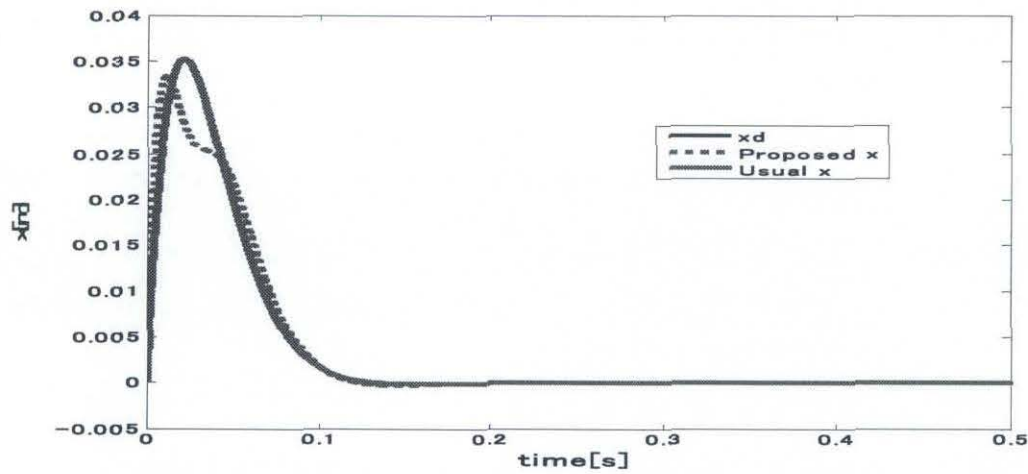


Fig 4.1 Time trajectories of x_d and x ($k_d=100, k_e=461, T=0.0001$)

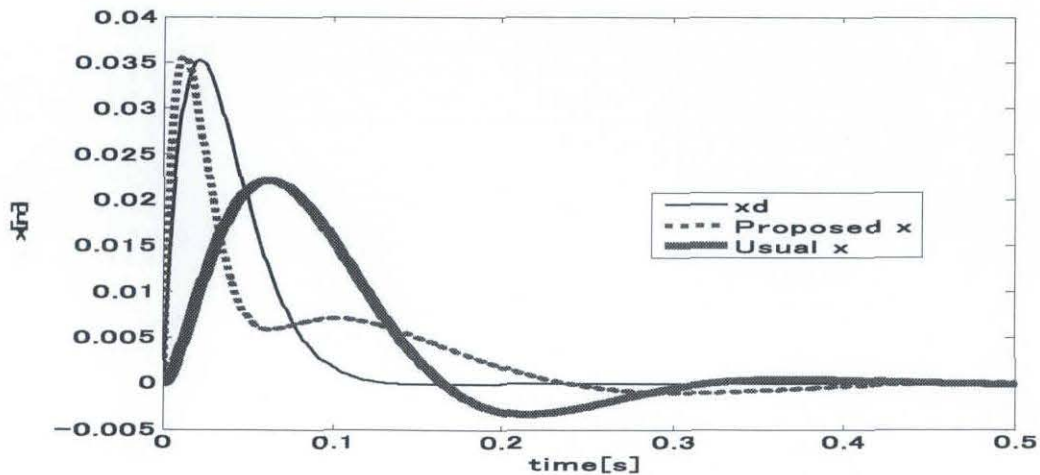


Fig 4.2 Time trajectories of x_d and x ($k_d=100, k_e=461, T=0.1$)

Table6 に目標粘性 c_d と位置制御の時定数 T を変化させた場合の目標値誤差 e_m を示す。 c_d は 1, 50, 100 T は 0.0001, 0.001, 0.01, 0.1 と変化させた。ただし、環境の剛性 k_e は 461 である。Fig.4.3 Fig.4.4 は $c_d=1, k_e=461, T=0.1, 0.001$ の時の目標位置 (細い実線), 従来手法の応答 (太い実線), 提案手法の応答 (点線) を示す

Table 6 Mean error e_m for usual and proposed control method($k_e=461$)

cd	T	0.0001	0.001	0.01	0.1
1	Usual	4.09×10^{-5}	0.0040	0.3241	1.9735
	Proposed	0.1442	0.2005	1.2343	5.2845
50	Usual	3.18×10^{-5}	0.0029	0.0029	1.0088
	Proposed	1.5709	1.7887	2.2622	2.0540
100	Usual	1.97×10^{-5}	0.0016	0.0528	0.4309
	Proposed	2.5627	2.8849	3.3793	3.3008

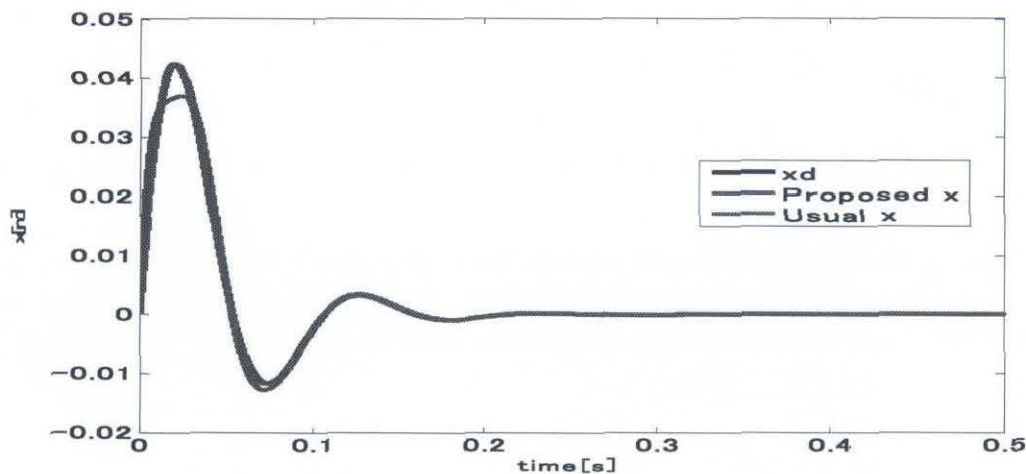


Fig 4.3 Time trajectories of x_d and x ($c_d=1, k_e=461, T=0.0001$)

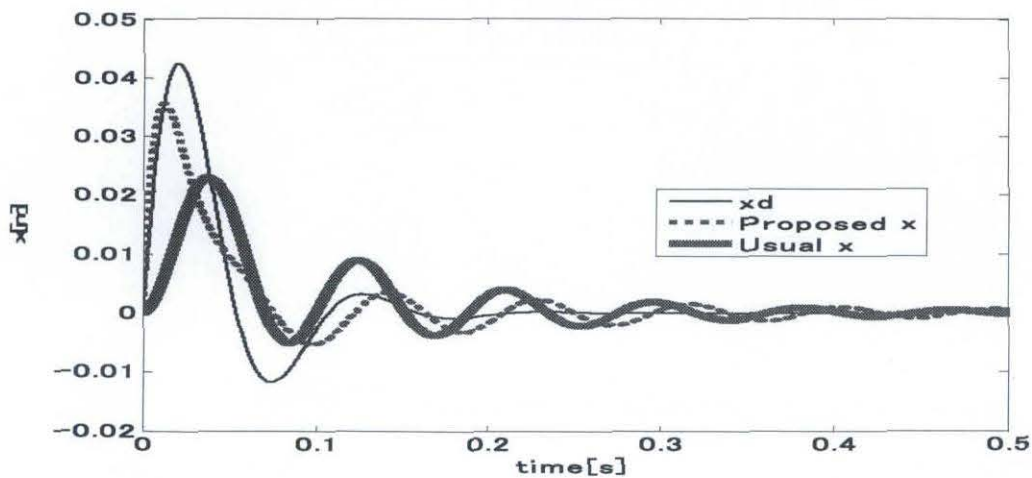


Fig 4.4 Time trajectories of x_d and x ($c_d=1, k_e=461, T=0.1$)

Table7 目標剛性 k_d と位置制御の時定数 T を変化させた場合の目標値誤差 e_m を示す。 k_d は 100, 1000 T は 0.001, 0.001, 0.01, 0.1 と変化させた。ただし、環境の剛性 k_e は 62500 である。剛性 k_e が異なる以外は Table5 と同じである。表中の *unstable* の表記は、応答が不安定となり、計算値が求まらなかった場合を示す。Fig.4.5 は $k_d=100$, $k_e=62500$, $T=0.1$ の時の目標位置 (細い実線), 従来手法の応答 (点線) を示す。Fig.4.6 は $k_d=100$, $k_e=62500$, $T=0.1$ の時の目標位置 (細い実線), 提案手法の応答 (点線) を示す。

Table 7 Mean error e_m for usual and proposed control method ($k_e=62500$)

kd	T	0.0001	0.001	0.01	0.1
100	Usual	9.78×10^{-4}	<i>unstable</i>	<i>unstable</i>	<i>unstable</i>
	Proposed	0.1105	0.1123	0.1109	0.1102
1000	Usual	9.27×10^{-4}	<i>unstable</i>	<i>unstable</i>	<i>unstable</i>
	Proposed	0.1083	0.1099	0.1086	0.1080

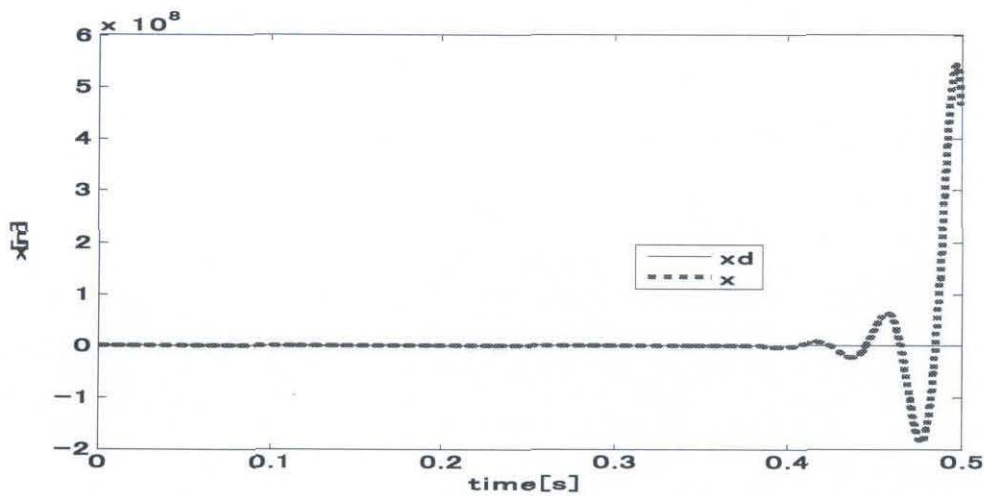


Fig 4.5 Time trajectories of x_d and Usual x ($k_d=100$ $k_e=62500$ $T=0.1$)

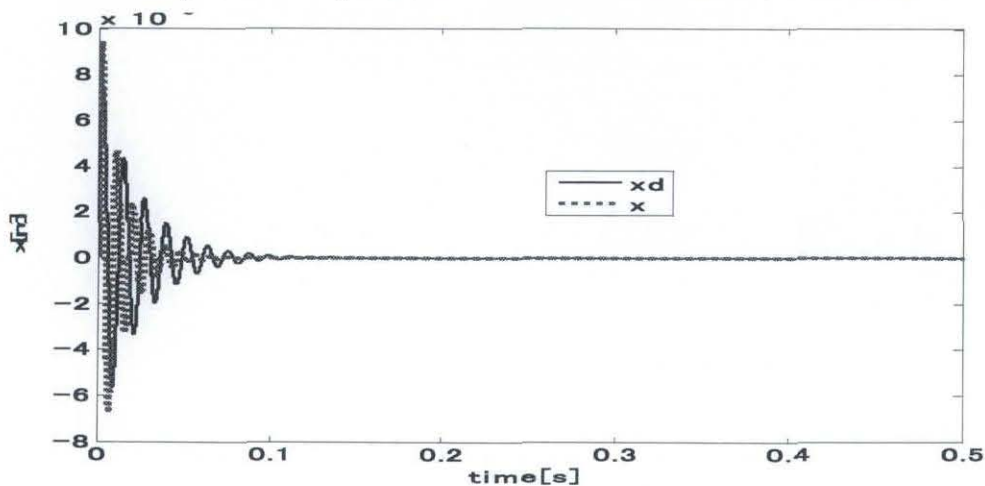


Fig 4.6 Time trajectories of x_d and Proposed x ($k_d=100$ $k_e=62500$ $T=0.1$)

Table8 は目標粘性 c_d と位置制御の時定数 T を変化させた場合の目標値誤差 e_m を示す. cd は 1, 100 T は 0.0001, 0.001, 0.01, 0.1 と変化させた. ただし, 環境の剛性 k_e は 62500 である. 粘性 c_d が異なる以外は Table6 と同じである. 表中の *unstable* の表記は, 応答が不安定となり, 計算値が求まらなかった場合を示す. Fig.4.7 は $cd=1, k_e=62500, T=0.1, 0.001$ の時の目標位置 (細い実線), 従来手法の応答 (点線) を示す. Fig.4.8 は $cd=1, k_e=62500, T=0.1$ の時の目標位置 (細い実線), 提案手法の応答 (点線) を示す.

Table 8 Mean error e_m for usual and proposed control method ($k_e=62500$)

cd	T	0.0001	0.001	0.01	0.1
1	Usual	0.0067	<i>unstable</i>	<i>unstable</i>	<i>unstable</i>
	Proposed	0.1765	0.1788	0.1790	0.1772
100	Usual	2.48×10^{-5}	0.0024	0.0321	0.0305
	Proposed	0.0577	0.0591	0.0561	0.0551

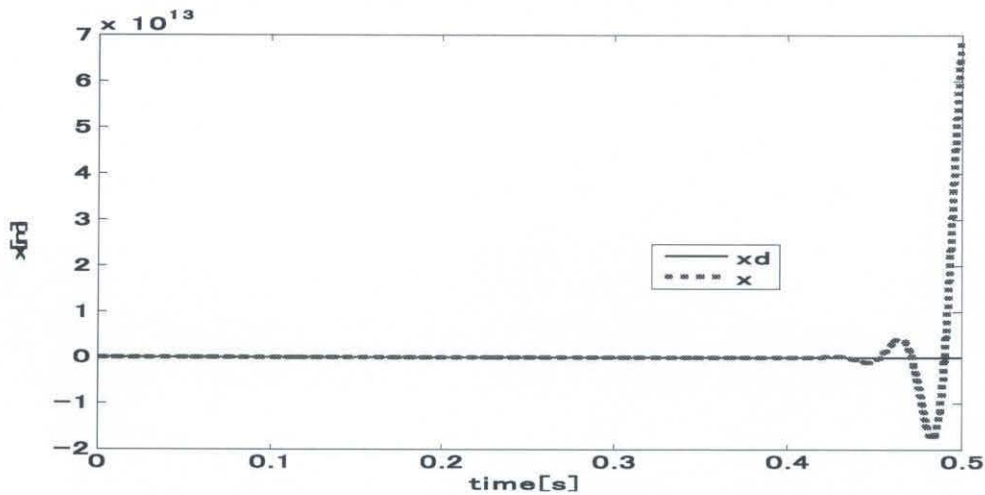


Fig 4.7 Time trajectories of x_d and Usual x ($cd=1, k_e=62500, T=0.1$)

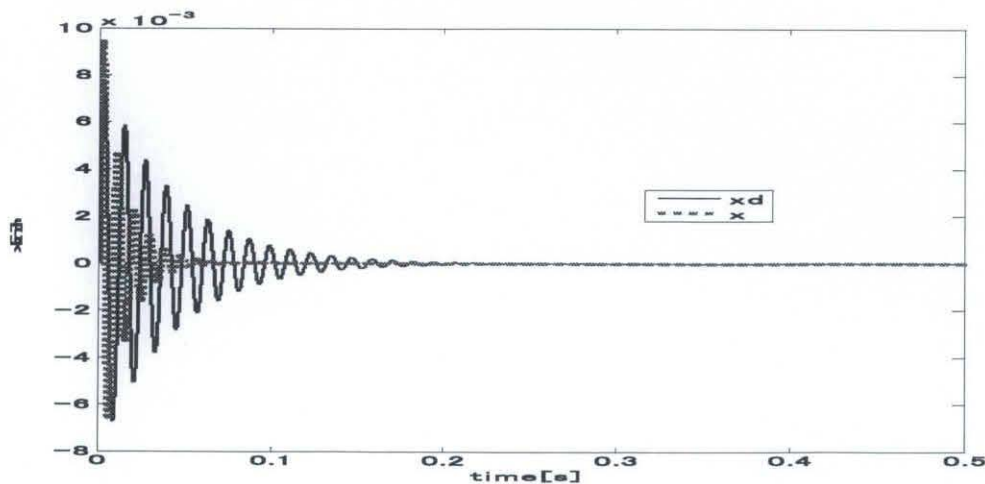


Fig 4.8 Time trajectories of x_d and Ploposed x ($cd=1, k_e=62500, T=0.1$)

Table3 は目標粘性 c_d と目標剛性 k_d と位置制御の時定数 T を変化させた場合を示す. c_d は 0~10 k_d は 0~500 k_e は 62500 461 T は 0.0001, 0.001, 0.01, 0.1 と変化させた. Fig.4.9 Fig.4.10 は T は 0.1 k_e は 461 の場合の x 軸が目標剛性 k_d y 軸が目標粘性 c_d z 軸が目標値誤差 e_m となる Fig.4.11 Fig.4.12 は T は 0.001 k_e は 62500 の場合である.

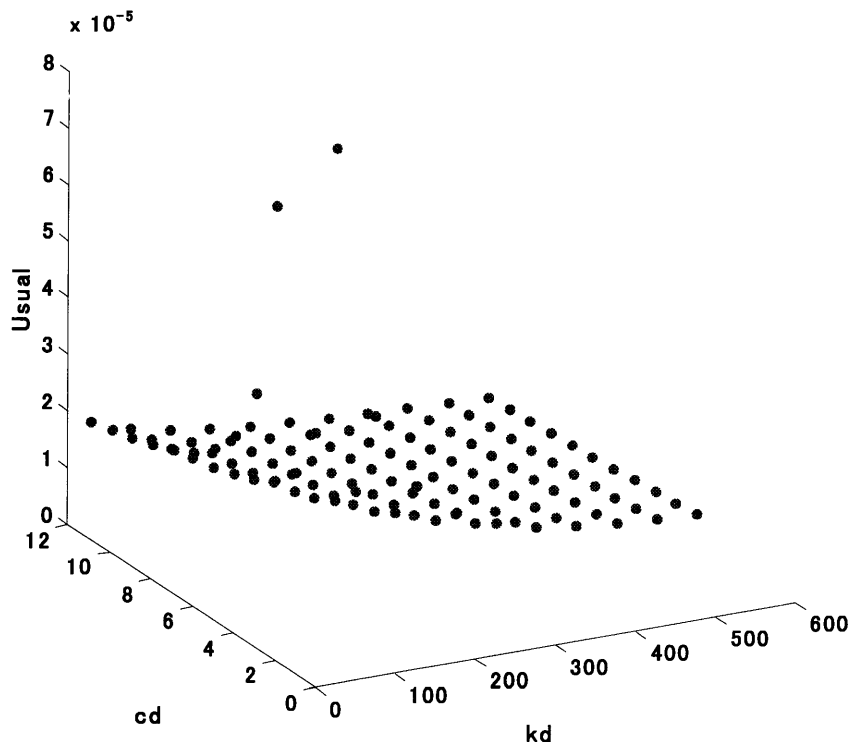


Fig 4.9 Time trajectories of usual x ($k_e=461$ $T=0.1$)

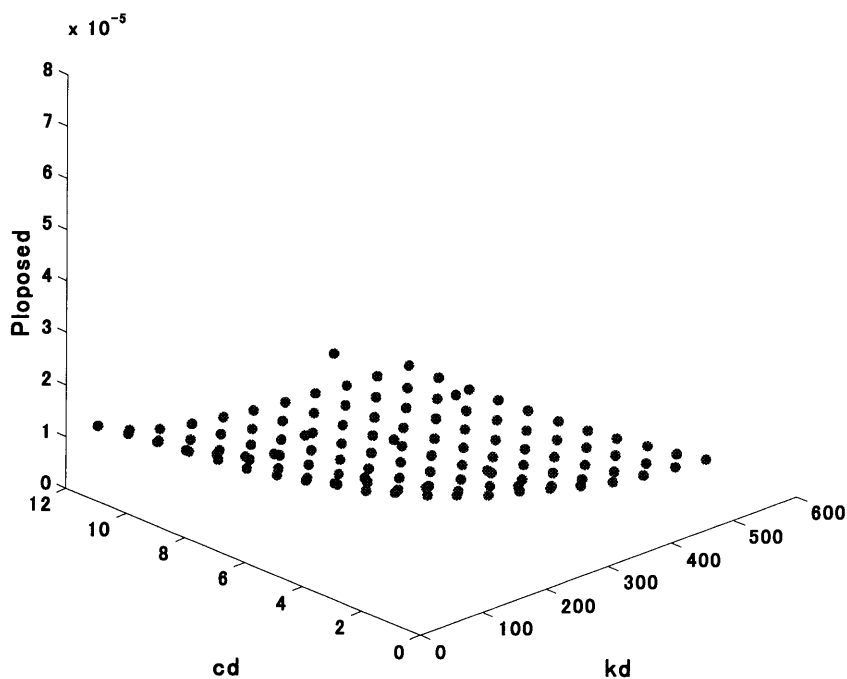


Fig 4.10 Time trajectories of ploposed x ($k_e=461$ $T=0.1$)

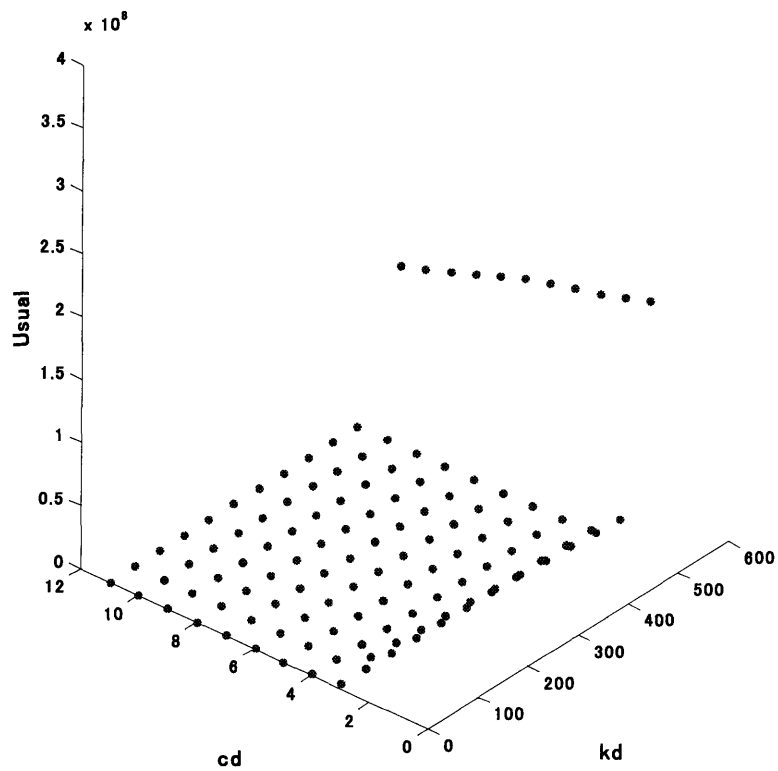


Fig 4.11 Time trajectories of usual x ($k_e=62500$ $T=0.001$)

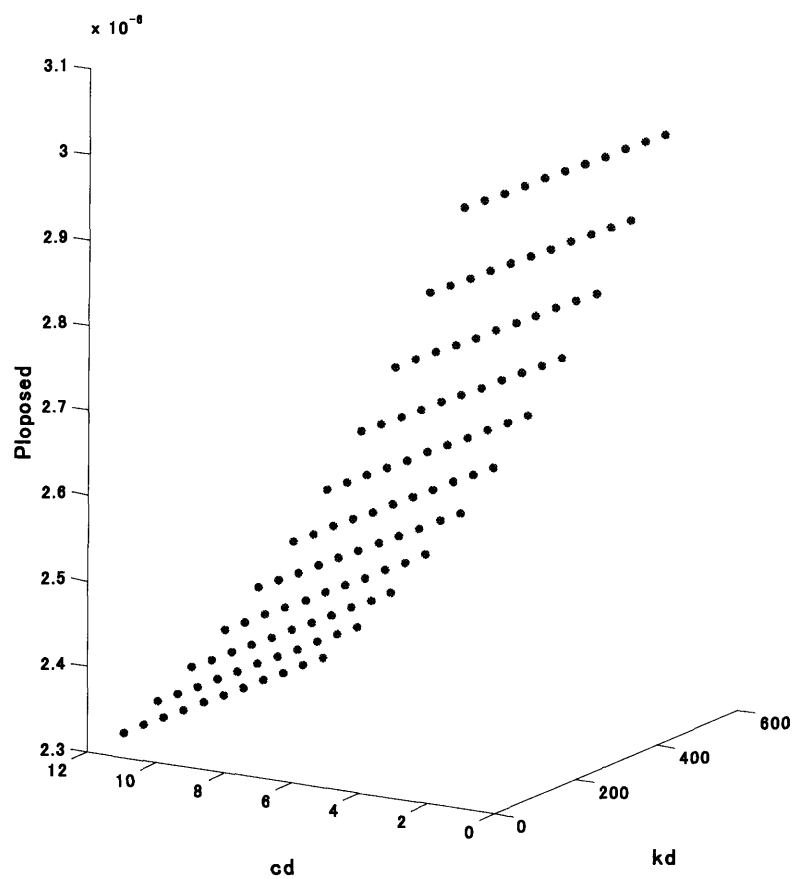


Fig 4.12 Time trajectories of ploposed x ($k_e=62500$ $T=0.001$)

Table4 は目標粘性 c_d と目標剛性 k_d と位置制御の時定数 T を変化させた場合を示す. c_d は 10~100 k_d は 400~1000 k_e は 62500 461 T は 0.0001, 0.001, 0.01, 0.1 と変化させた. Fig.4.17Fig.4.18 は T は 0.1 k_e は 461 の場合の x 軸が目標剛性 k_d y 軸が目標粘性 c_d z 軸が目標値誤差 e_m となる. Fig.4.19Fig.4.20 は T が 0.01 k_e が 62500 でほかは同じである.

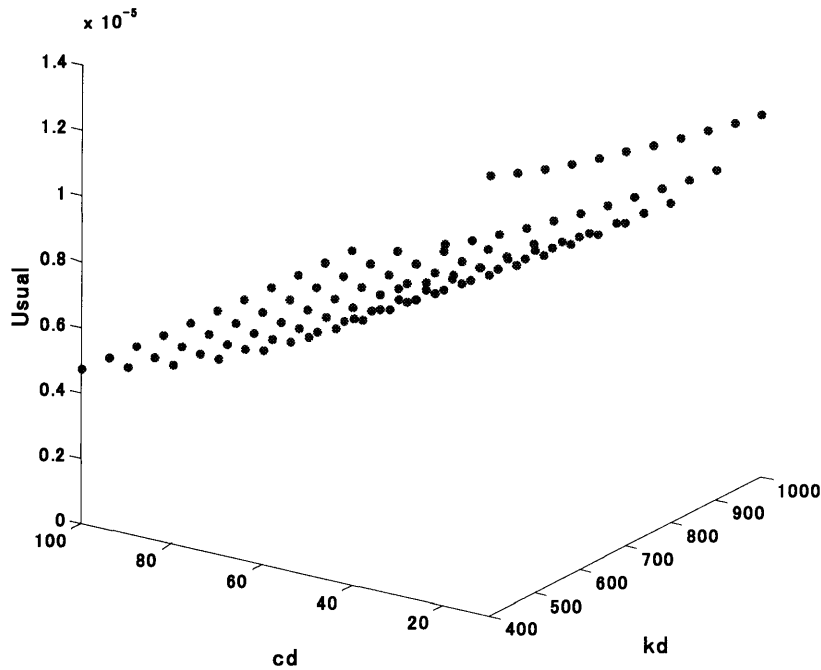


Fig 4.13 Time trajectories of usual x($k_e=461$ $T=0.1$)

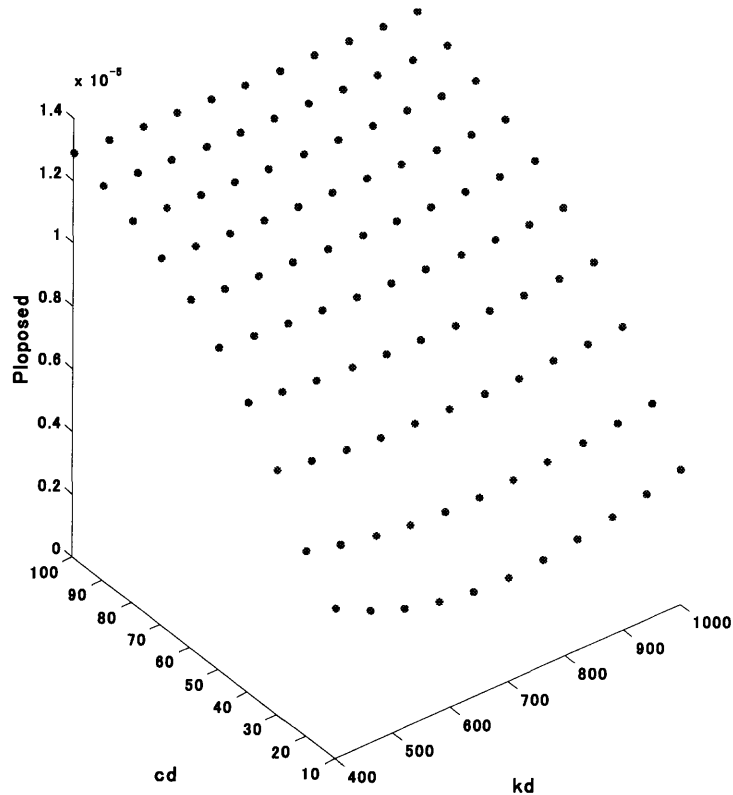


Fig 4.14 Time trajectories of Ploposed x($k_e=461$ $T=0.1$)

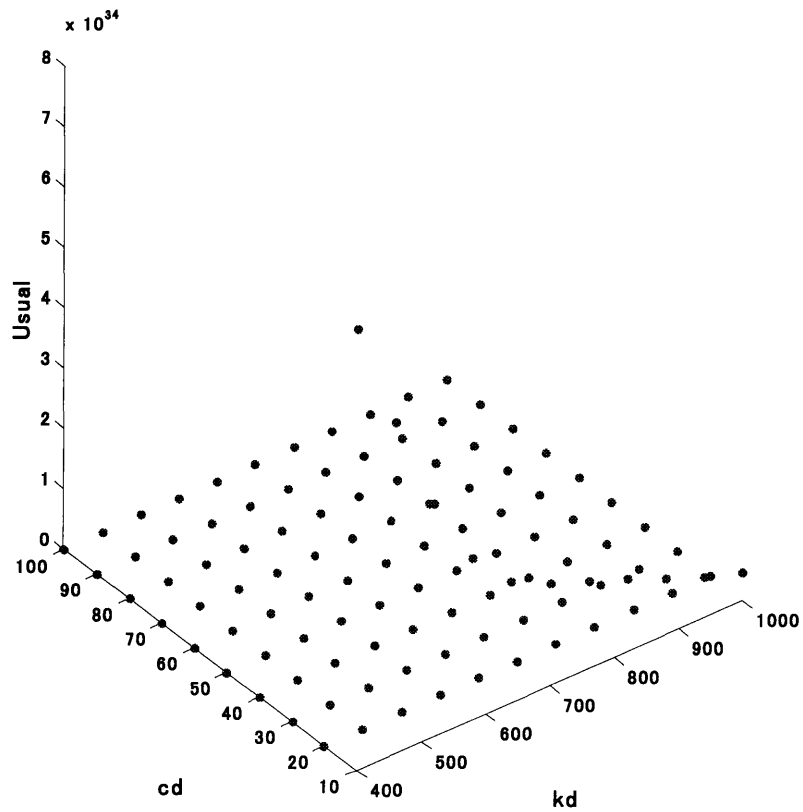


Fig 4.8 Time trajectories of usual x ($k_e=62500$ $T=0.001$)

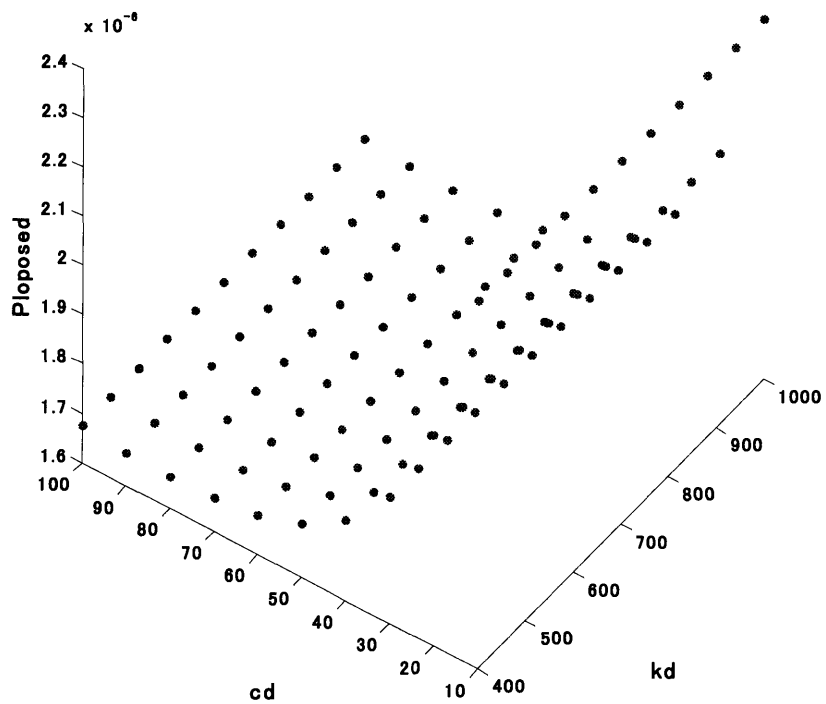


Fig 4.16 Time trajectories of Ploposed x ($k_e=62500$ $T=0.001$)

4.2.4 考察

Table5 から分かるように、位置制御の時定数 T が小さいと従来の手法の方が目標値誤差 em が小さいが、時定数 T が大きくなっていくと、提案手法の方が誤差が小さくなることが分かる。Fig.4.2 は位置制御系の時定数が大きいいため、従来手法では、目標値に対して応答が大きく遅れているが、提案手法では、立ち上がりの応答遅れはない。これは、受動要素により、素早く応答したためである。ただし、受動要素に続いて位置制御系が応答しているため、2段ばね特性を示している。

Table6 の場合、あまりいい結果が得られなかった。先ほどと同様に Fig.4.4 では、従来手法では、目標値に対して応答が大きく遅れているが、提案手法では、立ち上がりの応答遅れはないことがわかる。

Table7 に示すように、目標剛性 k_d の変化にもかかわらず、従来の制御手法では、時定数 T が 0.001 以上では不安定となっていることが分かる。これに対して、提案手法では、いずれも安定となっており、誤差も時定数 T によってあまり変化していない。

Table8 に示すように、目標粘性 c_d が小さい場合、従来の手法では、時定数 T が 0.001 以上では不安定となっている。目標粘性 c_d を大きくすれば安定となるが、操作の抵抗感が大きくなり、操作性が悪くなってしまう。これに対して、提案手法では、いずれも安定となっており、提案手法の有効性が検証された。

Fig.4.9 から Fig.4.16 より目標値誤差の傾向をつかむ。その結果、目標剛性・粘性 k_d, c_d が受動要素の剛性・粘性 k_0, c_0 よりも小さい場合従来よりも提案する方が目標値誤差が小さいことがわかる。逆に、目標剛性・粘性 k_d, c_d が受動要素の剛性・粘性 k_0, c_0 よりも大きい場合 $c_d = c_0$ を境に提案の方が従来よりも悪くなる。

第5章

結言

本論文は、指のパワーアシストを例に取り、従来の位置制御ベースのインピーダンス制御に受動要素を追加した手法を提案し、その有効性をシミュレーションにより検証した。本論文により得られた結論を以下に示す。

シミュレーションを行った結果、提案手法は従来法に比べ、位置制御の時定数が大きくても応答が早く、環境の剛性が大きくなっても不安定にならないことが分かり、その有効性が検証された。

今後の課題としては、提案手法の有効性を実験的に検証し、人間に操作しやすいパワーアシスト装置を開発することである。

参考文献

- (1) http://www.g-mark.org/search/img/2006/06D01041_1.jpg
- (2) 榊秦輔, 館暲: インピーダンス制御の接触安定性についての一考察, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.3, 1994, pp.489-496
- (3) 積際徹, 阪本敦, 横川隆一, 原敬: 人間とロボットの協調運搬・精密はめあい (Peg-in-Hole) 作業における一制御法, 機械学会論文集, 70-689, C (2006), pp.69-76
- (4) 中沢信明, 植北祥充, 池浦良淳, 猪岡光, 人間の指関節のインピーダンス特性, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.66, No.641, pp.214-219, 2000
- (5) 山田高史, 田口幹一, 吉田久美子, リハビリ支援パワーアシストグローブの開発, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2006 講演概要集, 2P2-A08, 2006.5.26-28
- (6) 小林宏, 伊庭雅弥, 鈴木秀俊: マッスルスーツの新肩機構と姿勢制御に関する研究, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2006 講演概要集 2P2-A32, 2006.5.26-28
- (7) 内野進一, 高橋良至, Elsayeh Mario, 米田隆志, 小山浩幸, 山本紳一郎: 装着型生活支援装置の開発に関する研究, ROBOMECH'06 講演集, 1P1-A23, 2006(CD-ROM)
- (8) 川崎晴久, 木村宏樹, 伊藤聡, 西本裕, 林浩之, 栄枝裕文: 手指リハビリテーション支援システムの研究 第1報, 概念と1例試験報告, 日本機械学会論文集. C 編, Vol.72, No.720(20060825) pp. 2568-2573
- (9) 特集: 日常生活にとけこむデジタルヒューマン, 人工知能学会誌, 20-5(2005)
- (10) K. Hase, K. Miyasita, S. Ok and Y. Arakawa: Human gait simulation with a neuro-musculo-skeletal model and evolution computation, Journal of Visualization and Computer Animation, 14, 73/92 (2003)
- (11) 伊藤, ほか: 生体とロボットにおける運動制御, 計測自動制御学会, 121/146 (1991)
- (12) A. シェフラー S. シュミット: からだの構造と機能
- (13) 伊藤宏司 伊藤正美: 生体とロボットにおける運動制御
- (14) 池浦良淳: 人間の力学特性と支援, 計測と制御第 45 巻, 第 5 号, 2006, pp.413-418

謝辞

私をシステム設計研究室の一員とし迎え、研究に対して様々な角度からのご意見、ご指導をいただいた池浦良淳教授に深く感謝いたします。

研究だけでなく学問の姿勢として、様々な指導ならびにご助言をいただいた水谷一樹先生ならびに加藤光廣助教に深く感謝いたします。

研究への助言にとどまらず、広い分野の知識から技術に対する新しい興味を持つきっかけを与えていただいた澤井秀樹技術職員に心より感謝いたします。

研究ならびに学会発表の際ならびに研究以外のことまで、手間を惜しむことなくいつも快くご助言をいただいたシステム設計研究室博士3年の中村創一先輩に深く感謝いたします。

そして3年間の研究室の生活を、協力し、励まし、楽しく充実したものにいただいた、修士2年の白川裕介君、岡和宏君、小野真平君、高井哲仁君、半田裕一郎君、渡辺尉博君、上田康夫君に心から感謝するとともに、皆さんの未来のご発展を望みます。

最後に、私の学生生活を影に日向に支えていただいた全ての人に感謝し、本論文の結びといたします。