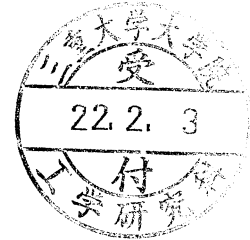

平成 21 年度 修士学位論文

受動要素を用いた肘のパワーアシストシステムの
設計手法に関する研究

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

MUHAMAD SAFWAN BIN MUHAMAD AZMI

目次

第 1 章	緒言	1
第 2 章	肘のパワーアシスト	3
2. 1	筋の力学的性質	3
2. 2	人間の筋骨格特性	5
2. 3	肘のパワーアシスト	8
第 3 章	インピーダンス制御のモデル化	10
3. 1	インピーダンス制御	10
3. 2	位置制御ベースと力制御ベース	10
3. 3	回転系のインピーダンス制御のモデル化	11
3. 3. 1	従来の回転系のインピーダンス制御	11
3. 3. 2	提案する回転系のインピーダンス制御	14
第 4 章	シミュレーションによる解析	17
4. 1	安定性のシミュレーション	17
4. 1. 1	安定性とは	17
4. 1. 2	ラウス・フルビッツの安定判別方法	18
4. 2	目標値誤差のシミュレーション	19
4. 2. 1	目標値誤差	19
4. 2. 2	シミュレーション方法	19
4. 2. 3	シミュレーション結果	23
4. 2. 4	考察	38

第5章 結言	40
参考文献	41
謝辞	42

第1章

緒言

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思う。

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ち，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る。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てるロボットである。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幅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，位置ベースのインピーダンス制御に実存する受動要素（ばね、ダンパ）を用いることを提案する。そして，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，肘のパワーアシスト装置を対象とし，提案した制御手法の有効性をシミュレーションにより検討する。

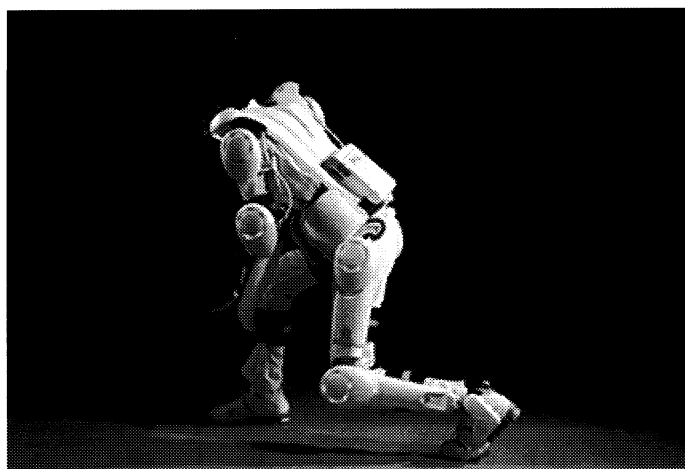


Fig.1.1 Robot suit

第2章

肘のパワーアシスト

2.1 筋の力学的性質

一般に、屈筋・伸筋を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、ロボットの関節リ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つの基本関係で表されることがよく知られている。Fig.2.1 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。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.2.2 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.2.3 は Fig.2.1, Fig.2.2 の関係を3次元的に表したものである。ただし、最も随意収縮（ $\alpha = 1$ ）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動くだけでなく、粘弾性要素の性質の備えていることがわかる(4)。

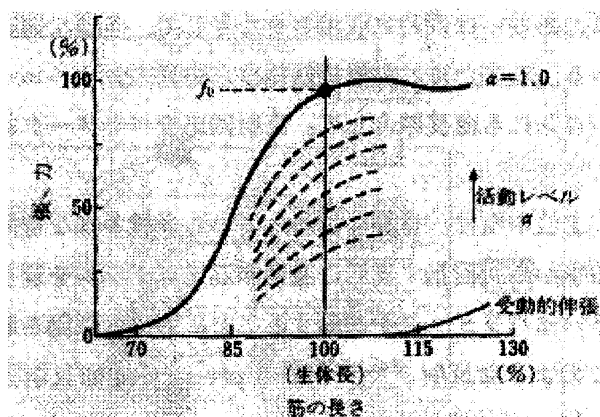


Fig.2.1 Tension-Length relations

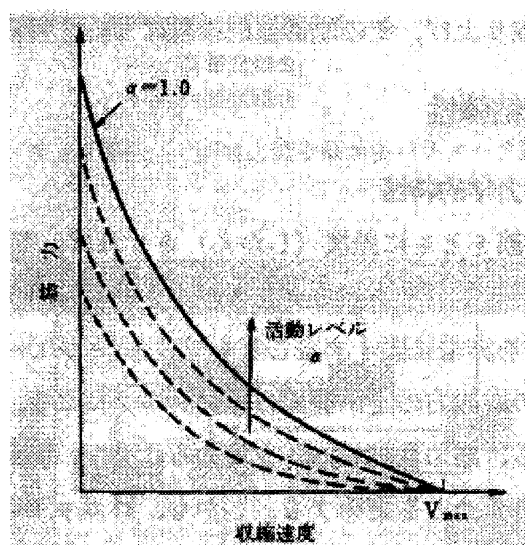


Fig.2.2 Power-Speed relations

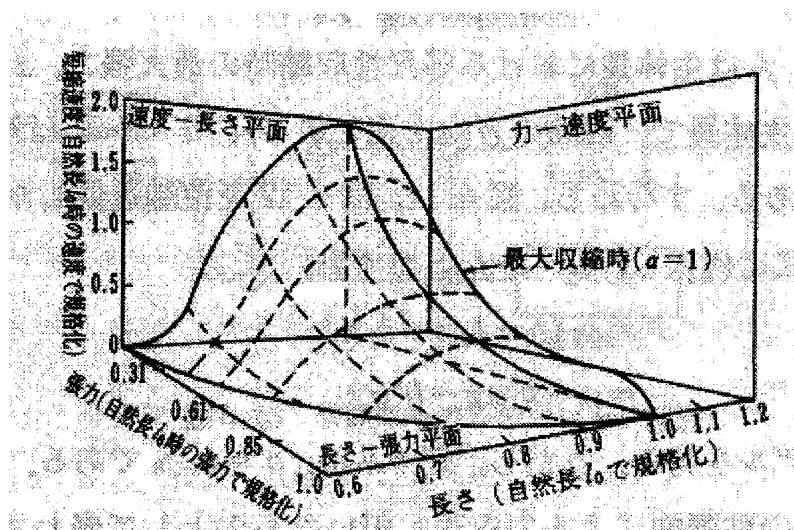


Fig.2.3 The three dimensional indication of the muscular contraction characteristic

2.2 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つであり，それ以外に，2つの関節を同時に駆動する．近年では，デジタルヒューマン⁽⁵⁾に代表されるように，人間モデル化もされるようになってきた．例えば，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⁽⁶⁾．

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，Fig.2.4のように，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，様々に研究されているが，もっとも簡潔に表されているものとして，式(2.1)に示す伊藤らのモデル⁽⁷⁾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 及び b 定数である．式(2.1)より，筋全体の剛性は ku ，粘性 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.2.5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 は上腕二頭筋にかんするパラメータ，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，

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

で表すことができる．式 (2.5) 右辺の第1項 $(u_f + u_e)$ は筋肉の差を表しており，前腕の駆動トルクとなる．右辺第2項 $(u_f + u_e)(k\theta + b\dot{\theta})$ は，前腕を駆動するさいの抵抗となるものであり，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．

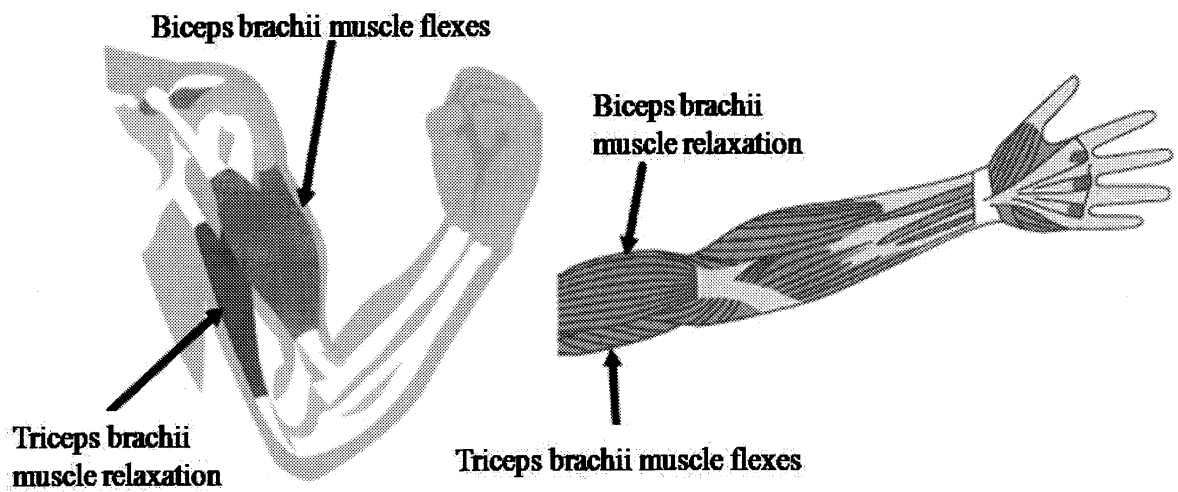


Fig.2.4 Human upper arm muscles

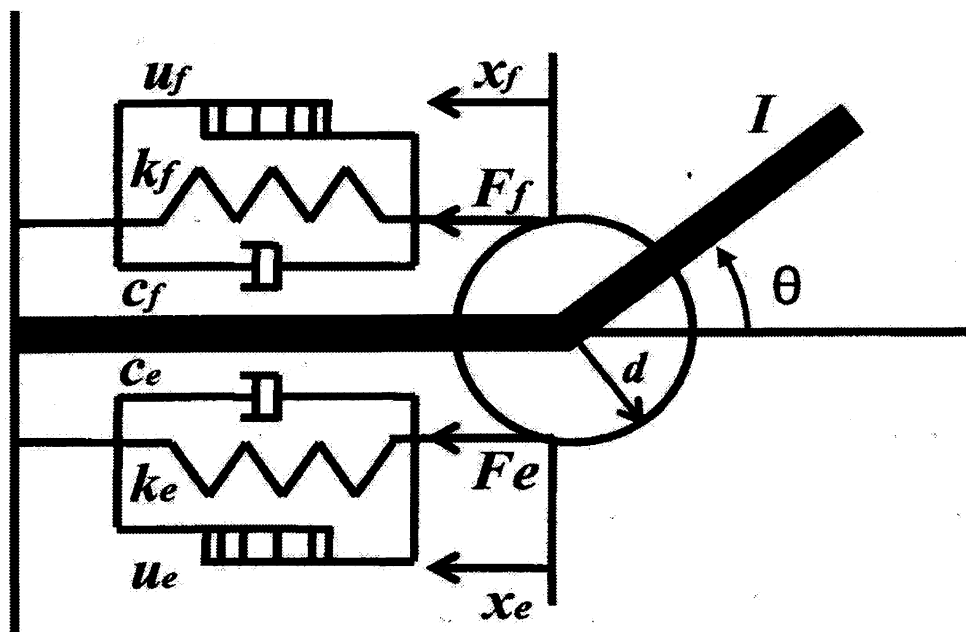


Fig.2.5 Muscles and bones model of the human elbow rotation

2.3 肘のパワーアシスト

Fig.2.6 のように、人間の肘は主に、伸ばす筋肉と、曲げる筋肉の二つの筋肉より駆動しているが、Fig.2.7のように、もし病気、交通事故などで肘を曲げることができない場合、その筋肉の人間支援機器などで補う必要がある。そこで、Fig.2.8 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.2.9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。

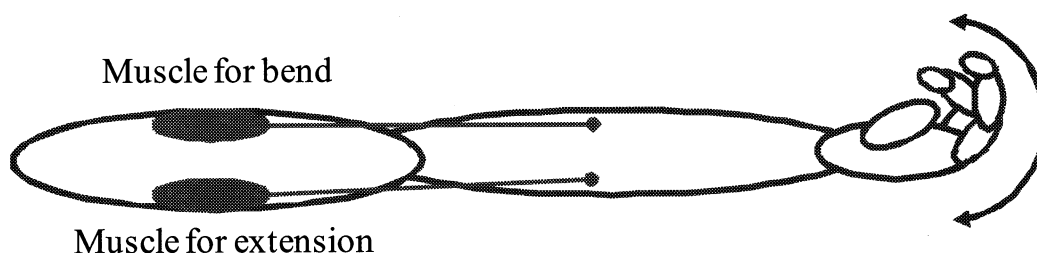


Fig.2.6 The drive system of upper arm

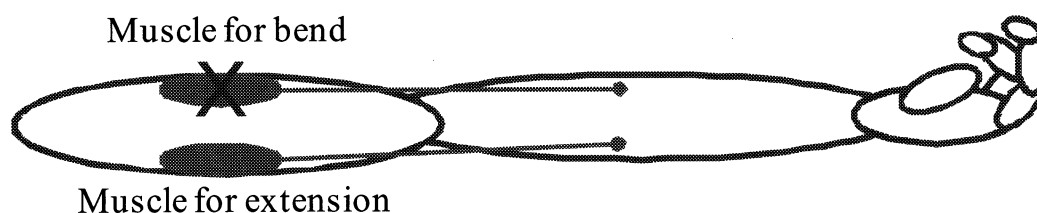


Fig.2.7 The drive system with no working muscle

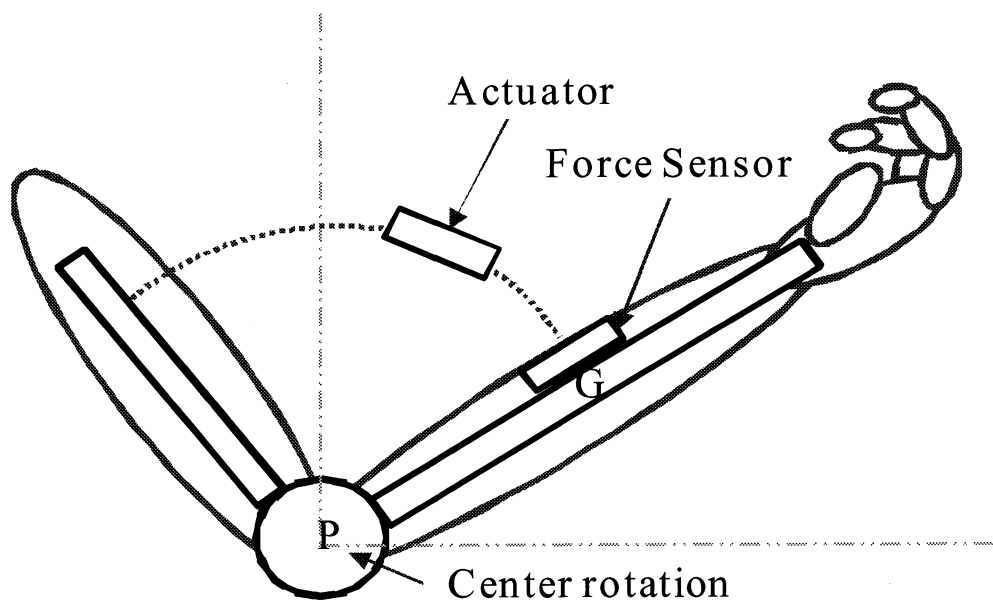


Fig.2.8 Usual impedance control method

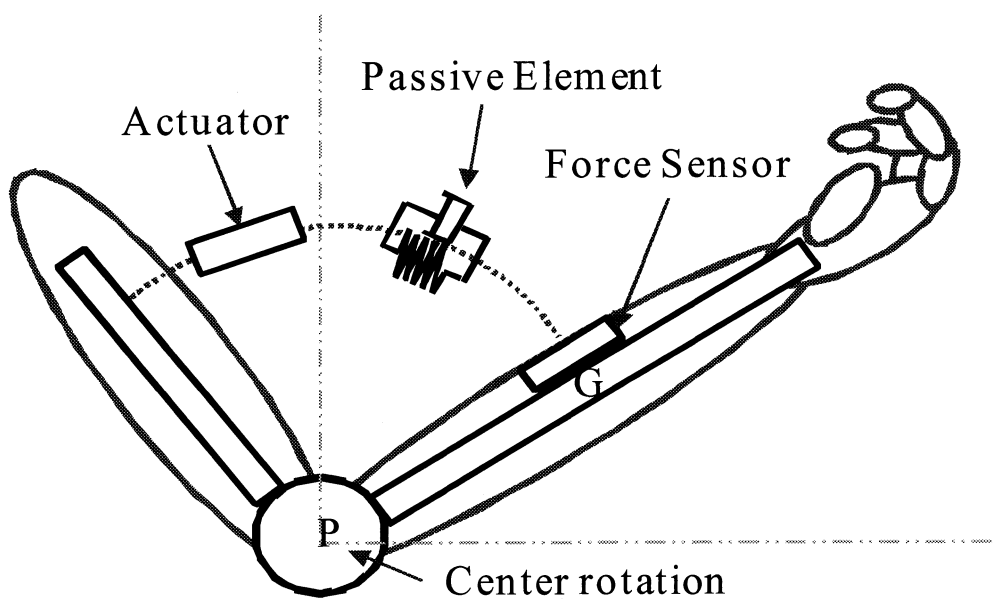


Fig.2.9 Proposed impedance control method with the passive elements

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の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前腕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、前腕効果器の位置、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線図である。ここで、 R 、 H はそれぞれ、ロボット及び人間の伝達関数である。なお、Fig.3.2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に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。

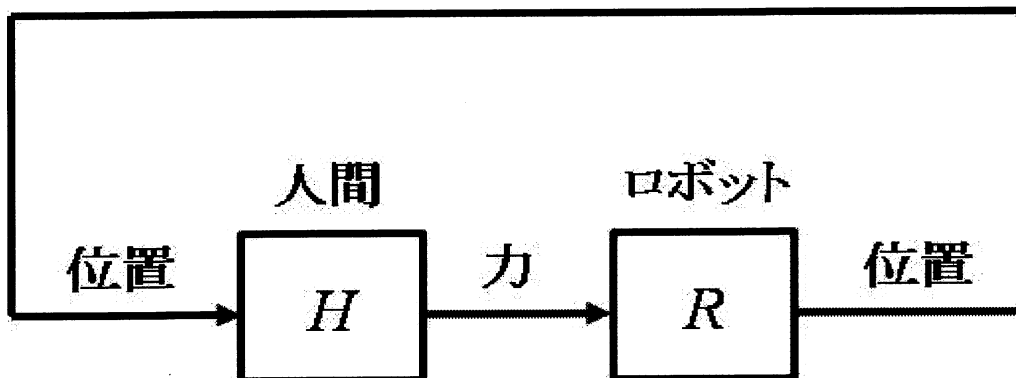


Fig.3.1 The positioning control base robot and a human cooperative system

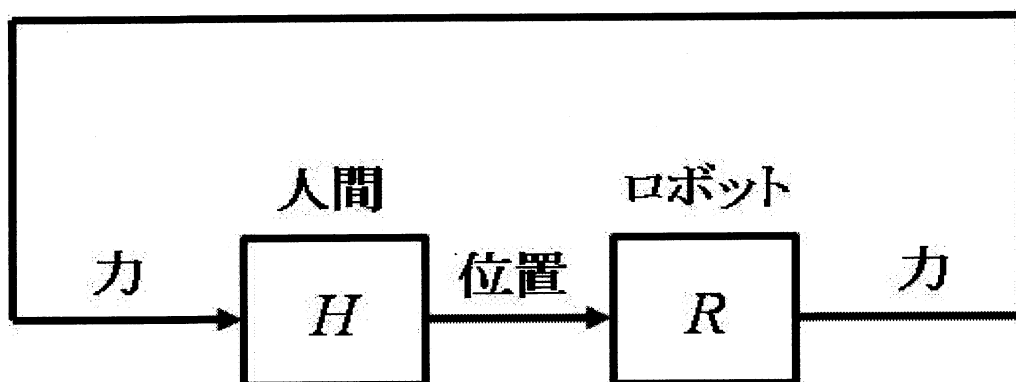


Fig.3.2 The force control base robot and a human cooperative system

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。

N は外から加えられた力, θ_d は肘の目標値, 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 [Nms/rad], 剛性 [Nm/rad] を示す。

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

$$N = J_d \ddot{\theta}_d + C_d \dot{\theta}_d + K_d \theta_d \quad (3.1)$$

$$T \ddot{\theta} + \theta = \theta_d \quad (3.2)$$

式 (3.1) は Fig.3.3 におけるモーメントの式である。式 (3.2) 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。環境インピーダンスが肘に及ぼすモーメント N_e は以下の式になる。

$$N_e = J_e \ddot{\theta}_e + C_e \dot{\theta}_e + K_e \theta_e \quad (3.3)$$

目標のバネ・ダンパにかかるモーメントは、次の式 (3.4) で表される。

$$N = N' - N_e \quad (3.4)$$

ここで示す N' は外力のことである。

Fig.3.4 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。図中の各伝達関数は以下のように表される。

$$P_I = \frac{1}{J_d s^2 + C_d s + K_d} \quad (3.5)$$

$$P_c = \frac{1}{Ts + 1} \quad (3.6)$$

$$H_e = J_e s^2 + C_e s + K_e \quad (3.7)$$

ここで、 J_e 、 C_e 、 K_e は環境のインピーダンス特性、質量 $[\text{Nm}^2/\text{rad}]$ 、粘性 $[\text{Nms}/\text{rad}]$ 、剛性 $[\text{Nm}/\text{rad}]$ 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 θ を目標位置 θ_d に制御する位置制御である。

Fig.3.4 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できるが, 操作性が低下するといった問題が生じる.

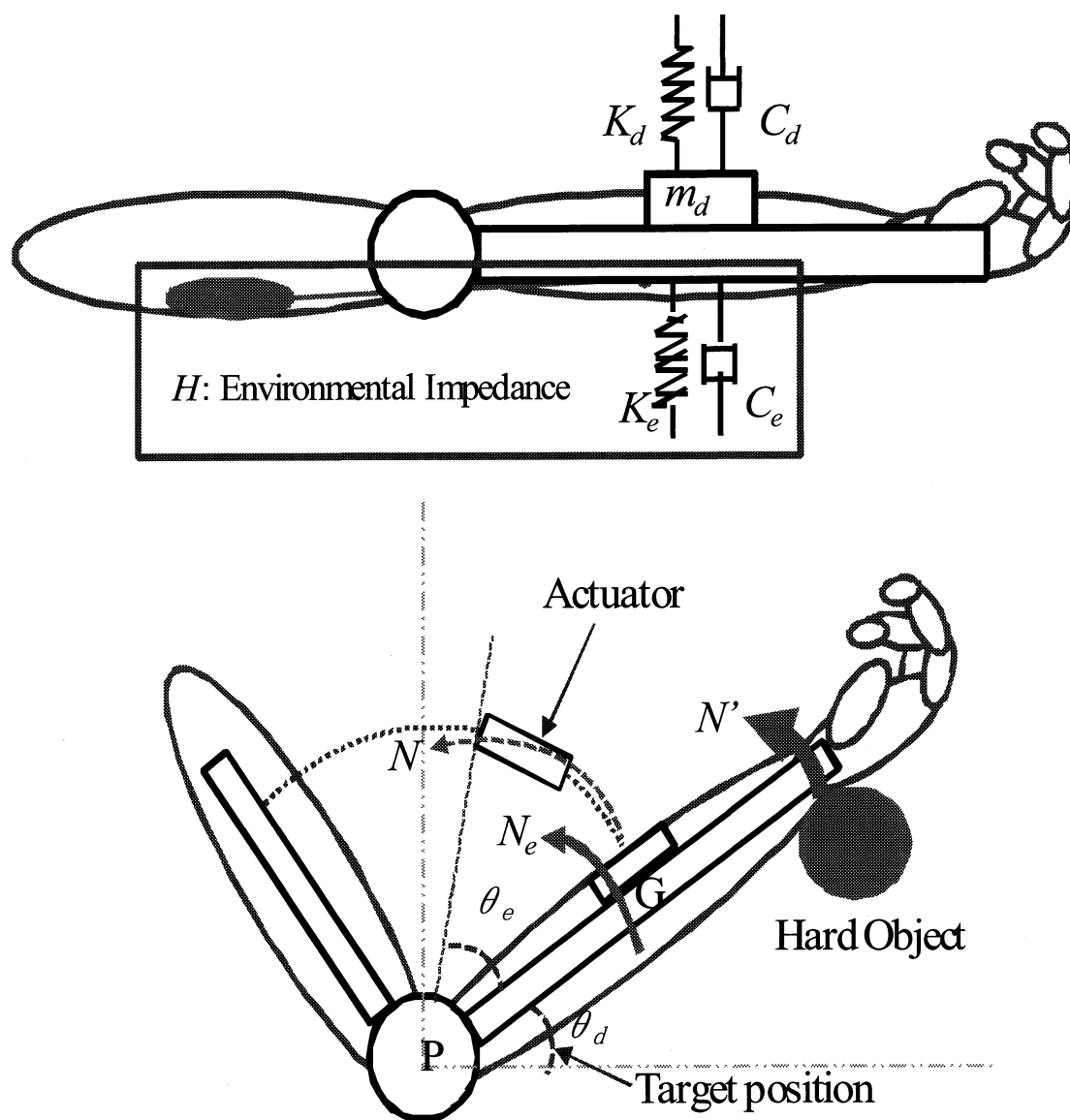


Fig.3.3 Impedance control model

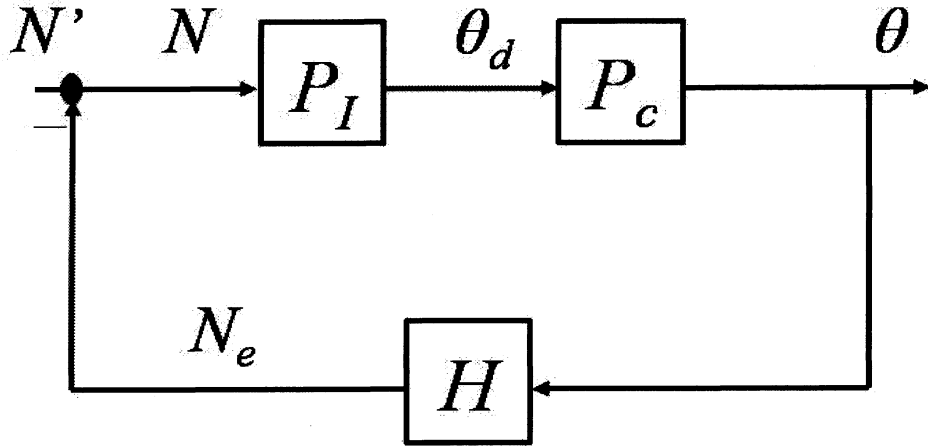


Fig.3.4 Impedance control block diagram

3.3.2 提案する回転系のインピーダンス制御

次に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 により説明する.

外力 N 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 θ_d が変化する. このとき, モーメント N_0 と変位 θ_d との関係は,

$$N_0 = C_0(\dot{\theta}'_d - \dot{\theta}_d) + K_0(\theta'_d - \theta_d) \quad (3.8)$$

となる. これより導き出せる運動方程式は,

$$J_p = N + N_0 \quad (3.9)$$

となる. よって, 式 (3.9) に式 (3.8) を代入すると

$$J_p \ddot{\theta}_d + C_0(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}'_d) + K_0(\theta_d - \theta'_d) = N \quad (3.10)$$

が得られる.

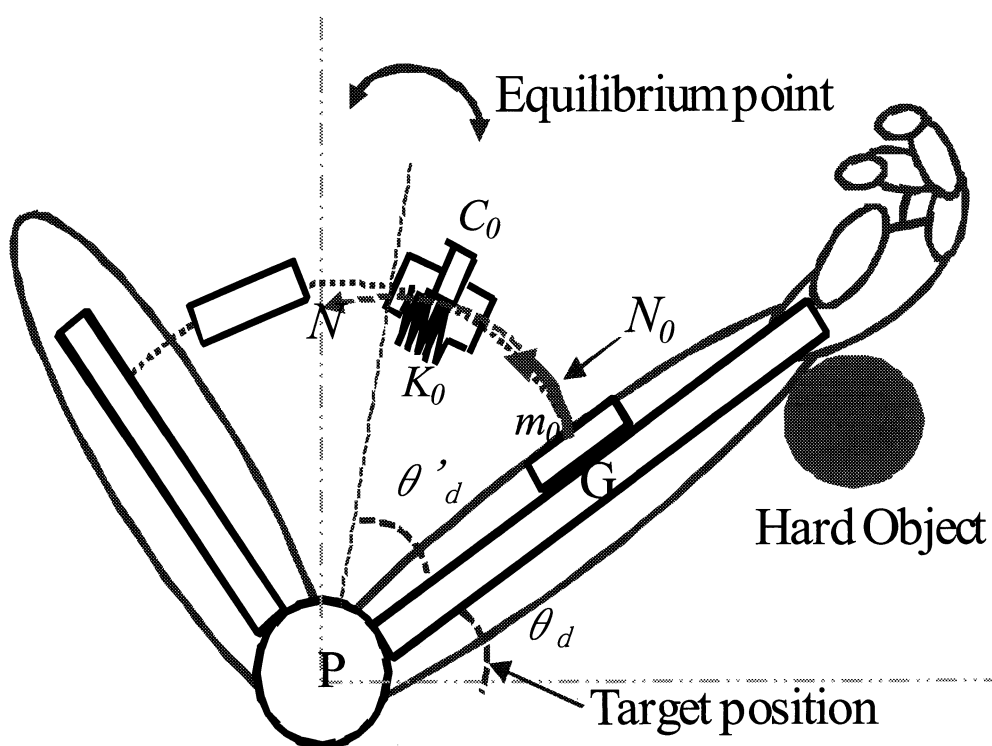


Fig.3.5 Impedance control model of proposed method

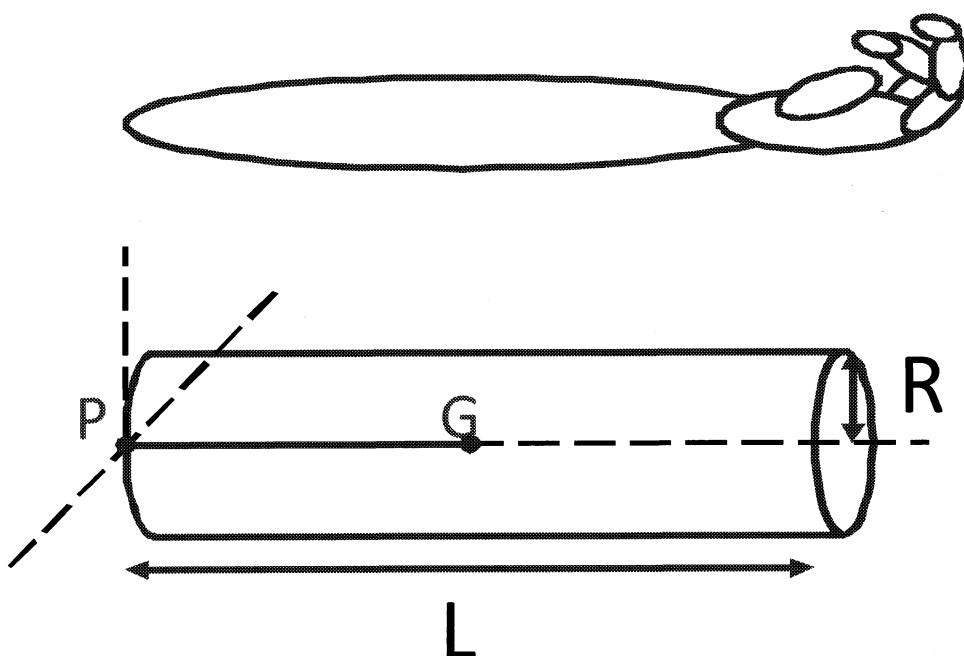


Fig.3.6 Human arm model as a cylinder

Fig.3.6 のように, P 点周りの慣性モーメントは式 (3.12) の J_p で表される.

$$J_e = \frac{m_e R^2}{4} + \frac{m_e L^2}{3} \quad (3.11)$$

$$J_p = J_e + (PG)^2 \quad (3.12)$$

ここで, m_e は前腕の重さ, L は前腕の長さ, R は前腕の半径を表される.

Fig.3.7 に提案するインピーダンス制御のブロック線図を示す. 図中, P_f , P'_0 と P_0 は次式で示す伝達関数である.

$$P_f = \frac{J_p s^2 + C_0 s + K_0}{C_0 s + K_0} \quad (3.13)$$

$$P'_0 = \frac{1}{C_0 s + K_0} \quad (3.14)$$

$$P_0 = \frac{1}{J_p s^2 + C_0 s + K_0} \quad (3.15)$$

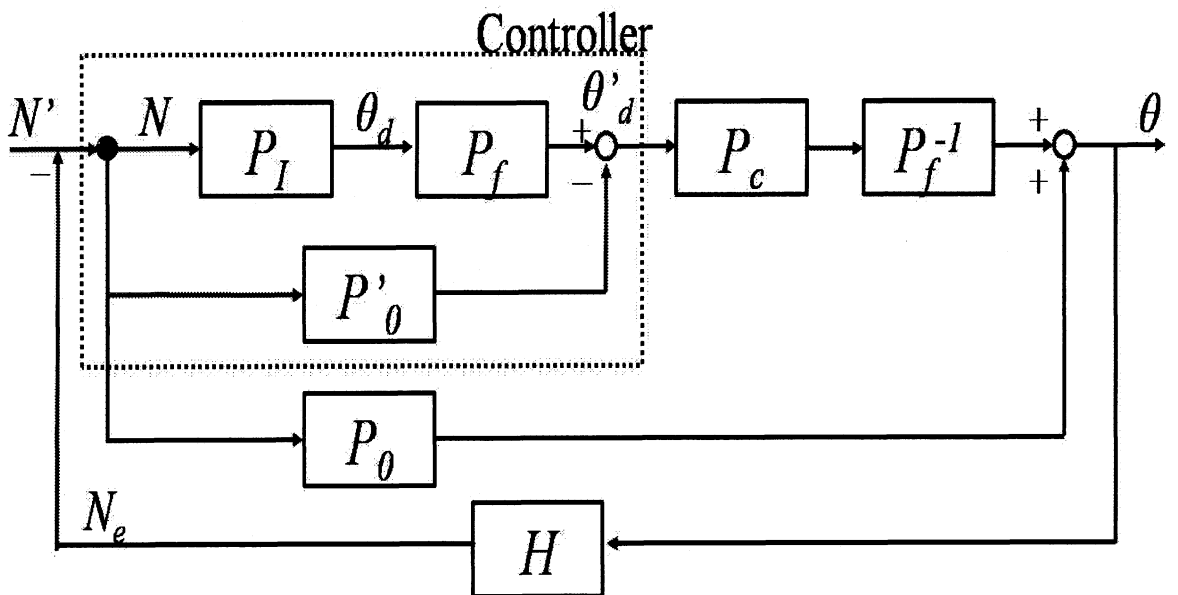


Fig.3.7 Block diagram of the proposed impedance control method

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。有界な入力にたい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ものである特性であり、その伝達関数によって決まる。

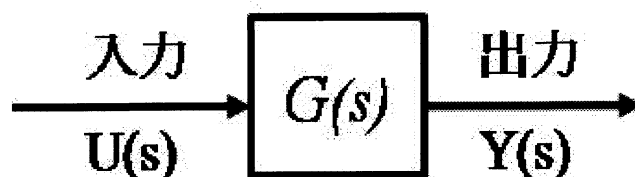


Fig.4.1 An input and output system

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。(4.1) 式の伝達関数の次数伝達関数の分母多項式の次数の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 次の代数方程式の根は 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 ような入力システムがるとする。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

次の 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、次の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次の条件を調べる。
- (2) 係数 $a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0$ をもとに、次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、 $a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0$ を次のように2行にわたって並べる。

第1行	a_n	a_{n-2}	a_{n-4}	\dots
第2行	a_{n-1}	a_{n-3}	a_{n-5}	\dots

- (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 $i+2$ ）を次の規則によってつくる。

第 i 行	x_1	x_2	\cdots	x_k	x_{k+1}	\cdots
第 $i+1$ 行	y_1	y_2	\cdots	y_k	y_{k+1}	\cdots
第 $i+2$ 行	z_1	z_2	\cdots	z_k	z_{k+1}	\cdots

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

(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 N 矩形波状の外乱を入力した場合に，式 (4.3) に示すように，目標インピーダンスにより生成した位置制御の目標値 θ_d と制御を行った出力 θ 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．

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

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

Table5.1, Table5.2 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，上腕がフリーの場合 ($K_e = 30$) と剛体に接触した場合 ($K_e = 6000$) とした⁽⁸⁾．

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， θ'_d が一定になり制御する必要がなくなる．そこでTable4.1, Table4.2 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， θ'_d 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

シミュレーションにより検討した。Table4.3とTable4.4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、環境の剛性 K_e を変化させた場合を示す。また、 T は位置制御の時定数を示す。Table4.5 は目標インピーダンスである C_d , K_d を同時に変化させたものである。Table4.6とTable4.7はそれぞれ目標剛性 K_d と受動要素の剛性 K_0 の変化と目標粘性 C_d と受動要素の粘性 C_0 の変化を示す。

Table4.1 An Example of Simulation Parameter

J_d [N m s ² /rad]	0.08
C_d [N m s/rad]	2
K_d [N m/rad]	10 ~ 40
J_p [N m s ² /rad]	0.0824
C_0 [N m s/rad]	2
K_0 [N m/rad]	30
J_e [N m s ² /rad]	0.0801
C_e [N m s/rad]	2
K_e [N m/rad]	30 6000
T [s]	0.0001 ~ 0.1

Table4.2 An Example of Simulation Parameter

J_d [N m s ² /rad]	0.08
C_d [N m s/rad]	1 ~ 4
K_d [N m/rad]	30
J_p [N m s ² /rad]	0.0824
C_0 [N m s/rad]	2
K_0 [N m/rad]	30
J_e [N m s ² /rad]	0.0801
C_e [N m s/rad]	2
K_e [N m/rad]	30 6000
T [s]	0.0001 ~ 0.1

Table4.3 An Example of Simulation Parameter

J_d [N m s ² /rad]	0.08
C_d [N m s/rad]	2
K_d [N m/rad]	1 ~ 1000
J_p [N m s ² /rad]	0.0824
C_o [N m s/rad]	2
K_o [N m/rad]	30
J_e [N m s ² /rad]	0.0801
C_e [N m s/rad]	2
K_e [N m/rad]	1 ~ 1000
T [s]	0.0001 ~ 0.1

Table4.4 An Example of Simulation Parameter

J_d [N m s ² /rad]	0.08
C_d [N m s/rad]	1 ~ 30
K_d [N m/rad]	30
J_p [N m s ² /rad]	0.0824
C_o [N m s/rad]	2
K_o [N m/rad]	30
J_e [N m s ² /rad]	0.0801
C_e [N m s/rad]	2
K_e [N m/rad]	1 ~ 1000
T [s]	0.0001 ~ 0.1

Table4.5 An Example of Simulation Parameter

J_d [N m s ² /rad]	0.08
C_d [N m s/rad]	1 ~ 30
K_d [N m/rad]	1 ~ 100
J_p [N m s ² /rad]	0.0824
C_o [N m s/rad]	2
K_o [N m/rad]	30
J_e [N m s ² /rad]	0.0801
C_e [N m s/rad]	2
K_e [N m/rad]	30 6000
T [s]	0.0001 ~ 0.1

Table4.6 An Example of Simulation Parameter

J_d [Nm s ² /rad]	0.08
C_d [Nm s/rad]	2
K_d [Nm/rad]	1 ~ 1000
J_p [Nm s ² /rad]	0.0824
C_o [Nm s/rad]	2
K_o [Nm/rad]	1 ~ 1000
J_e [Nm s ² /rad]	0.0801
C_e [Nm s/rad]	2
K_e [Nm/rad]	30 6000
T [s]	0.0001 ~ 0.1

Table4.7 An Example of Simulation Parameter

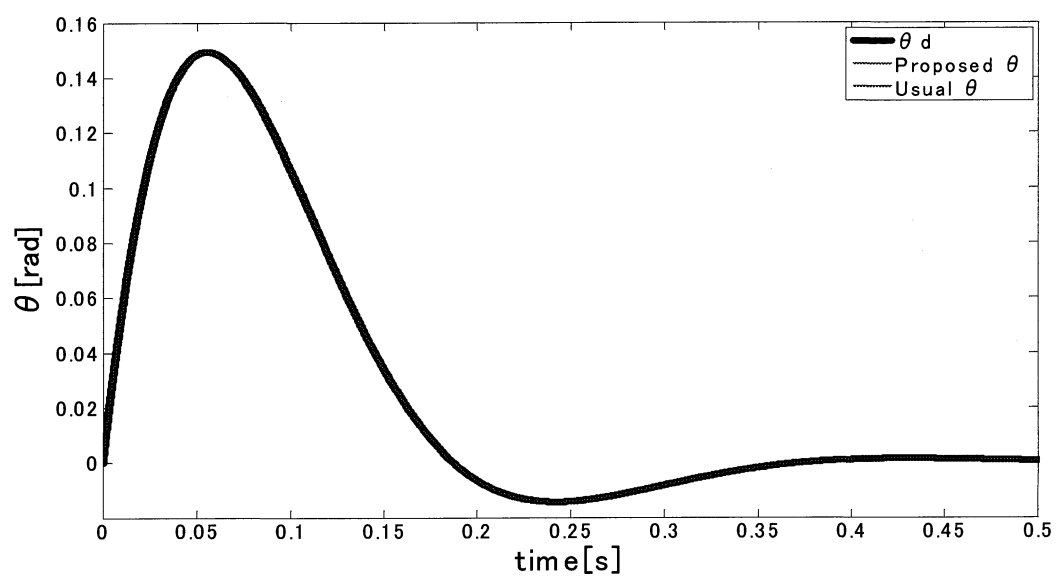
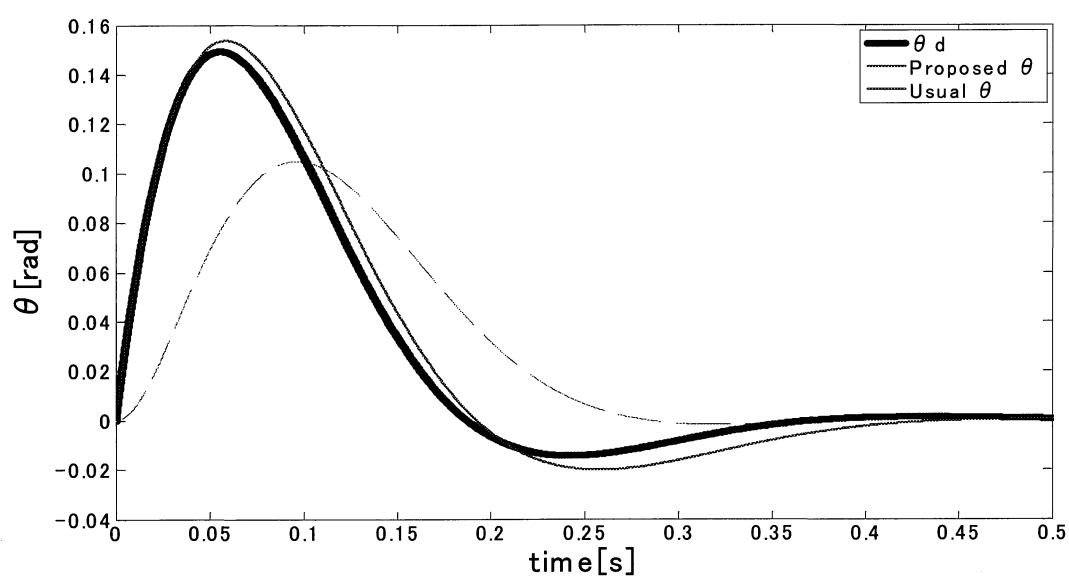
J_d [Nm s ² /rad]	0.08
C_d [Nm s/rad]	1 ~ 30
K_d [Nm/rad]	30
J_p [Nm s ² /rad]	0.0824
C_o [Nm s/rad]	1 ~ 30
K_o [Nm/rad]	30
J_e [Nm s ² /rad]	0.0801
C_e [Nm s/rad]	2
K_e [Nm/rad]	30 6000
T [s]	0.0001 ~ 0.1

4.2.3 シミュレーション結果

Table4.8 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 10, 20, 30, 40, 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 30 である. Fig.4.2 と Fig.4.3 は $K_d = 40$, $K_e = 30$, $T = 0.0001, 0.1$ の時の目標位置 (太い実線), 従来手法の応答 (点線), 提案手法の応答 (細い実線) を示す. Fig.4.4 は $K_d = 10, 20, 30, 40$, $K_e = 30$, $T = 0.01$ の時の従来手法のインパルス応答 (太い実線), 提案手法のインパルス応答 (細い実線) を示す.

Table4.8 Mean error e_m for usual and proposed control method

K_d	T	0.0001	0.001	0.01	0.1
10	Usual	4.09×10^{-4}	0.0406	3.7269	163.0899
	Proposed	5.39×10^{-5}	0.0054	0.563	24.7339
20	Usual	3.94×10^{-4}	0.039	3.5217	136.5596
	Proposed	1.12×10^{-5}	0.0011	0.1124	4.3543
30	Usual	3.90×10^{-4}	0.0385	3.4396	122.481
	Proposed	2.69×10^{-7}	2.62×10^{-5}	0.002	0.0225
40	Usual	3.92×10^{-4}	0.0388	3.4245	113.5725
	Proposed	1.58×10^{-5}	0.0016	0.1453	3.8037

Fig.4.2 Time trajectories of θ_d and θ ($K_d=40, K_e=30, T=0.0001$)Fig.4.3 Time trajectories of θ_d and θ ($K_d=40, K_e=30, T=0.1$)

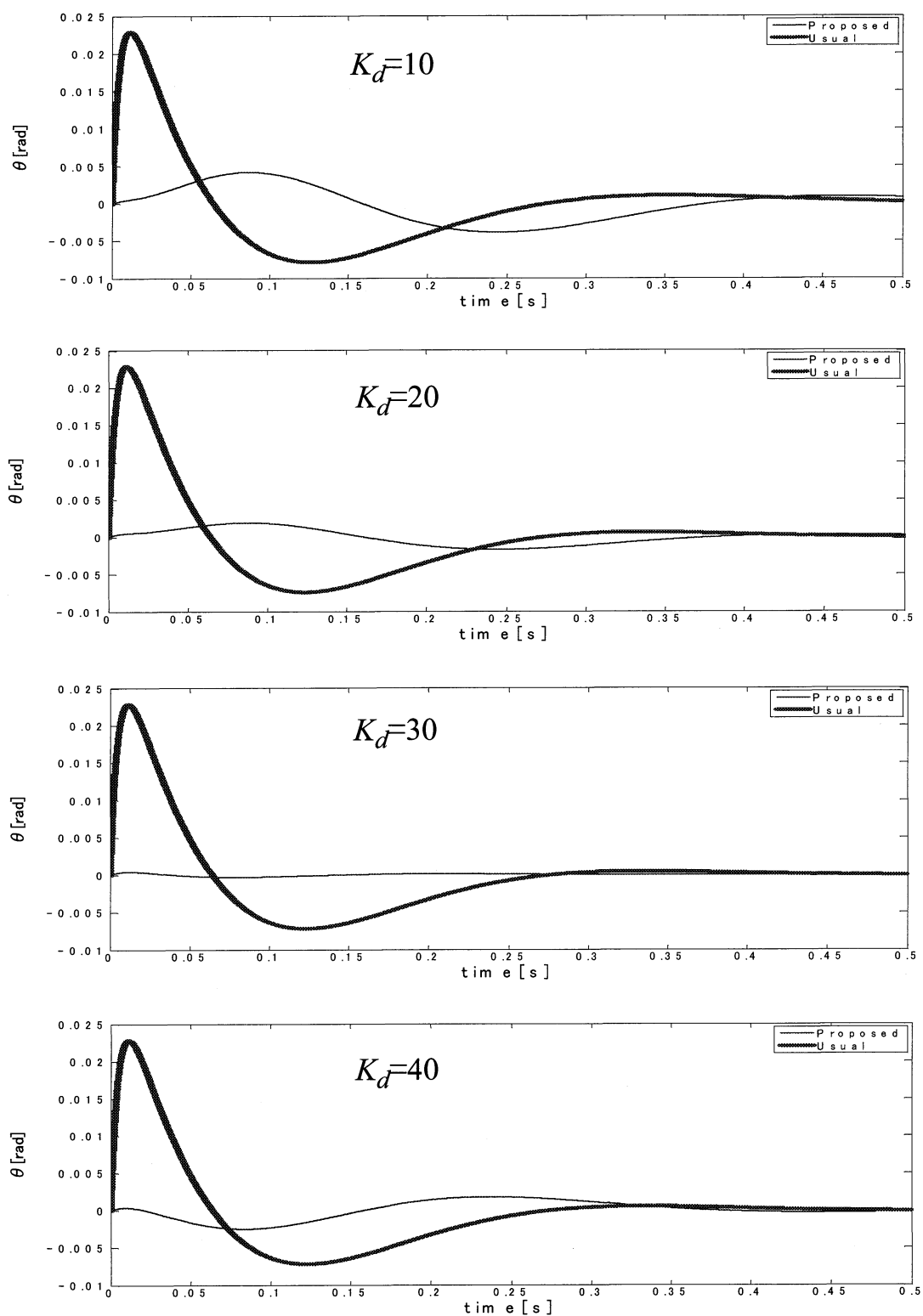
Fig.4.4 Impulse response of usual and proposed($K_e=30$, $T=0.01$)

Table4.9 に目標剛性 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, 2, 3, 4, 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 30 である. Fig.4.5 と Fig.4.6 は $C_d = 3$, $K_e = 30$, $T = 0.0001, 0.1$ の時の目標位置 (太い実線), 従来手法の応答 (点線), 提案手法の応答 (細い実線) を示す. Fig.4.7 は $C_d = 1, 2, 3, 4$, $K_e = 30$, $T = 0.01$ の時の従来手法のインパルス応答 (太い実線), 提案手法のインパルス応答 (細い実線) を示す.

Table4.9 Mean error e_m for usual and proposed control method

C_d	T	0.0001	0.001	0.01	0.1
1	Usual	3.75×10^{-4}	0.0372	3.4151	142.9224
	Proposed	4.43×10^{-5}	0.0044	0.4325	11.7355
2	Usual	3.90×10^{-4}	0.0385	3.4396	122.481
	Proposed	2.69×10^{-7}	2.62×10^{-5}	0.002	0.0225
3	Usual	3.80×10^{-4}	0.0375	3.26	102.4505
	Proposed	4.61×10^{-5}	0.0046	0.4102	6.8411
4	Usual	3.61×10^{-4}	0.0355	3.0034	85.6448
	Proposed	1.66×10^{-4}	0.0165	1.4396	21.1595

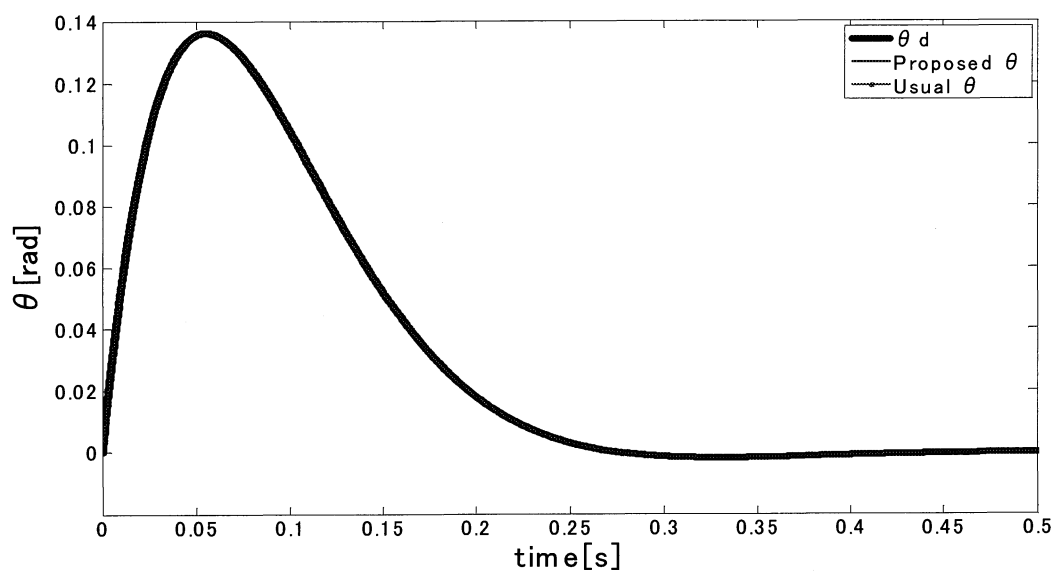


Fig.4.5 Time trajectories of θ_d and θ ($C_d=3, K_e=30, T=0.0001$)

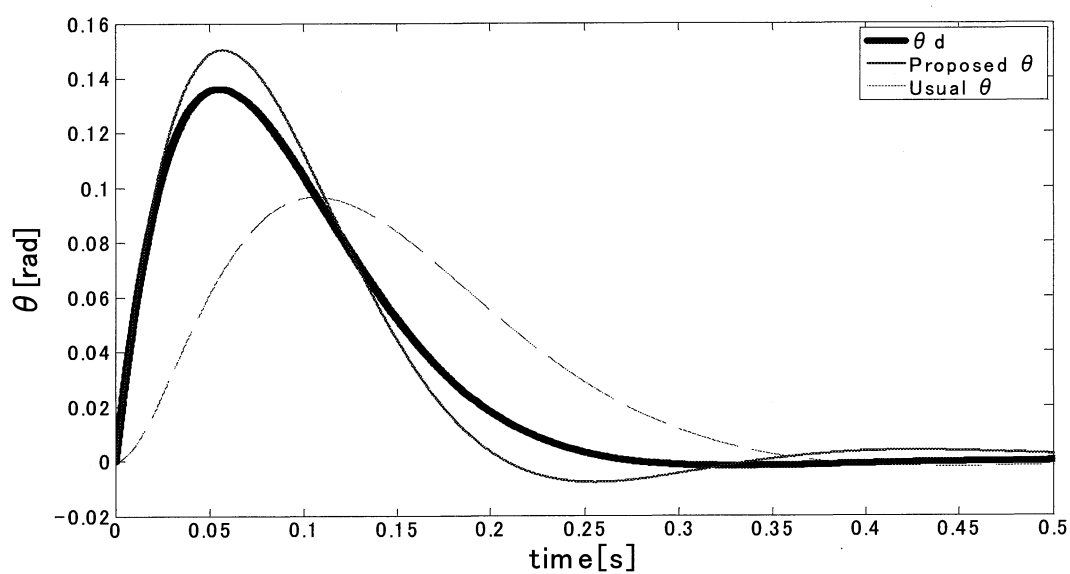


Fig.4.6 Time trajectories of θ_d and θ ($C_d=3, K_e=30, T=0.1$)

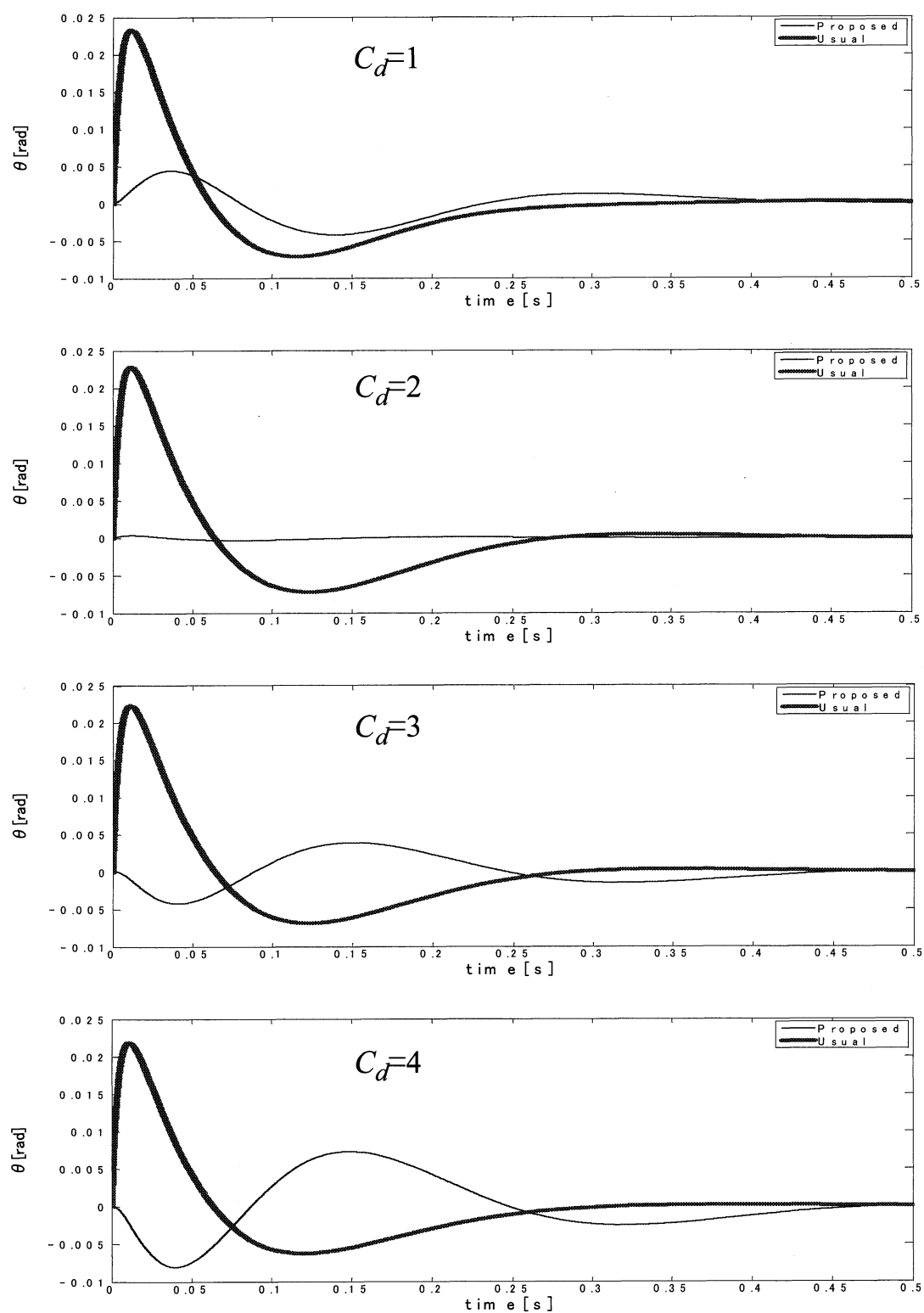
Fig.4.7 Impulse response of usual and proposed($K_e=30$, $T=0.01$)

Table4.10 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 10, 20, 30, 40, 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 6000 である. 剛性 K_e が異なる以外は Table3 と同じである. 表中の *unstable* の表記は, 応答が不安定になり, 計算が求められなかった場合を示す. Fig.4.8 は $K_d = 40$, $K_e = 6000$, $T = 0.1$ の時の目標位置 (細い実線), 従来手法の応答 (点線) を示す. Fig.4.9 は $K_d = 40$, $K_e = 6000$, $T = 0.1$ の時の目標位置 (細い実線), 提案手法の応答 (点線) を示す.

Table4.10 Mean error e_m for usual and proposed control method

K_d	T	0.0001	0.001	0.01	0.1
10	Usual	0.0135	6.4729	<i>unstable</i>	<i>unstable</i>
	Proposed	6.28×10^{-6}	6.17×10^{-4}	0.0139	0.0169
20	usual	0.0134	6.4119	<i>unstable</i>	<i>unstable</i>
	proposed	8.11×10^{-6}	8.01×10^{-4}	0.0183	0.0221
30	usual	0.0134	6.3513	<i>unstable</i>	<i>unstable</i>
	proposed	1.02×10^{-5}	0.001	0.0233	0.028
40	usual	0.0133	6.291	<i>unstable</i>	<i>unstable</i>
	proposed	1.24×10^{-5}	0.0012	0.0289	0.0345

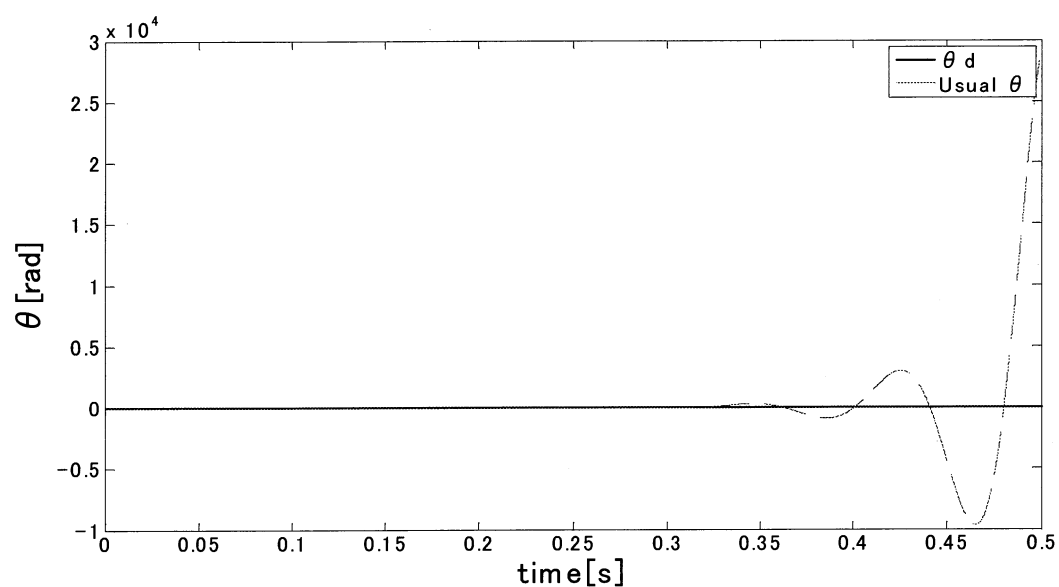


Fig.4.8 Time trajectories of θ_d and Usual θ ($K_d=40, K_e=6000, T=0.1$)

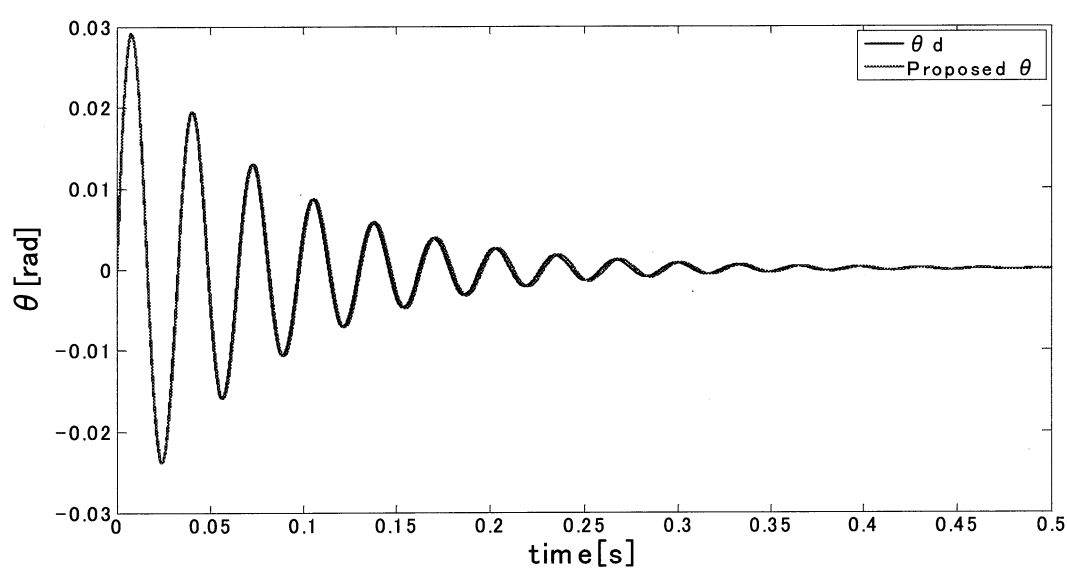


Fig.4.9 Time trajectories of θ_d and Proposed θ ($K_d=40, K_e=6000, T=0.1$)

Table4.11 に目標剛性 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, 2, 3, 4, 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 6000 である. 剛性 K_e が異なる以外は Table4 と同じである. 表中の *unstable* の表記は, 応答が不安定になり, 計算が求められなかった場合を示す. Fig.4.10 は $C_d = 3$, $K_e = 6000$, $T = 0.1$ の時の目標位置 (細い実線), 従来手法の応答 (点線) を示す. Fig.4.11 $C_d = 3$, $K_e = 6000$, $T = 0.1$ の時の目標位置 (細い実線), 提案手法の応答 (点線) を示す.

Table4.11 Mean error e_m for usual and proposed control method

C_d	T	0.0001	0.001	0.01	0.1
1	Usual	0.0321	32.7653	<i>unstable</i>	<i>unstable</i>
	Proposed	1.32×10^{-4}	0.0132	0.229	0.2416
2	Usual	0.0134	6.3513	<i>unstable</i>	<i>unstable</i>
	Proposed	1.02×10^{-5}	0.001	0.0233	0.028
3	Usual	0.0069	2.0606	<i>unstable</i>	<i>unstable</i>
	Proposed	2.94×10^{-5}	0.0029	0.0811	0.1112
4	Usual	0.0041	0.9318	<i>unstable</i>	<i>unstable</i>
	Proposed	6.04×10^{-5}	0.0059	0.1849	0.2861

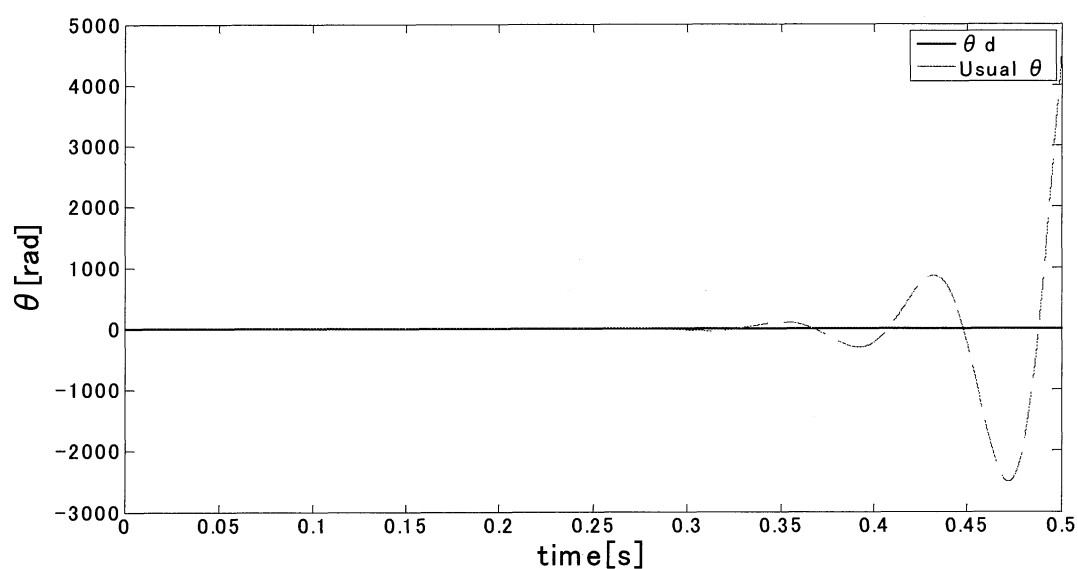


Fig.4.10 Time trajectories of θ_d and Usual θ ($C_d=3, K_e=6000, T=0.1$)

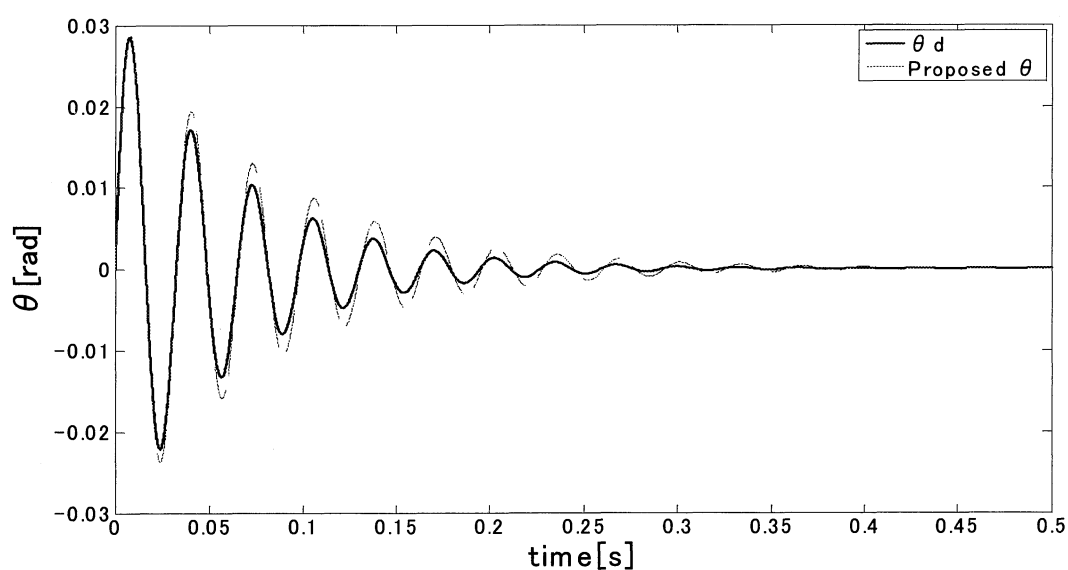


Fig.4.11 Time trajectories of θ_d and Proposed θ ($C_d=3, K_e=6000, T=0.1$)

Table4.3は目標剛性 K_d と環境の剛性 K_e と位置制御の時定数 T を変化させた場合を示す。 K_d は 1 ～ 1000, K_e は 1 ～ 1000, T は 0.0001, 0.001, 0.01, 0.1 と変化させた。 Fig.4.12 と Fig.4.13 はそれぞれ従来手法と提案手法, T は 0.01 の場合の x 軸が環境の剛性 K_e , y 軸が目標剛性 K_d の安定性地域を示す。グラフ中の○と×の記号はシステムが安定と不安定のことを示す。

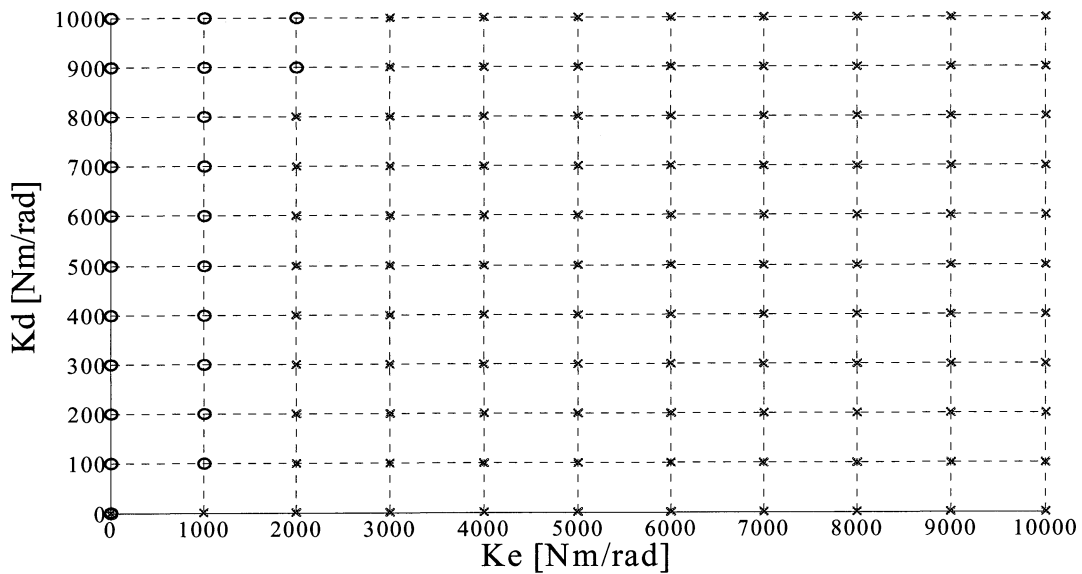


Fig.4.12 The stability region of K_d and K_e (Usual, $T = 0.01$)

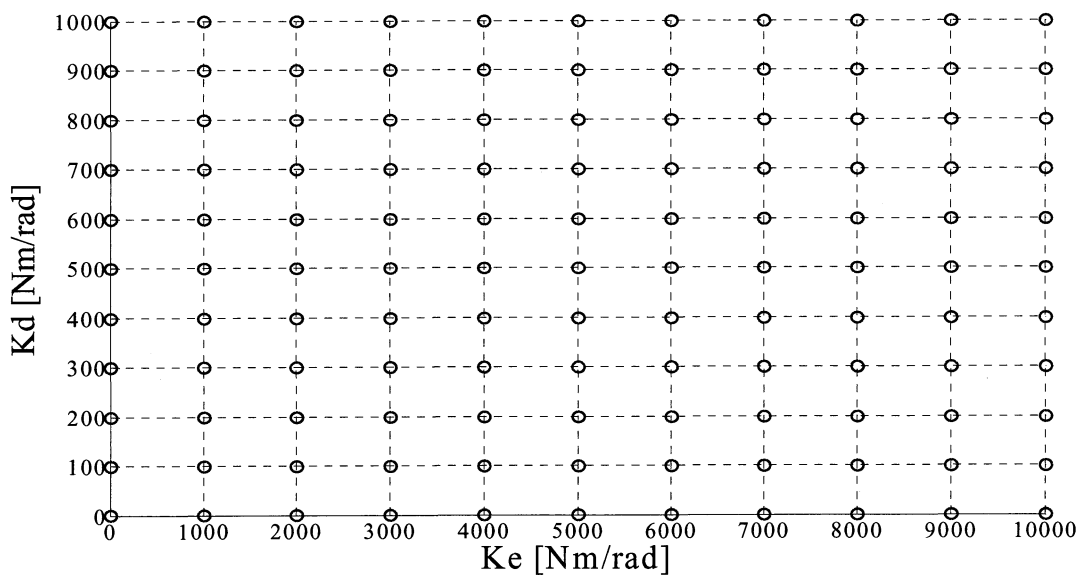


Fig.4.13 The stability region of K_d and K_e (Proposed, $T = 0.01$)

Table4.4は目標粘性 C_d と環境の剛性 K_e と位置制御の時定数 T を変化させた場合を示す。 C_d は1～30, K_e は1～1000, T は0.0001, 0.001, 0.01, 0.1と変化させた。 Fig.4.14 と Fig.4.15 はそれぞれ従来手法と提案手法, T は0.01の場合の x 軸が環境の剛性 K_e , y 軸が目標粘性 C_d の安定性地域を示す。グラフ中の○と×の記号はシステムが安定と不安定のことを示す。

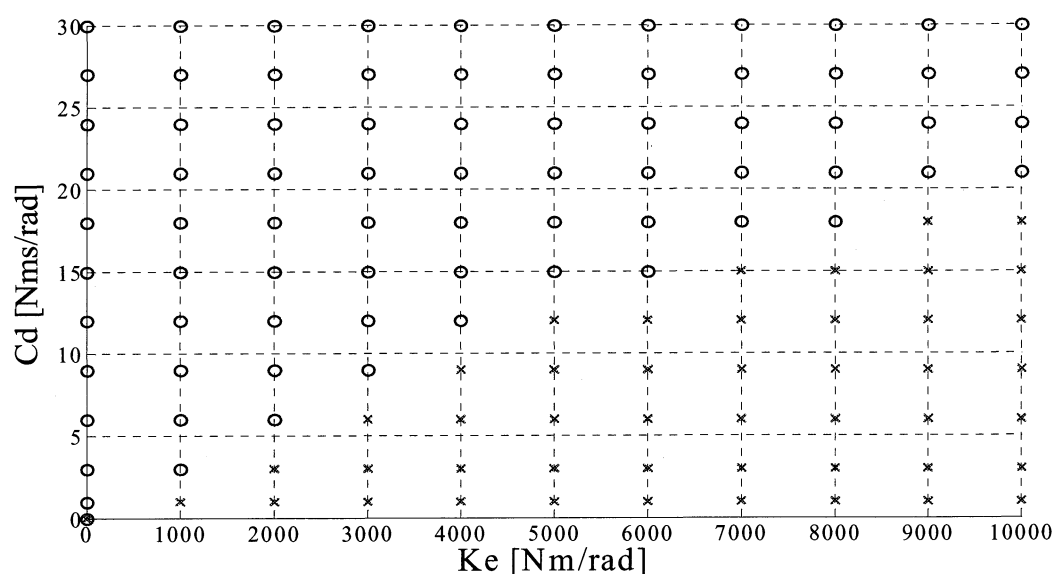


Fig.4.14 The stability region of C_d and K_e (Usual, $T = 0.01$)

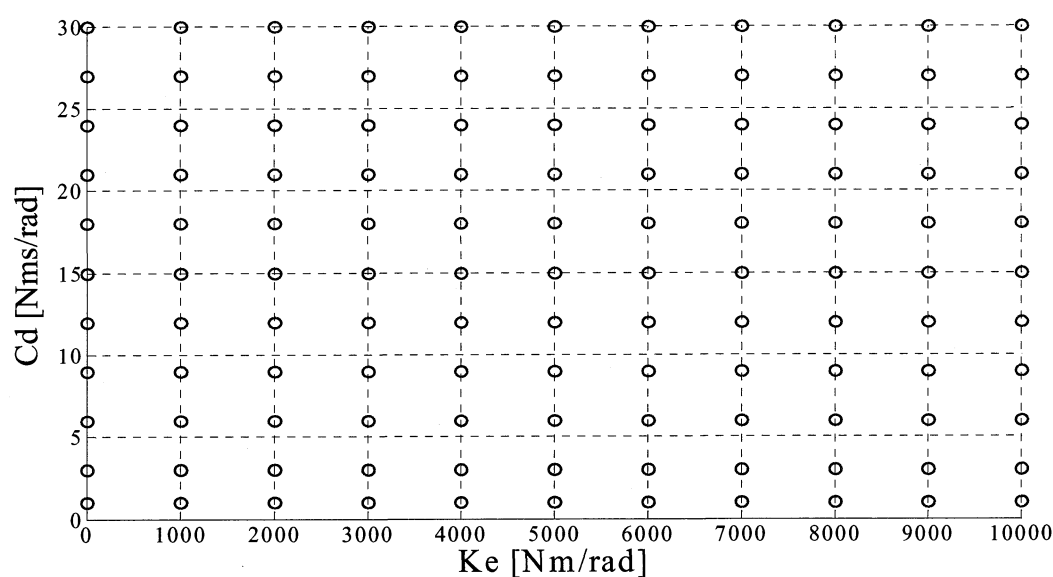


Fig.4.15 The stability region of C_d and K_e (Proposed, $T = 0.01$)

Table4.5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1～30, K_d は1～100, K_e は30と6000, T は0.0001, 0.001, 0.01, 0.1と変化させた。 Fig.4.16 と Fig.4.17 はそれぞれ従来手法と提案手法, T は0.01, K_e は6000の場合の x 軸が環境の剛性 K_d , y 軸が目標粘性 C_d の安定性地域を示す。グラフ中の○と×の記号はシステムが安定と不安定のことを示す。

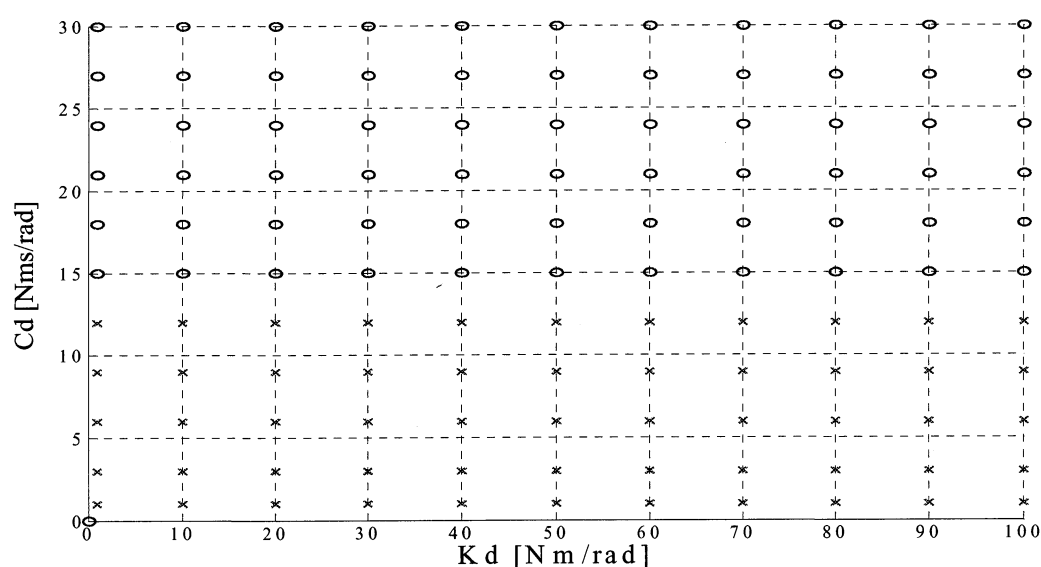


Fig.4.16 The stability region of C_d and K_d (Usual, $K_e=6000$, $T=0.01$)

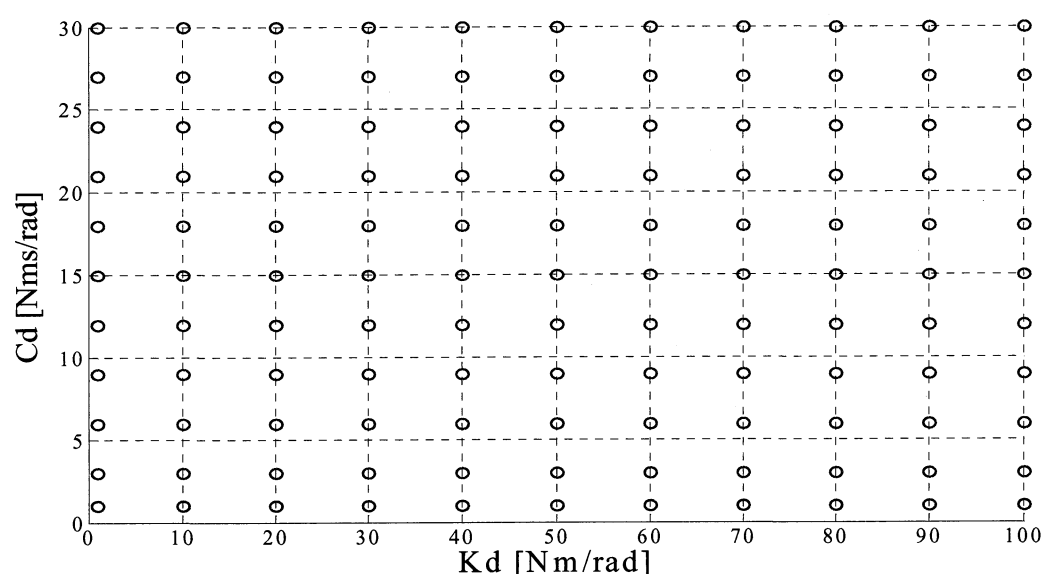


Fig.4.17 The stability region of C_d and K_d (Proposed, $K_e=6000$, $T=0.01$)

Table4.6は目標剛性 K_d と受動要素の剛性 K_0 と位置制御の時定数 T を変化させた場合を示す. K_d は1～1000, K_0 は1～1000, K_e は30と6000, T は0.0001, 0.001, 0.01, 0.1と変化させた. Fig.4.18とFig.4.19はそれぞれ $T = 0.01$ と0.1, K_e は6000の場合の x 軸が環境の剛性 K_0 , y 軸が目標剛性 K_d の安定性地域を示す. グラフ中の○と×の記号はシステムが安定と不安定のことを示す.

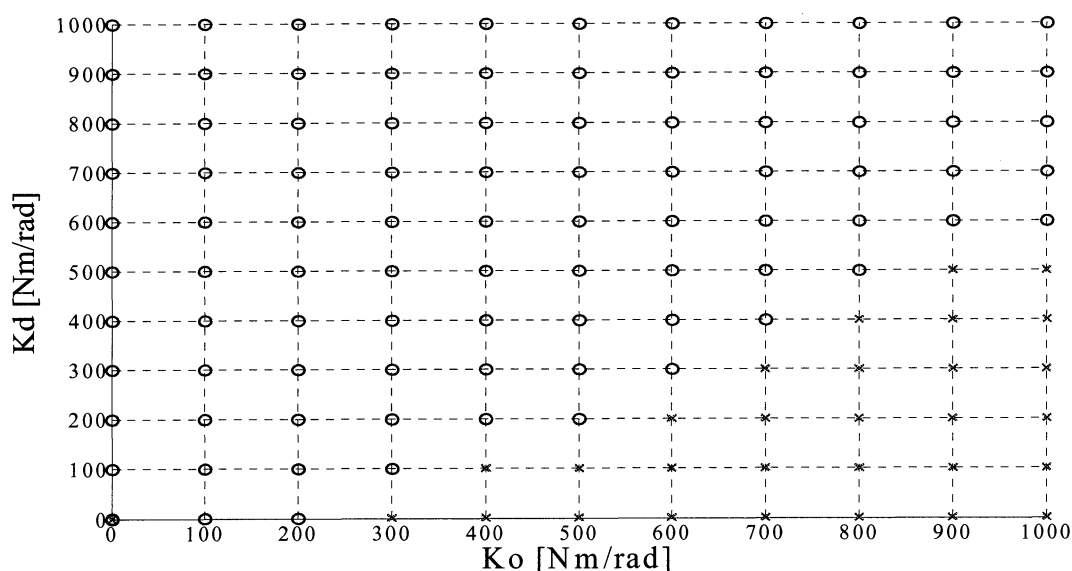


Fig.4.18 The stability region of K_d and K_0 (Proposed, $K_e = 6000$, $T = 0.01$)

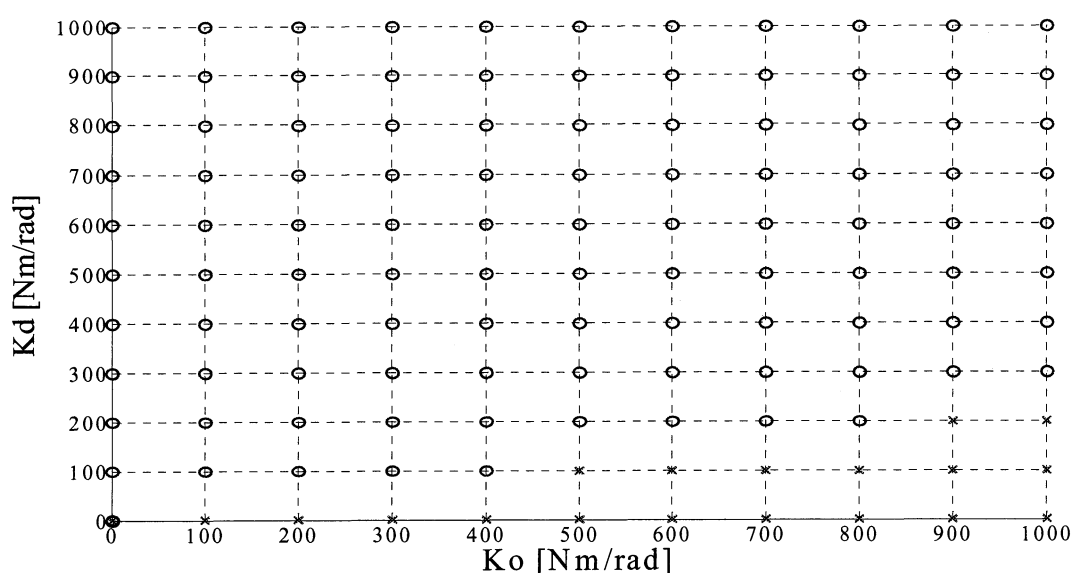


Fig.4.19 The stability region of K_d and K_0 (Proposed, $K_e = 6000$, $T = 0.1$)

Table4.7は目標粘性 C_d と受動要素の粘性 C_0 と位置制御の時定数 T を変化させた場合を示す. C_d は1~30, C_0 は1~30, K_e は30と6000, T は0.0001, 0.001, 0.01, 0.1 と変化させた. Fig.4.20 と Fig.4.21 はそれぞれ $T = 0.01$ と 0.1, K_e は 6000 の場合の x 軸が環境の粘性性 C_0 , y 軸が目標粘性 C_d の安定性地域を示す. グラフ中の○と×の記号はシステムが安定と不安定のことを示す.

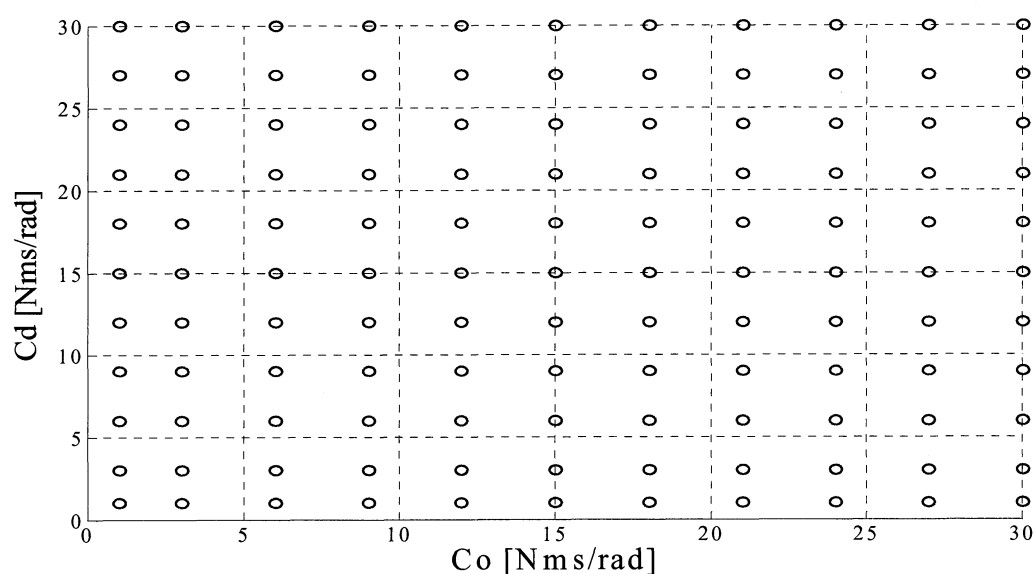


Fig.4.20 The stability region of C_d and C_0 (Proposed, $K_e = 6000$, $T = 0.01$)

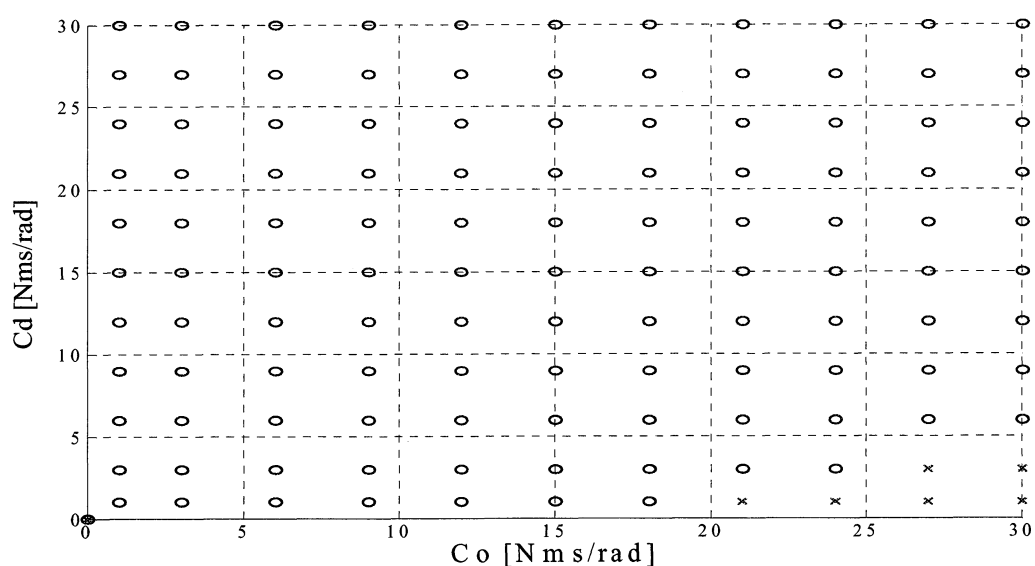


Fig.4.21 The stability region of C_d and C_0 (Proposed, $K_e = 6000$, $T = 0.1$)

4.2.4 考察

Table4.8 から分かるように、位置制御の時定数 T が大きくなっても提案手法の方が従来手法の方より目標誤差 e_m が小さくなることが分かる。Fig.4.2 と Fig.4.3 は位置制御系の時定数 T が大きいいため、従来の手法では、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。Fig.4.4 は目標剛性 K_d が $30[\text{Nm/rad}]$ の時に目標誤差 e_m が一番小さくなることが分かる。これは、目標インピーダンスの値と受動要素の値が同じからである。

先ほどと同じに Table4.9 では、位置制御の時定数 T が大きくなっても提案手法の方が従来手法の方より目標誤差 e_m が小さくなることが分かる。Fig.4.5 と Fig.4.6 は位置制御系の時定数 T が大きいいため、従来の手法では、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。Fig.4.7 は目標粘性 C_d が $2[\text{Nms/rad}]$ の時に目標誤差 e_m が一番小さくなることが分かる。これは、目標インピーダンスの値と受動要素の値が同じからである。

Table4.10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 0.01 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、位置制御の時定数 T が大きくなっても提案手法の方が従来手法の方より目標誤差 e_m が小さくなることが分かる。

Table4.11に示すように、先ほどと同じ、目標粘性 C_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 0.01 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、位置制御の時定数 T が大きくなっても提案手法の方が従来手法の方より目標誤差 e_m が小さくなることが分かる。

Fig.4.12 から分かるように、従来手法では、目標剛性 K_d の変化と共に環境の剛性 K_e が大きくなっていくと、システムが不安定になっていくことが分かる。逆に、提案手法では、Fig.4.13 に示すように、すべてが安定になっている。

次に Fig.4.14 から分かるように、従来手法では、目標粘性 C_d が小さい場合、環境の剛性 K_e が大きくなっていくと、システムが不安定になっていくことが分かる。目標粘性 C_d が大きくすればシステムが安定となるが、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、Fig.4.15 に示すように、提案手法では、いずれも安定になっており、提案手法の有効性が検討された。

Fig.4.16 では、従来手法の場合、目標粘性 C_d が 15[Nms/rad] 以下になると、システムが不安定となり、15[Nms/rad] 以上になっていくと、システムが安定になるが、先と言ったように、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、Fig.4.17 に示すように、提案手法では、いずれも安定になっており、提案手法の有効性が検討された。

Fig.4.18 と Fig.4.19 では、目標剛性 K_d が 100[Nm/rad] 以下の場合、位置制御の時定数 T が大きくなっていくと、システムが不安定となることが分かる。これに対して、受動要素の剛性 K_0 が 100[Nm/rad] 以下が設定すれば、目標剛性 K_d が大きくなっても、システムが安定になることが分かる。

Fig.4.20 と Fig.4.21 では、目標粘性 C_d が 5[Nms/rad] 以下の場合、位置制御の時定数 T が大きくなっていくと、システムが不安定となることが分かる。これに対して、受動要素の粘性 C_0 が 20[Nms/rad] が設定すれば、目標粘性 C_d が大きくなっても、システムが安定になることが分かる。

第5章

結言

本論文では肘のパワーアシスト装置を対象とし，従来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討した．本論文により得られた結論を以下に示す．

- (1) 位置制御の時定数 T が大きくなっても提案手法の方が従来手法の方より目標誤差 e_m が小さくなり，環境の剛性 K_e が大きくなっていくとシステム不安定にならないことが分かる．そして，目標インピーダンスの値と受動要素の値が同じであると，目標誤差 e_m が一番小さくなることがわかる．
- (2) 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．
- (3) 従来手法では，目標粘性 C_d が大きくなったらシステムが安定となるが，，操作の抵抗感が大きくなり，操作性が悪くなってしまう．
- (4) 受動要素の値が大きくなっていくと，システムが不安定になりやすい．受動要素の値が小さく設定すれば目標インピーダンスが大きくなってもシステムが不安定にならない．

今回の課題としては，提案手法の有効性を実験的に検討し，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, 舘暲: 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) K. Hase, K. Miyashita, 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)
- (5) 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)
- (6) A. シェフラー S. シュミット: からだの構造と機能
- (7) 伊藤宏司 伊藤正美: 生体とロボットにおける運動制御
- (8) Yangming Xu and M. Hollerbach : “Identification of Human Joint Mechancal Properties from Single Trial Data”, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol.45,No.8,1998,pp.1051-1060
- (9) 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.413-418J.

謝辞

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

主に研究室内発表の場において、鋭いご指摘をいただきました、早川聡一郎准教授ならびに水谷一樹先生に感謝の意を表すとともに、今後のご活躍をお祈りさせていただきます。

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加藤光廣助教に深く感謝しています。

指導力がなく、未熟な私に最後まで付いてきていただき、ともに厳しい研究生生活を乗り越えてくれました、B4の清水輝君に感謝するとともに、今後のご活躍をお祈りさせていただきます。

修士課程の2年間、時には共に遊び、時には研究の相談にのっていただきました、M2の石本唯常君、野邊雅也君、藤田哲矢君、矢野岳水君に深く感謝するとともに、今後ますますのご活躍をお祈りさせていただきます。

最後となりましたが、共に楽しい研究室生活を送っていただきました、システム設計研究室の皆様にも多大なる感謝の意を表すとともに、皆様の今後ますますのご発展をお祈りさせていただき、本論文の結びとさせていただきます。