

NAIST-IS-DD0661007

博士論文

適応環境オブザーバを用いた遠隔操作システムに
関する研究

柿添 有紀

2009年3月9日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報システム学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
博士(工学) 授与の要件として提出した博士論文である。

柿添 有紀

審査委員：

西谷 紘一 教授 (主指導教員)

小笠原 司 教授 (副指導教員)

中村 文一 助教 (副指導教員)

適応環境オブザーバを用いた遠隔操作システムに 関する研究*

柿添 有紀

内容梗概

ロボットマニピュレータを用いた遠隔操作システムでは通信回線を介して情報通信を行うため、通信遅延が発生し、安定性、操作性上の問題が発生する。従来の研究は操作性に着目した研究と安定性に着目した研究とに大別され、安定性と操作性を両立させた研究は少ない。安定性に着目した研究事例として、受動性の原理やロバスト制御を用いた方法がある。これらの方法はどのような通信遅延に対しても安定性を保証するが、作業環境の情報を正確に操作者に伝えることが困難である。一方、操作性に着目した研究事例として、作業環境モデルを用いる方法がある。このシステムは作業環境情報をシステム内に組み込み、操作者は作業環境情報を元に遠隔マニピュレータを操作するため通信遅延の影響を考慮しなくとも良い。また、コンピュータグラフィックスを用いた視覚的補助や作業環境モデルに基づいた反力提示を行うことで良好な操作性を保持している。しかしながら、このシステムは予め作業環境情報を組み込むことを必要とするため、環境情報に誤差が存在する場合には十分な制御性能を発揮することができなくなる。また、操作性に着目した研究は理論的に安定性を保証していない場合が多く、不安定化する恐れがある。加えて、より良好な環境情報提示を行うためには厳密な位置状態と力状態の同期、ならびに作業環境の剛性と歪情報を再現することによる力覚情報の提示が必要である。しかしながら、従来の研究ではこれらが達成されていない。

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報システム学専攻 博士論文, NAIST-IS-DD0661007, 2009年3月9日.

それゆえ、本研究では安定で操作性の良い新しいシステム構成および制御法を提案する。

提案する方法は、従来の作業環境情報の組込み型遠隔操作システムに対して、適応環境オブザーバによる剛性と初期接触点の推定による作業環境の力覚情報の再現を行う。また、作業環境情報の動的な推定を行うことにより、環境モデルの誤差の影響も解消する。加えて、位置と力のハイブリッド制御則の採用により、厳密な力状態の追従も保証することで操作者に対して厳密な環境情報提示を行うことができる。その際の環境モデルとしてシンプルなコンプライアント環境モデルを採用する。このモデルはバネ項と位置の歪から構成され、触診など力情報の精密な提示が必要な分野への応用に適している。また、コンプライアント環境モデルを用いた高精度のモデルベース力追従制御が適用可能であり、様々な面で遠隔操作システムでの適用に有利である。コンプライアント環境モデルを用いる力追従制御は汎用的な用途に使用可能であり、本研究で提案する方法も多様な用途への応用が期待される。

さらに重要な役割を果たす適応環境オブザーバの設計法として、2通りの方法を示し、実験により有効性を確かめる。一方は、従来からあるリアプノフ関数を用いた設計法で、厳密な力追従と1cm程度の精度での環境提示が可能であり、簡単なゲイン設定で環境推定および制御を行うことができる。他方は、時間軸変換を用いる方法で、これによって非線形なオブザーバに対して線形な誤差システムが導出でき、線形制御理論をベースとして過渡応答、振動特性などを自由に調整することができる。また、ある程度の非線形性を持つ作業環境に対しても振動性の少ない環境推定を行うことができ、安定で数mm程度の精度で良好な作業環境提示ができる。二台のロボットマニピュレータ(PA-10)と力・モーメントセンサを用い、仮想的に1秒間の通信遅延を発生させ、提案した二つの方法で設計した適応環境オブザーバを用いた実験を行い、提案手法の有効性を確認した。この結果、通信遅延下においても安定で操作性の良い遠隔操作システムを構成できることがわかった。

キーワード

バイラテラルシステム, 通信遅れ補償, ハイブリッド制御, 適応環境オブザーバ

Remote Hybrid Controller with Adaptive Environment Observer*

Yuki Kakizoe

Abstract

Along with the development and spread of information technology, remote controlled manipulation systems using communication networks have attracted attention in recent years. Such systems are expected to be useful for application to work in dangerous environments such as nuclear reactors.

Bilateral tele-manipulation systems often become unstable because of slight information transmission delay. The following elements under information transmission delay cause instability to the systems: closed loop elements and direct force feedback elements. However, it is difficult to design control systems to track states of robots that do not include those two elements. Additionally, all systems proposed until now do not achieve both stability and operability, and past studies reveal that model based predictive feedback is required for improving the operability for the system under information transmission delay. In the research of tele-robotics, operability depends on the tracking of both states of robots. For tracking of forces and precise force presence, the system is equipped with an environment model that consists of spring and position, and because of that model, the system can be adapted model based force tracking control.

Therefore, we propose a method of remote bilateral-control of master-slave manipulators with an adaptive environment observer. The system performs real

*Doctoral Dissertation, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-DD0661007, March 9, 2009.

time estimation of actual characteristics of the remote environment, and real time construction for a remote environment model. Therefore, the adaptive environment observer estimates the model of the remote environment. Because of these, the system can give the presence of the environment precisely, and compensate for the effects of information transmission delay at the point of operability. Focusing on improvement of operability and tracking states, the system is equipped with position/force hybrid control. Because of that hybrid control and estimated environment model, transparency of forces of the system is also improved.

The author proposes two types of adaptive environment observers, and compares the performance. The first one is designed by simple Lyapunov function, and the observer can be designed to estimate their gains simply. The framework of the time scale transformation is used to design the second one, and the observer can estimate their estimation parameters with no oscillations. Comparing the two methods, the second one performs more precise position tracking than the first, and the second method has superior environment presence.

However, the system requires some assumptions to achieve control objectives as follows: it works only in a compliant remote environment and does not cause network disturbances on the communication of each manipulator, and for simplification of the discussions, the authors only designed the system and confirmed its experimental results for 1-dof motion of the manipulators.

The proposed system exhibits good operability and tracking when the slave system presses a compliant wall under the condition of information transmission delay. We confirm the effectiveness and safety of the proposed system by experiments using two robot manipulators and force-moment sensors.

Keywords:

bilateral control , information transmission delay , hybrid control, adaptive environment observer

目次

1. 序論	1
2. 基礎事項	4
2.1 マスタ・スレーブシステム	4
2.2 速度制御方式	5
2.3 インピーダンス制御	6
2.4 通信外乱	6
2.5 ハイブリッド制御則を用いた遠隔操作システム [9]	7
2.5.1 マスタシステムの制御則	9
2.5.2 スレーブシステムの制御則	10
3. 適応環境オブザーバを用いた遠隔操作システム	11
3.1 コンプライアント環境モデル	14
3.2 マスタシステムの制御	16
3.3 スレーブシステムの制御	17
3.4 システムの安定性解析	18
3.4.1 マスタシステムの安定性解析	18
3.4.2 スレーブシステムの安定性解析	19
3.4.3 システム全体の安定性解析	20
3.5 実機による評価	21
3.5.1 視覚情報の扱いについて	21
3.5.2 実験装置	22
3.5.3 測定方法	25
3.5.4 実験パラメータ	25
3.5.5 Free Motion の実験結果	26
4. リアプノフ関数を用いた適応環境オブザーバの設計	27
4.1 適応環境オブザーバの収束性	28
4.2 オブザーバゲインの設計	29

4.3	適応環境オブザーバの実験結果	30
4.3.1	操作力を一定に保った場合の Constrained motion の実験結果	30
4.3.2	操作力を変動させた場合の Constrained motion の実験結果	36
4.4	制御則切替時の安定性の確認	41
4.5	適応環境オブザーバのまとめ	43
5.	時間軸変換を用いた適応オブザーバの設計	44
5.1	適応環境オブザーバの収束性	45
5.2	オブザーバゲインの設計	47
5.3	適応環境オブザーバの実験結果	48
5.3.1	操作力を一定に保った場合の Constrained motion の実験結果	48
5.3.2	操作力を変動させた場合の Constrained motion の実験結果	53
5.4	制御則切替時の安定性の確認	58
5.5	適応環境オブザーバのまとめ	60
6.	結論	61
	参考文献	63
	謝辞	65

目 次

1	マスタ・スレーブシステム	4
2	ハイブリッド制御則を用いた遠隔操作システム	8
3	適応環境オブザーバを用いた遠隔操作システム	13
4	非接触モデル	15
5	接触モデル	15
6	ブロック線図 ($f_h = 0$)	20
7	実機概略	23
8	入力装置	23
9	作業装置	23
10	間接角度とリンク長	24
11	位置の定義	24
12	free motion の位置追従結果	26
13	適応環境オブザーバ A を用いて一定力を印加した場合の x_m, x_s, \hat{x}_0 の実験結果	33
14	適応環境オブザーバ A を用いて一定力を印加した場合の $-f_h, f_e$ の実験結果	33
15	適応環境オブザーバ A を用いて一定力を印加した場合の \hat{f}_e の推定結果	34
16	適応環境オブザーバ A を用いて一定力を印加した場合の $\hat{\gamma}^{-1}$ の推定結果	34
17	適応環境オブザーバ A を用いて一定力を印加した場合の $\hat{\gamma}^{-1}$ の推定速度評価	35
18	適応環境オブザーバ A を用いて一定力を印加した場合の \hat{x}_0 の推定速度評価	35
19	適応環境オブザーバ A を用いて変動力を印加した場合の x_m, x_s, \hat{x}_0 の実験結果	38
20	適応環境オブザーバ A を用いて変動力を印加した場合の $-f_h, f_e$ の実験結果	38

21	適応環境オブザーバ A を用いて変動力を印加した場合の \hat{f}_e の推定結果	39
22	適応環境オブザーバ A を用いて変動力を印加した場合の $\hat{\gamma}^{-1}$ の推定結果	39
23	適応環境オブザーバ A を用いて変動力を印加した場合の $\hat{\gamma}^{-1}$ の推定速度評価	40
24	適応環境オブザーバ A を用いて変動力を印加した場合の \hat{x}_0 の推定速度評価	40
25	適応環境オブザーバ A を用いて制御則切替を繰り返して行った場合の x_m, x_s の実験結果	42
26	適応環境オブザーバ A を用いて制御則切替を繰り返して行った場合の $-f_h, f_e$ の実験結果	42
27	適応環境オブザーバ B を用いて一定力を印加した場合の x_m, x_s, \hat{x}_0 の実験結果	50
28	適応環境オブザーバ B を用いて一定力を印加した場合の $-f_h, f_e$ の実験結果	50
29	適応環境オブザーバ B を用いて一定力を印加した場合の \hat{f}_e の推定結果	51
30	適応環境オブザーバ B を用いて一定力を印加した場合の $\hat{\gamma}^{-1}$ の推定結果	51
31	適応環境オブザーバ B を用いて一定力を印加した場合の $\hat{\gamma}^{-1}$ の推定速度評価	52
32	適応環境オブザーバ B を用いて一定力を印加した場合の \hat{x}_0 の推定速度評価	52
33	適応環境オブザーバ B を用いて変動力を印加した場合の x_m, x_s, \hat{x}_0 の実験結果	55
34	適応環境オブザーバ B を用いて変動力を印加した場合の $-f_h, f_e$ の実験結果	55

35	適応環境オブザーバ B を用いて変動力を印加した場合の \hat{f}_e の実験結果	56
36	適応環境オブザーバ B を用いて変動力を印加した場合の $\hat{\gamma}^{-1}$ の実験結果	56
37	適応環境オブザーバ B を用いて変動力を印加した場合の $\hat{\gamma}^{-1}$ の推定速度評価	57
38	適応環境オブザーバ B を用いて変動力を印加した場合の \hat{x}_0 の推定速度評価	57
39	適応環境オブザーバ B を用いて制御則切替を繰り返して行った場合の x_m, x_s の実験結果	59
40	適応環境オブザーバ B を用いて制御則切替を繰り返して行った場合の $-f_h, f_e$ の実験結果	59

表 目 次

1	過去の研究の利点と問題点	1
2	マニピュレータのリンク長さ: l_0, l_2, l_4, l_6	22
3	制御ゲイン k_s, k_f , インピーダンスパラメータ m, d	25
4	リアプノフ関数を用いた方法のオブザーバゲイン k_1, k_2 , 推定初期値 $\hat{\gamma}^{-1}(0)$ と上界値 γ^+ と下界値 γ^-	30
5	適応環境オブザーバを用いない場合の制御パラメータ	30
6	適応環境オブザーバ A を用いて一定力を印加した場合の位置の誤差平均と誤差分散	32
7	適応環境オブザーバ A を用いて一定力を印加した場合の力の誤差平均と誤差分散	32
8	適応環境オブザーバ A を用いて一定力を印加した場合の $\hat{\gamma}^{-1}, \hat{x}_0$ の推定速度評価	32
9	適応環境オブザーバ A を用いて変動力を印加した場合の位置の誤差平均と誤差分散	37

10	適応環境オブザーバ A を用いて変動力を印加した場合の力の誤差平均と誤差分散	37
11	適応環境オブザーバ A を用いて変動力を印加した場合の $\hat{\gamma}^{-1}$, \hat{x}_0 の推定速度評価	37
12	時間軸変換を用いた方法のオブザーバゲイン k_1 , k_2 , 推定初期値 $\hat{\gamma}^{-1}(0)$ と上界値 γ^+ と下界値 γ^-	48
13	適応環境オブザーバ B を用いて一定力を印加した場合の位置の誤差平均と誤差分散	49
14	適応環境オブザーバ B を用いて一定力を印加した場合の力の誤差平均と誤差分散	49
15	適応環境オブザーバ B を用いて一定力を印加した場合の $\hat{\gamma}^{-1}$, \hat{x}_0 の推定速度評価	49
16	適応環境オブザーバ B を用いて変動力を印加した場合の位置の誤差平均と誤差分散	54
17	適応環境オブザーバ B を用いて変動力を印加した場合の力の誤差平均と誤差分散	54
18	適応環境オブザーバ B を用いて変動力を印加した場合の $\hat{\gamma}^{-1}$, \hat{x}_0 の収束速度評価	54

1. 序論

汚染された原子力施設や宇宙空間など人が直接赴くことのできないような環境での作業を遠隔マニピュレーションシステムを用いて行う必要がある。[1] 従来の情報通信技術では通信の不確定性やコンピュータの機能不足などのために実現が難しかったが、近年の技術革新により、遠隔操作システムを実現するための基盤技術が整いつつある。このようなシステムの技術的課題として通信遅延を含むことで起きる不安定化や操作性の劣化などがあげられる。過去に行われた研究は通信遅延に対する安定化と操作性の向上に着目したものが多く、遠隔操作システムを用いて操作性を向上させるためには位置と力情報が相互に追従する必要がある。しかし、過去の研究から通信遅延情報を含む閉ループ要素や力情報のフィードバック要素を含むシステムが不安定となることが分かっており、これらの要素を含まずに厳密に状態追従できる制御系を構成することは難しい。

表1に過去の研究の問題点と利点をまとめる。なお、本研究では操作性の評価指標として力および位置情報の追従を採用する。これは操作者が環境を認識する際にロボットの状態を介して認識するためであり、状態の追従性が環境の認識性に影響するためである。

表1 過去の研究の利点と問題点

	安定性	位置状態	力状態	拡張性	参照
受動性		×	×		[2] [3]
ロバスト制御		-			[4] [5]
PD 制御			-		[6]
視覚補助	×		×		[7]
反力提示	×				[8]
ハイブリッド制御					[9]
適応環境オブザーバ					[10]

安定な遠隔操作システムとして Anderson ら [2] によって提案され、Niemeyer ら [3] によって拡張された受動性の原理を用いて安定化する方法がある。このシステ

ムは理論的にはどのように大きな通信遅延が存在しても安定性を保証することができる。しかしながら、通信遅延の増大にともないシステムの粘性が大きくなり、操作性が劣化するケースが多い。また、位置および力追従性が悪く操作者が正確に環境を認識することができないケースが多い。

Leungら [4] によって提案された、通信遅延を摂動とみなしてロバスト制御を用いて安定化する方法は藤本ら [5] によって拡張され、50 km 離れた遠隔地において卵を把持することに成功している。しかし、この実験は把持専用装置を用いたものであり、多自由度のマニピュレータに応用するのは難しい。

Oboeら [6] らは単純な PD 制御を用いて安定化条件を導き出し、マニピュレータを用いた実験に成功している。彼らは単純な作業であればこのような手法も有効であることを実証し、また、通信外乱（パケットロス、ジッタなど）がどの程度、遠隔マニピュレーションの制御に影響するかを考察している。

これらの3つの手法はシステムの安定性について主に議論したものであり、システムを用いて実際の作業を行うためには操作熟練を要する。主な理由としてマスタ・スレーブ間の位置と力の追従性が悪く、作業環境の状況を把握するために訓練を要することがあげられる。また、操作した際の目標指令や作業反力などが全て通信遅延を介して伝わるため、操作性が極めて悪く、コンピュータグラフィックを用いた作業の予測提示を必要とする。このような操作者に対する操作補助を目的としたシステムとして以下のようなものがある。

1. 作業環境モデルを用いて動作をコンピュータグラフィックスで予測表示する方法 [7]
2. 作業環境モデルを用いて予測的に力覚提示する方法 [8]

システム [7] [8] は良好な操作性を示すが、力追従が悪く、作業状況を正確に把握することが出来ない。加えて、提案されているシステムの多くは通信遅延に対する安定性を保証していないものが多く、不安定化する恐れがある。システム [7] [8] の一番の問題点として既知の作業環境モデルを必要とすることがあげられる。そのため、これらのシステムは環境モデルに不確かさがある場合に制御性能を発揮することが出来ない。

作業環境モデルを必要としない安定で安全な手法として筆者らが提案したハイブリッド制御則を用いた方法がある [9]. この方法はスレーブシステムが2モードの動作を持ち、作業環境との接触状況に応じて適応力制御と位置追従制御を切り替える。位置決め速度が速く、力追従精度が高いため、正確な力覚認識が可能であるが、遠隔作業時に力追従制御を行うことから位置追従誤差が生じる。

本研究では位置追従誤差を無くすために適応環境オブザーバを用いたリアルタイムに作業環境情報を推定し、環境モデルを構築する手法を提案する。過去に提案したハイブリッド制御則を用いた遠隔操作システムと同様に位置と力のハイブリッド制御を用いるため、力覚の認識性が高い。加えて、作業環境の位置状態と作業による環境の歪も提示するため、操作者は環境を正しく認識することができる。

本研究では適応環境オブザーバの設計法として、リアプノフ関数を用いて導出した方法、時間軸変換 [11] を用いて導出した方法の両方を提案し、実験により有効性を示す。

2. 基礎事項

2.1 マスタ・スレーブシステム

本節ではマスタ・スレーブシステムについて解説する。マスタ・スレーブシステムとは図1のようにマスタシステムとスレーブシステムからなる遠隔操作システムの一手法である。操作者はマスタシステムを操作し、スレーブシステムの作業情報をマスタシステムから受け取る。スレーブシステムはマスタシステムの操作情報を動作指令として動作し、作業環境と接触した場合は作業情報をマスタシステムへとフィードバックする。そのため、マスタ・スレーブシステムは操作者が実際に作業をしているかのように操作を行えるため、遠隔操作において有効である。本研究では遠隔操作法としてマスタ・スレーブシステムを採用する。

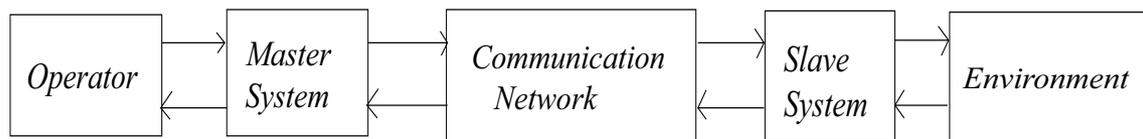


図1 マスタ・スレーブシステム

2.2 速度制御方式

本研究では速度制御方式のマニピュレータを対象とする。速度制御方式のマニピュレータは (1) 式, (2) 式のように入力を速度の形式で与える制御方式である。

$$x = F(\theta) \quad (1)$$

$$\dot{\theta} = u \quad (2)$$

ここで $x, \theta, F(\theta), u$ をそれぞれマニピュレータの位置ベクトル, 関節角度ベクトル, 順運動学, 制御入力とする。

また, $\theta, \dot{\theta}$ は (3) 式, (4) 式から求まる。

$$\theta = F^{-1}(x) \quad (3)$$

$$\dot{\theta} = J^{-1}(\theta) \dot{x} \quad (4)$$

ここで, J はヤコビ行列, F^{-1} は順運動学 F の逆運動学とする。

2.3 インピーダンス制御

本研究ではマスタマニピュレータは力・モーメントセンサと動作情報からインピーダンス制御を用いて制御入力を生成する。

インピーダンス制御は慣性係数, 粘性係数, バネ係数を設定することでロボットを所望のインピーダンス特性で動作させる制御法で一般的には力制御などに用いられる場合が多い。本研究では (5) 式のようなバネ係数を除いたインピーダンス制御方式をマスタシステムに採用し, インピーダンスを設計することで操作者が違和感を感じない操作感覚を実現する。

$$f_h = m \ddot{x} + d \dot{x} \quad (5)$$

ここで, m を慣性係数, d を粘性係数, f_h を操作力とする。

(5) 式において操作者が操作力 f_h を印加すると, 設計した慣性係数, 粘性係数に基づいたインピーダンス特性が生成される。

2.4 通信外乱

ネットワークはパケットロス, ジッタなどの通信外乱を発生する。特にインターネットのような公共の通信回線を用いる場合はパケットをロスしたり, 通信時間に揺らぎが生じる。遠隔操作システムの場合, 高いリアルタイム性や輻輳制御を採用したプロトコル, あるいはリアルタイム性の高い専用回線を用いる場合が多い。Oboe ら [6](1998) は遠隔操作システムがどの程度まで通信外乱の影響に耐えられるかを著書で紹介している。当時の情報通信技術では同一構内間を通信する際に生じる程度の通信外乱までしか遠隔操作システムには適さないと考察されている。

本研究では Oboe らの研究にならい, パケットロスや通信外乱は発生しないという仮定のもと研究を進める。

2.5 ハイブリッド制御則を用いた遠隔操作システム [9]

本節では本研究の先行研究であるハイブリッド制御則を用いた遠隔操作システムについて紹介する. このシステムはスレーブシステムが遠隔環境と接触した場合に適応力制御を行い, 接触していない場合に位置追従制御を行う. スレーブシステムの動作状態により, 以下のように2つの動作モードを定義する.

作業環境と接触時

: Free motion

作業環境と接触していない時

: Constrained motion

本システムのブロック線図を図2に示す. 図2中の $F(\theta)$ は順運動学, (u_m, u_s) はマニピュレータへの制御入力, (θ_m, θ_s) はマニピュレータの関節角度を表す. また, $\tilde{\cdot}$ は遅延情報を表す.

このシステムは直接的な力覚フィードバックを行わず, 通信遅延を含む閉ループ要素を持たないため, 不安定となることがない. 通信遅延の影響はインピーダンス制御に含まれるフィードバック項を介して操作者に伝えられるが操作者が適切な操作を行うことで, 影響を補償することができる. また, 厳密な力追従を行うことが可能であるため, 力覚の伝達性が極めて高く, Free motion時に位置追従制御を行うことから高速な位置決め動作が可能である. 加えて, スレーブシステムの2モードの切り替え安定性も補償しており, 通信遅れが存在する環境下でも不安定な動作をしない. しかしながら, Constrained motion時に力追従制御を行い, 一般的に力追従制御の位置追従性能は高くないため, 定常的に位置追従誤差が生じる.

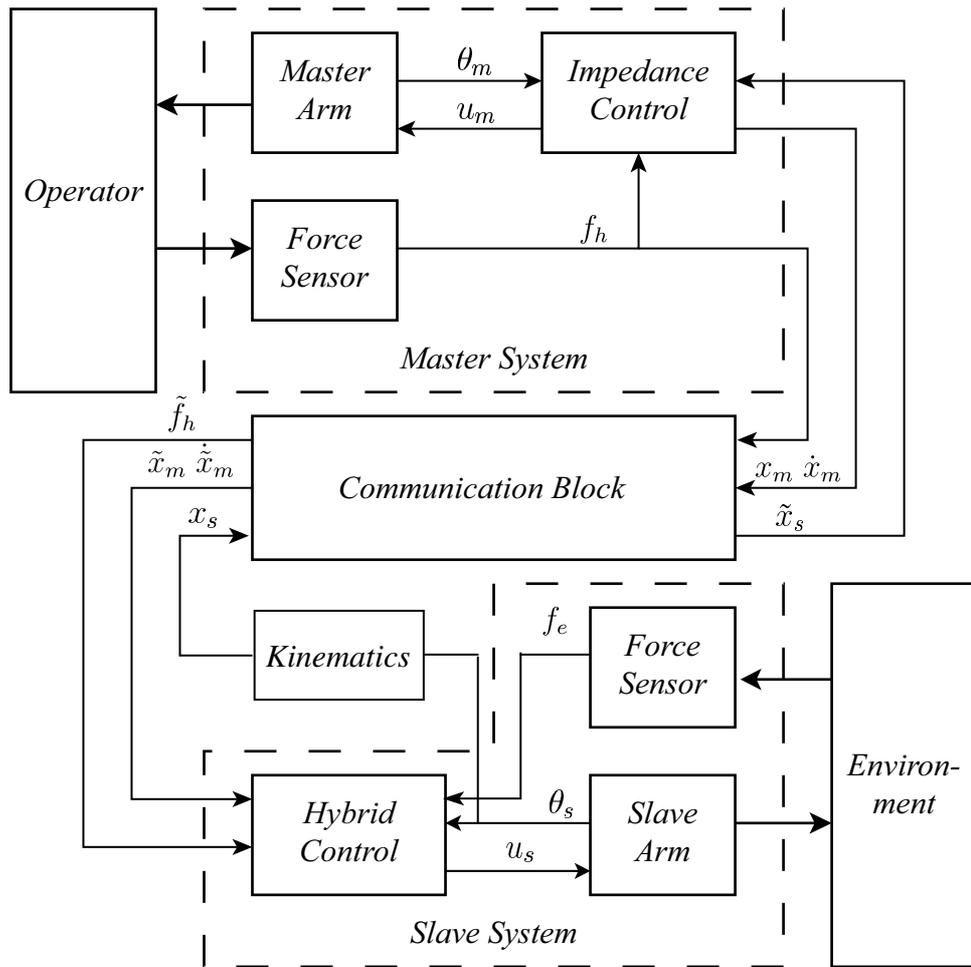


図 2 ハイブリッド制御則を用いた遠隔操作システム

2.5.1 マスタシステムの制御則

文献 [9] ではマスタシステムの制御則は以下のように設計されている.

$$f_h = m\ddot{x}_m + d\dot{x}_m + \Gamma^{-1}(x_m - \tilde{x}_s), \quad (6)$$

$$\Gamma^{-1} = \begin{cases} 0 & (|\tilde{f}_e| \leq 0) \\ K_{\hat{\gamma}} & (|\tilde{f}_e| > 0) \end{cases} \quad (7)$$

$$\dot{x}_{md} = \int_0^t \frac{f_h - d\dot{x}_m - \Gamma^{-1}(x_m - \tilde{x}_s)}{m} dt, \text{ and} \quad (8)$$

$$u_m = J^{-1}(\theta_m)\dot{x}_{md}, \quad (9)$$

ここで, x_m はマスタの現在位置, x_{md} はマスタの目標位置, $m > 0$, $d > 0$ はインピーダンス制御のパラメータ, $K_{\hat{\gamma}} > 0$ はフィードバックゲインを表す.

また, 安定性確保のため $K_{\hat{\gamma}} > 0$ は (10) 式を満たすように選ぶ.

$$2\left(\frac{d}{m}\right)^2 - K_{\hat{\gamma}} > 0 \quad (10)$$

(7) 式中の $-K_{\hat{\gamma}}(x_m - \tilde{x}_s)$ という項はマスタシステムの動作をスレーブシステムの動作に追従させるように設けたものである.

2.5.2 スレーブシステムの制御則

文献 [9] ではスレーブシステムの制御則は以下のように設計されている.

$$\dot{x}_{sd} = \begin{cases} \dot{\tilde{x}}_m - k_{sx}(x_s - \tilde{x}_m) & (|f_e| \leq 0) \\ \hat{\gamma}(t)\dot{\tilde{f}}_h(t) - K_f(\tilde{f}_h - f_e) & (|f_e| > 0) \end{cases} \quad (11)$$

$$\dot{\hat{\gamma}}(t) = -\alpha\dot{\tilde{f}}_h(t)(\tilde{f}_h - f_e) \quad (12)$$

$$u_s = J^{-1}(\theta_s)\dot{x}_{sd} \quad (13)$$

ここで, x_s はスレーブの現在位置, x_{sd} はスレーブの目標位置, \tilde{x}_m は通信環境を介して得たマスタの現在位置, $\hat{\gamma}$ は適応制御則が推定した作業環境のコンプライアンス, $k_{sx} > 0$ は位置制御ゲイン, $K_f > 0$ は力制御ゲイン, $\alpha > 0$ は適応パラメータを表す.

(11) 式においてスレーブシステムは $f_e > 0$ を切り替え条件として適応力制御と位置追従制御を自動的に切り替える.

3. 適応環境オブザーバを用いた遠隔操作システム

本研究では、動的に環境モデルを構築する安定な遠隔操作システムとして適応環境オブザーバを用いた手法を提案する。提案するシステムは適応環境オブザーバを用いて、マニピュレータの動作情報と接触力情報から作業環境の初期位置と硬さを推定する。また、環境剛性を操作者が認識するためには、少なくとも環境のバネ剛性と位置の歪を提示する必要があるため、本研究では環境情報として位置の歪と剛性を用いるコンプライアント環境モデルを採用する。提案するシステムはマスタシステム、スレーブシステムがそれぞれ遅延情報を含んでも安定なように設計されている。システムの安定性の詳細については後述する。また、個々のシステムの安定性を保証することで、システム全体の安定性も保証する。

提案するシステムは先行研究であるハイブリッド制御を用いた方法 [9] を拡張しており、正確な力覚認識のために力追従制御の他に適応環境オブザーバを用いて取得した環境情報を元に構築した環境モデルによる環境提示により、良好な環境認識を可能とした。

また、適応制御を二重に使用すると一般に制御が破綻することが知られているため、提案するシステムは適応制御を用いないフィードフォワード型力追従制御を採用している。

本研究では適応環境オブザーバの設計法としてリアプノフ関数から導出する方法と時間軸変換の概念を用いて導出する方法を示す。これらの適応環境オブザーバを用いた遠隔制御法の制御則はオブザーバ部分を除くと共通であり、安定性の議論、ハイブリッド制御の議論については共通であるものとして記述する。以下、リアプノフ関数を用いて導出したものを適応環境オブザーバ A、時間軸変換を用いて導出したものを適応環境オブザーバ B と略記する場合がある。

また、制御システムはハイブリッド構造をしており、Free motion と Constrained motion の 2 つの動作モードを持つ。システムの概略を図 3 に示し、また、システムの動作概要を以下にまとめる。

- Free motion:

マスタシステムとスレーブシステムは通信環境を介して制御情報を共有し、ユニラテラルな動作をする。マスタシステムは操作力を検出し、設定された

インピーダンスを再現するようにマニピュレータを制御する。スレーブシステムはマスタシステムの動作に追従するように速度制御型の位置 PD 制御を行う。

- Constrained motion:

マスタシステムとスレーブシステムは通信環境を介して制御情報を共有する。Constrained motion に切り替わった瞬間からスレーブシステムは作業環境の性質を推定し、マスタシステムに送信する。マスタシステムはスレーブシステムから受け取った環境情報を元に仮想環境を生成し、スレーブシステムの作業反力を予測して操作者に提示する。

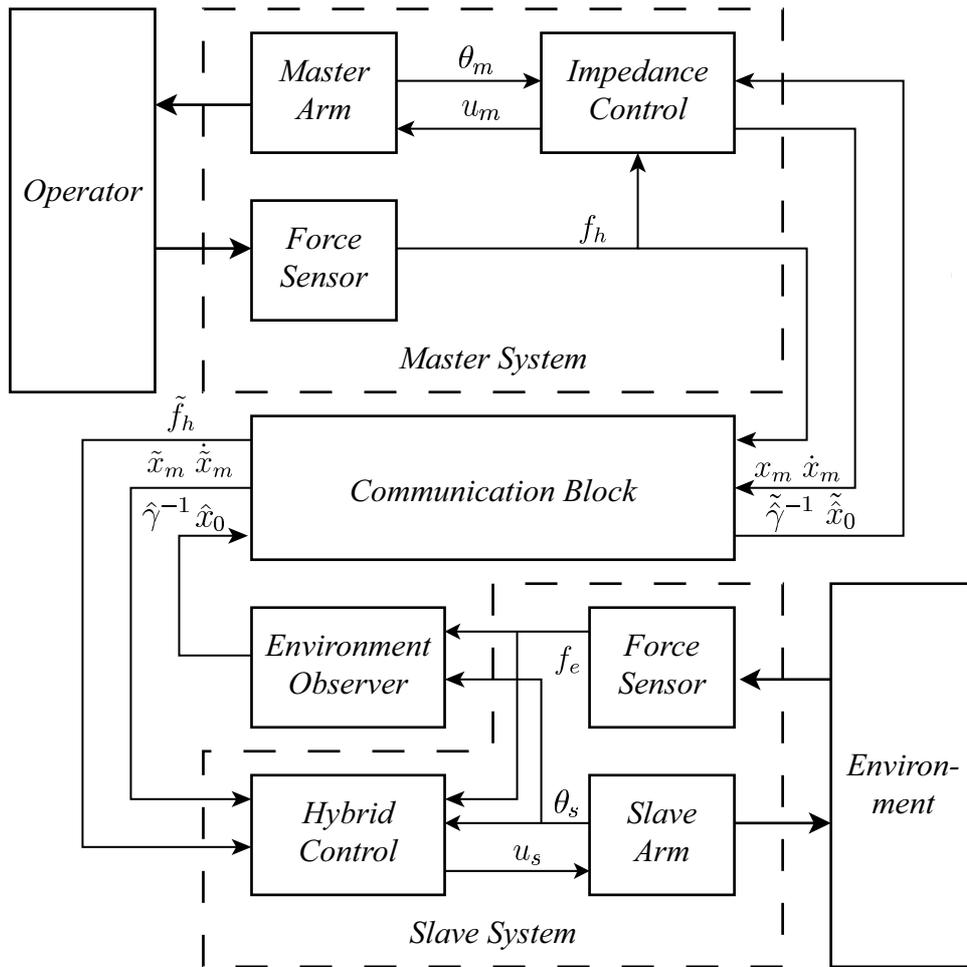


図 3 適応環境オブザーバを用いた遠隔操作システム

3.1 コンプライアント環境モデル

本節では本研究で採用した環境のモデルについて紹介する。本研究では作業環境は柔らかく、線形性を持つバネモデルであると仮定する。この仮定は力追従制御を行う上での一般的な仮定であり、本研究で採用しているフィードフォワード型の力追従制御でもこの仮定を必要としている [13]。また、力追従制御は一般的に接触点に対して水平に接触することを求めるため、本研究においても同様の仮定を設ける。このような環境モデルは柔らかい作業環境への応用に適しており、遠隔医療や原子炉の圧力容器の触診、検査のような柔らかな接触が求められる作業に適している。

採用する環境モデルは (14) - (16) のように記述される。

$$f_e = -\gamma^{-1}(x_s - x_0) \quad (14)$$

$$x_0 = \frac{f}{\gamma^{-1}} + x_s \quad (15)$$

$$\dot{f}_e = -\gamma^{-1}\dot{x}_s \quad (16)$$

ただし、 x_s はスレーブシステムの現在位置、 f_e は作業環境から受ける作業反力、 γ^{-1} は環境の剛性とする、(γ はコンプライアンスを表す、) また、 x_0 は作業環境のマニピュレータから見た場合の位置を表す。非接触と接触の様子は図 4, 5 のようになる。作業環境は $x_0 > 0$ を満たすような位置に設置する。

本研究では γ^{-1} と x_0 は定数とする。

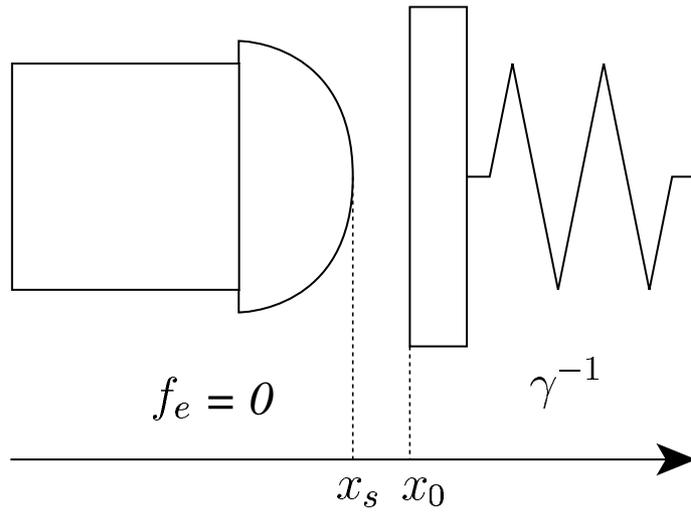


図 4 非接触モデル

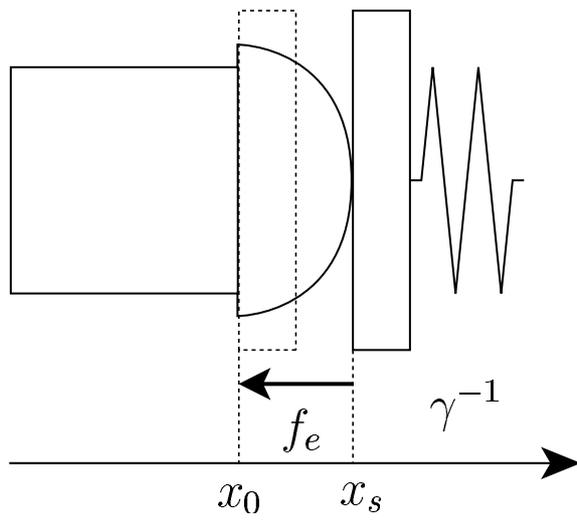


図 5 接触モデル

3.2 マスタシステムの制御

提案する手法におけるマスタシステムの制御法について紹介する. この制御法は一自由度のシステムを仮定しており, (17) - (20) のように表される.

$$f_h = m\ddot{x}_m + d \dot{x}_m + \Gamma^{-1}(x_m - \tilde{x}_0) \quad (17)$$

$$\Gamma^{-1} = \begin{cases} 0 & (x_m \leq \tilde{x}_0) \\ \tilde{\gamma}^{-1} & (x_m > \tilde{x}_0) \end{cases} \quad (18)$$

$$\dot{x}_{md} = \int_0^t \frac{f_h - d \dot{x}_m - \Gamma^{-1}(x_m - \tilde{x}_0)}{m} dt \quad (19)$$

$$u_m = J^{-1}(\theta_m)\dot{x}_{md} \quad (20)$$

ここで, \tilde{x}_0 は x_0 の推定値で通信遅延 ($\tilde{x}_0(t) = \hat{x}_0(t - T)$) を含む. (T は通信にかかった時間.)

(18) 式において, マスタシステムはスレーブシステムと作業環境の接触に応じて制御モードの切り替えを行う. 切り替え条件は $x_m \leq \tilde{x}_0$ もしくは $x_m > \tilde{x}_0$ である.

ここで, (19) 式中の $-\tilde{\gamma}^{-1}/m (x_m - \tilde{x}_0)$ はマスタシステムの制御内に仮想環境を生成するための項である.

3.3 スレーブシステムの制御

本節ではスレーブシステムの制御について紹介する. 提案するシステムにおけるスレーブシステムの制御は (21) - (22) のように記述することができる.

$$\dot{x}_{sd} = \begin{cases} \dot{\tilde{x}}_m - k_{sx}(x_s - \tilde{x}_m) & (|f_e| \leq 0) \\ \hat{\gamma}^{-1}\dot{\tilde{f}}_h - k_f(\tilde{f}_h - f_e) & (|f_e| > 0) \end{cases} \quad (21)$$

$$u_s = J^{-1}(\theta_s)\dot{x}_{sd} \quad (22)$$

ここで, $k_f > 0$ は力制御ゲイン, $\hat{\gamma}^{-1}$ は適応環境オブザーバの推定値である環境剛性をあらわす. スレーブシステムの制御は接触力 f_e の絶対値を切り替え条件とする.

3.4 システムの安定性解析

本節ではシステムの安定性解析結果を示す。提案するシステムは操作者の安全性保護の観点から $f_h = 0$ のときの安定性を補償すればよい。つまり、危険な場合は操作者が手を離せば安定になるようにシステムの安定性を保証する。本研究ではマスタシステムの安定性を Bounded-Input-Bounded-Output stable (BIBO) [14] の概念を用いて解析する。3.4.2 節ではスレーブシステムの制御則 (21) 式が通信遅延を含んでも安定であることと切り替え時の安定性 [15] を示す。スレーブシステムの安定性については適応環境オブザーバの状態、ハイブリッド制御則の状態に応じて場合分けをしてそれぞれの状態の安定性とそれらの状態の切替時の安定性について議論する。3.4.3 節ではシステム全体の安定性について議論する。

3.4.1 マスタシステムの安定性解析

マスタシステムの制御則が Bounded-Input-Bounded-Output stable (BIBO) を満たすことを示す。

$f_h = 0$ のとき、システム (17) 式は (23) 式のようになる。

$$m \ddot{x}_m + d \dot{x}_m + \Gamma^{-1}(x_m - \tilde{x}_0) = 0 \quad (23)$$

出力 \dot{x}_m が有界、 $\Gamma^{-1}(x_m - \tilde{x}_0)$ が入力に対して有界であるため、マスタシステムは BIBO (Bounded Input Bounded Output) を満たす。

3.4.2 スレーブシステムの安定性解析

本節ではスレーブシステムが通信遅延に対して安定であることを示す。また、制御モード切替時の安定性についても示す。

はじめに2つの制御則 (21) が指数安定であることを示す。(21) 式より, (24), (25) 式のように書き換えられる。

$$\dot{x}_{sd} = \dot{\tilde{x}}_m - k_{sx}(x_s - \tilde{x}_m) \quad (|f_e| \leq 0) \quad (24)$$

$$\dot{x}_{sd} = \hat{\gamma}^{-1} \dot{\tilde{f}}_h - k_f(\tilde{f}_h - f_e) \quad (|f_e| > 0) \quad (25)$$

$e = x_{sd} - \tilde{x}_m$ とおく。このとき、誤差システム (51) 式を得る。

$$\dot{e} = -k_f e. \quad (26)$$

誤差システム (51) 式は明らかに漸近安定であるため, $e \rightarrow 0$ となる。従って, システム (24) は安定。

次に (25) 式の安定性について示す。仮に (25) 式中の推定パラメータ $\hat{\gamma}^{-1}$ が真値に収束するとすると, 作業反力 f_e は操作力 f_h に追従する。さらに力制御則 (25) 式は環境の表面において力追従を保証している [13]。従って, システム (25) 式は安定である。

最後に制御モード切替時の安定性を解析するために微分包含式 (27), (28) 式を導入する。

$$\ddot{x}_m \in -\frac{d}{m} \dot{x}_m + \frac{1}{m} f_h - [0, \tilde{\gamma}^{-1}] x_m \quad (27)$$

$$\dot{x}_s \in [k_{sx} \tilde{x}_m + \dot{\tilde{x}}_m, -\tilde{\gamma}^{-1} \dot{\tilde{f}}_h - k_f \tilde{f}_h] \quad (28)$$

一般性を失わないために作業環境は $x_s = 0$ に存在すると仮定する。また, $x_s \leq 0$ の時, スレーブシステムは作業環境に接触している。

$k_{sx} \tilde{x}_m + \dot{\tilde{x}}_m > 0$ のとき, $x_s = 0$ においてスレーブシステムは Free motion を選ぶ。この場合システムは Free motion として well-posed となる。 $k_{sx} \tilde{x}_m + \dot{\tilde{x}}_m \leq 0$

かつ $-\tilde{\gamma}^{-1}\dot{\tilde{f}}_h - k_f\tilde{f}_h \leq 0$ のとき, スレーブシステムは Constrained motion を選ぶ. この場合, スレーブシステムは Constrained motion として well-posed になる.

以上の2通りの場合, 微分包含式は Carathéodory の解が存在する. 従ってシステムは安定である.

さらに $k_{sx}\tilde{x}_m + \dot{\tilde{x}}_m \leq 0$ かつ $-\tilde{\gamma}^{-1}\dot{\tilde{f}}_h - k_f\tilde{f}_h > 0$ の場合の安定性を確認する必要がある. この場合は微分包含式 (28) において $x_s = 0$ は明らかに固有の Filippov 解であり, スレーブシステムはスライディングモードと同じ挙動をする. 従って, システムはチャタリングを起こす可能性はあるが, Filippov の意味で安定性を保つ.

3.4.3 システム全体の安定性解析

本節ではシステム全体の安定性について解説する. 本研究では $f_h = 0$ のときのみ安定性を議論する. $f_h = 0$ の場合のブロック線図を図 6 に示す.

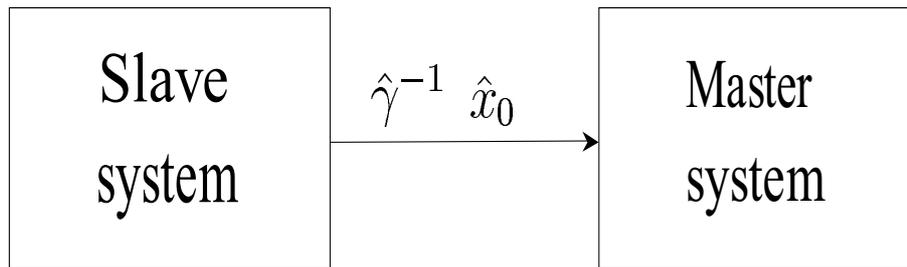


図 6 ブロック線図 ($f_h = 0$)

マスタシステムは BIBO (Bounded Input Bounded Output) であり, スレーブシステムは全ての場合において安定であるため, システム全体は安定である.

3.5 実機による評価

本章では提案するシステムの実機実験の結果を示す。通信遅延は1秒間と仮定し、遅延は制御ソフトウェア上で仮想的に発生させるものとする。提案するシステムの実機実験における確認事項を以下にまとめる。

- Free motion: 1秒間の通信遅延に対して安定であり、マスタシステムとスレーブシステムの間には位置追従誤差は発生しない。
- Constrained motion: 1秒間の通信遅延に対して安定であり、マスタシステムとスレーブシステムの間には力追従誤差、位置追従誤差が生じない。
- Switching: 通信遅延のもとで、安定に制御モードの切り替えができる。

また、力追従性については $e_f = \tilde{f}_h - f_e$ 、位置追従性については $e_x = \tilde{x}_m - x_s$ を用いて評価する。

3.5.1 視覚情報の扱いについて

一般的に遠隔操作システムはコンピュータグラフィックスやビジョンセンサによる視覚的な補助を用いる場合が多い。また、人間が外部環境を認識する際に視覚情報の占める割合は非常に高く、触覚などの作業感覚は補助的に作用する場合が多い。本研究で提案するシステムは視覚的な情報を含んだものではないが、実験装置の構成上、操作者はスレーブシステムの動作と作業環境を目視することができる。(図7) そのため、目視情報から操作者が加える操作量にフィードバックがかかる。本研究ではこのような視覚情報に影響する制御量の調整も提案するシステムの一部であるととらえることにする。言い換えると目視による操作量の調整は視覚補助システムを代替しているものとみなすこととする。したがって、本研究ではマスタ、スレーブ間の視覚情報を遮断することなく実験を行う。

3.5.2 実験装置

本研究では実験装置として、2台のロボットマニピュレータと力モーメントセンサ、操作用ハンドルを用いている。また、スレーブシステムには衝撃緩衝のために発砲スチロールの半球を取り付けてある。

ロボットマニピュレータとして多関節型ロボットアーム PA-10 (三菱重工業株式会社製)、力覚センサとして株式会社ニッタ製 6 軸力・モーメントセンサを採用している。実験装置の概略は図 7 のようになる。マスタシステムとスレーブシステムはそれぞれ 1 台のロボットマニピュレータと力・モーメントセンサからなり、通信環境を介して制御情報を共有する。また、マスタマニピュレータは先端に金属製のハンドル、スレーブマニピュレータは先端に発砲スチロール半球を取り付けてある。マスタシステムの先端は図 8、スレーブシステムの先端は図 9 のようになっている。

また、制御ソフトウェアは Visual Studio. Net 2005 を開発環境として Visual C++ を用いて開発し、制御環境として Windows XP を採用している。制御周期は 1.5[msec]、通信遅延をソフトウェア上で仮想的に 1[sec] 発生させている。通信プロトコルとして UDP/IP を採用している。

マニピュレータのリンク長さ、関節角度など機構パラメータについては図 10、図 11 にまとめる。本研究ではリンク 2, 4, 6 を使用し、 x 軸方向に一自由度運動をできるように制御する。また、リンク長さを表 2 にまとめる。

表 2 マニピュレータのリンク長さ: l_0, l_2, l_4, l_6

l_0 [m]	l_2 [m]	l_4 [m]	l_6 [m]
0.315	0.450	0.500	0.080

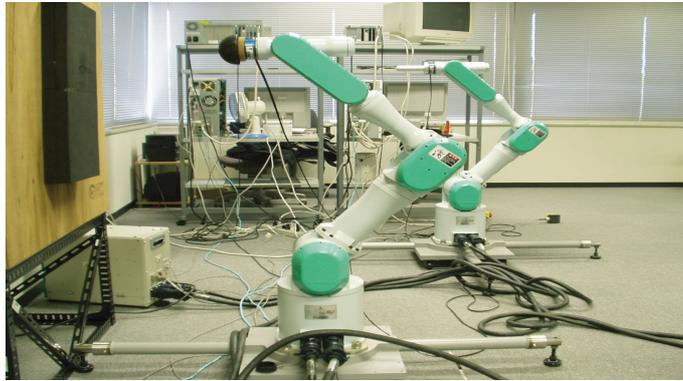


図 7 実機概略

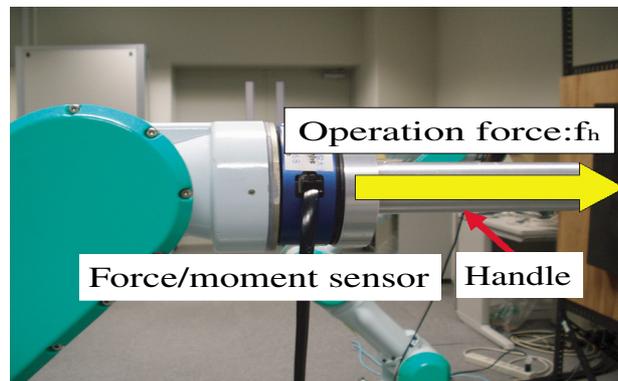


図 8 入力装置

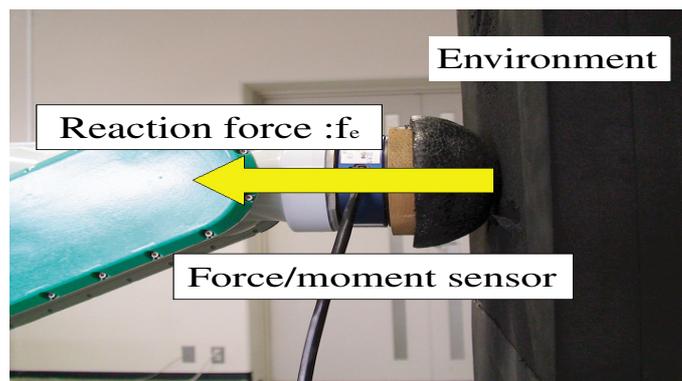


図 9 作業装置

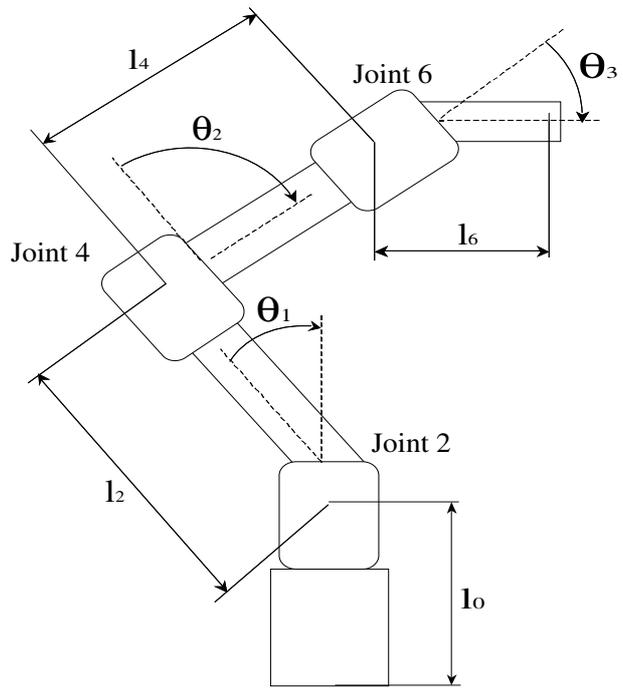


図 10 間接角度とリンク長

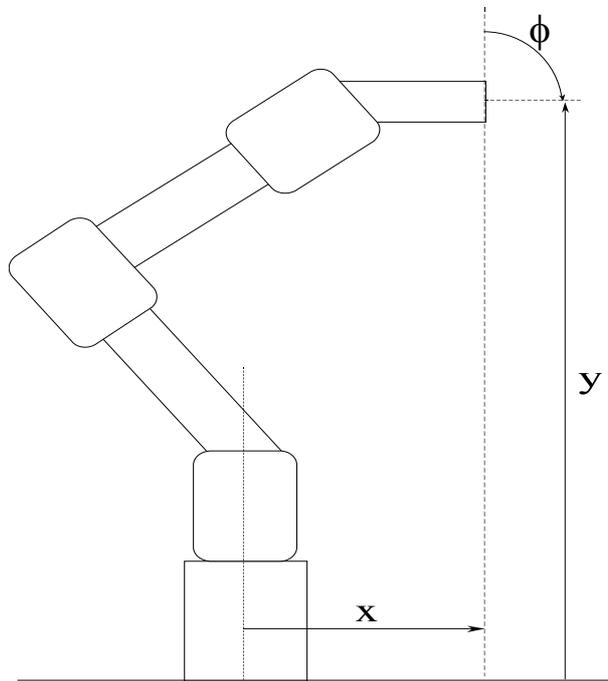


図 11 位置の定義

3.5.3 測定方法

マスタシステムとスレーブシステムに取り付けた力・モーメントセンサは水平方向に1軸のデータを計測する。(図8, 図9参照.) マスタシステムとスレーブシステムはそれぞれ水平方向に一自由度運動を行う。また, 実験結果はスレーブシステム側で取得するものとする。関節角度データはマニピュレータの関節に搭載されたロータリーエンコーダにより取得し, 順運動学 $F(\theta)$ から手先位置を計算する。速度データは関節の角速度データからヤコビ行列 J を用いて計算される。

3.5.4 実験パラメータ

マニピュレータのインピーダンス制御パラメータ, 位置および力制御ゲインを表3にまとめる。表3において k_f の値は非常に小さい値に設定されている。これは k_f の設計値は力・モーメントセンサのノイズと剛性の推定値 γ^{-1} の影響を受けやすいためである。

表3 制御ゲイン k_s, k_f , インピーダンスパラメータ m, d

k_s	k_f	m [Kg]	d [N/m]	k [N/deg]
0.1	0.005	1.0	400.0	0.0

3.5.5 Free Motion の実験結果

本節では提案するシステムの Free motion における実験結果を図 12 に示す。操作者はシステムを作業環境に対して水平に一自由度運動をさせるように操作を行い、周期的にマニピュレータを前後させる。位置の誤差平均は 0.001 [m]、誤差分散は 0.004 [m²] であり、良好な位置追従性を示している。また、図 12 より、通信遅延のある環境下でも安定性を保っていることがわかる。Free motion における動作は適応環境オブザーバ A および B において共通であるため、図 12 に位置追従の結果を示す。

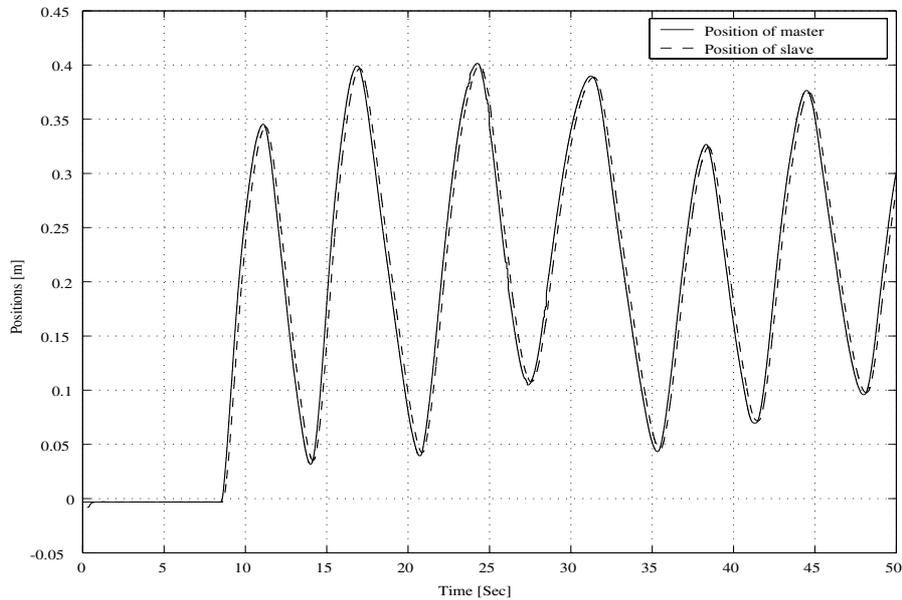


図 12 free motion の位置追従結果

4. リアプノフ関数を用いた適応環境オブザーバの設計

本節では, 本研究で提案する適応環境オブザーバの一つであるリアプノフ関数を用いて導出した制御法について解説する. 適応環境オブザーバは (29) - (32) 式からなり, 環境剛性と初期接触点を推定することを目的とする.

$$\dot{\hat{f}}_e = -\hat{\gamma}^{-1}\dot{x}_s - k_1 e \quad (29)$$

$$\dot{\hat{\gamma}}^{-1} = k_2 \sigma e \dot{x}_s \quad (30)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0 & (\hat{\gamma}^{-1} \geq \gamma^+ \text{ and } e\dot{x}_s \geq 0) \\ 0 & (\hat{\gamma}^{-1} \leq \gamma^- \text{ and } e\dot{x}_s \leq 0) \\ 1 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (31)$$

$$\hat{x}_0 = \frac{\hat{f}_e}{\hat{\gamma}^{-1}} + x_s \quad (32)$$

ここで, \hat{f}_e は中間的に推定している環境反力 f_e の推定値, $\hat{\gamma}^{-1}$ は環境剛性 γ^{-1} の推定値, e は推定誤差であり $e = \hat{f}_e - f_e$ と定義される. $k_1, k_2 > 0$ はオブザーバゲインであり, 正の実数値をとる. また, 操作者安全保護のため, 剛性の推定値 $\hat{\gamma}^{-1}$ に γ^+ 上界, (32) 式のゼロ割を回避するために $\hat{\gamma}^{-1}$ に下界 γ^- を設定する. 初期値 $\hat{\gamma}^{-1}(0)$ は任意の正の実数値をとる. 初期値 $\hat{x}_0(0)$ はマニピュレータがはじめて接触した位置をとる.

4.1 適応環境オブザーバの収束性

適応環境オブザーバの収束性を証明するために以下のような定理を設定する.

定理 1

適応環境オブザーバ (29) - (32) 式を考える. スレーブシステムの手先速度 \dot{x}_s を $\dot{x}_s \neq 0$, 環境剛性 γ^{-1} は $\gamma^- < \gamma^{-1} < \gamma^+$ を満たすものと仮定する. このとき, $t \rightarrow \infty$ において, $\hat{\gamma}^{-1} \rightarrow \gamma^{-1}$ が成立する.

証明

以下のようなリアプノフ関数の候補を考える.

$$V = k_2 e^2 + (\hat{\gamma}^{-1} - \gamma^{-1})^2 \quad (33)$$

このとき, リアプノフ関数 V の微分値は以下ようになる.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= 2\{k_2 e \dot{e} + (\hat{\gamma}^{-1} - \gamma^{-1}) \dot{\hat{\gamma}}^{-1}\} \\ &= 2\{k_2 e(\gamma^{-1} \dot{x}_s - \hat{\gamma}^{-1} \dot{x}_s - k_1 e) + (\hat{\gamma}^{-1} - \gamma^{-1}) k_2 \sigma e \dot{x}_s\} \\ &= -2k_1 k_2 e^2 + 2(\hat{\gamma}^{-1} - \gamma^{-1})(k_2 \sigma e \dot{x}_s - k_2 e \dot{x}_s) \end{aligned}$$

以下のようにすべてのケースについて, リアプノフ関数の安定性を議論する.

1) $\sigma = 1$ の場合

$$\dot{V} = -2k_1 k_2 e^2 \leq 0 \quad (34)$$

2) $\hat{\gamma}^{-1} \geq \gamma^+$ かつ $e \dot{x}_s \geq 0$ の場合

$$\dot{V} = -2k_1 k_2 e^2 - 2(\hat{\gamma}^{-1} - \gamma^{-1}) k_2 e \dot{x}_s \quad (35)$$

$\hat{\gamma}^{-1} \geq \gamma^+$ かつ $e \dot{x}_s \geq 0$, (35) を考慮すると不等式 (36) を得る.

$$\dot{V} \leq -2k_1 k_2 e^2 \leq 0 \quad (36)$$

3) $\hat{\gamma}^{-1} \leq \gamma^{-1}$ かつ $e\dot{x}_s \leq 0$ の場合

$$\dot{V} = -2k_1k_2e^2 - 2(\hat{\gamma}^{-1} - \gamma^{-1})k_2e\dot{x}_s \quad (37)$$

$\hat{\gamma}^{-1} \leq \gamma^{-1}$ かつ $e\dot{x}_s \leq 0$, を考慮すると (37) 式は (38) 式になる.

$$\dot{V} = -2k_1k_2e^2 \leq 0 \quad (38)$$

解析 1) - 3) の結果, リアプノフ関数の微分値は全ての場合において $\dot{V} \leq 0$ を満たす. 従って, V は弱リアプノフ関数の条件を満たす.

つまり, バーバラの定理に従うと [14], 以下のように収束性が補償される.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{V} = 0$$

仮に $\dot{V} = 0$ の場合, e は $e^2 = 0$ を満たす. このとき, $t \rightarrow \infty$ の場合, e は 0 に収束する. 仮に $\dot{e} = 0$ の場合, \dot{e} は $\dot{e} = -(\hat{\gamma}^{-1} - \gamma^{-1})\dot{x}_s = 0$ となる.

また, 本研究では $\dot{x}_s \neq 0$ の仮定に従う. このとき, $t \rightarrow \infty$ において, $\hat{f}_e \rightarrow f_e$ かつ $\hat{\gamma}^{-1} \rightarrow \gamma^{-1}$ となる.

4.2 オブザーバゲインの設計

本節では適応環境オブザーバのゲインの設計法について紹介する. 適応環境オブザーバは k_1, k_2 と 2 つのゲインを持ち, k_1 はオブザーバの収束速度, k_2 は推定値の振動に影響する. 以下にゲインの設計手順を示す.

1. 正の実数 $k_1 > 0$ を目的とする収束速度を満たすように選ぶ.
2. 正の実数 $k_2 > 0$ を $0 < k_2 < k_1$ を満たすように, かつ振動が起こらないように選ぶ.

4.3 適応環境オブザーバの実験結果

本節ではリアプノフ関数を用いて導出した適応環境オブザーバを用いた遠隔操作システムの実機実験結果を示す。

実験に用いたオブザーバゲインなどのパラメータは表 4 のようになる。参考までに追記した適応環境オブザーバを用いない場合の制御パラメータを表 5 にまとめる。また、適応環境オブザーバを用いない場合の比較として先行研究であるハイブリッド制御則を用いた遠隔操作システムの誤差分散と誤差平均の結果を示す。この場合の制御パラメータを表 5 において紹介する。このパラメータは安全な安定条件 (10) 式を満たす。

表 4 リアプノフ関数を用いた方法のオブザーバゲイン k_1, k_2 , 推定初期値 $\hat{\gamma}^{-1}(0)$ と上界値 γ^+ と下界値 γ^-

k_1	k_2	$\hat{\gamma}^{-1}(0)$ [N/m]	γ^+ [N/m]	γ^- [N/m]
1200.0	1100.0	10.0	50000.0	10.0

表 5 適応環境オブザーバを用いない場合の制御パラメータ

m [Kg]	d [Ns/m]	k [N/deg]	$K_{\hat{\gamma}}$	k_{sx}	K_f	α
10	100.0	0.0	50.0	0.1	0.0005	0.05

4.3.1 操作力を一定に保った場合の Constrained motion の実験結果

マスタシステムに一定の操作力を印加した場合の実験結果を図 13 - 16 に示す。

図 16 から適応環境オブザーバは真値への急速に収束していることがわかる。また、収束時間の評価については図 17 と図 18, 表 8 にまとめる。オブザーバの収束は理論的には $\dot{x}_s \neq 0$ の場合にのみ保証されているが、実験結果から $\dot{x}_s = 0$ の場合でも収束することが分かった。

また、適応環境オブザーバを用いた手法の有効性を確認するためにオブザーバを用いない場合の結果を表 6, 7 に示す。なお、誤差分散と誤差平均の評価区間は 25 - 65 [sec] である。

表 6, 7 より、力追従および位置追従は適応環境オブザーバを用いない場合に比べて劇的に改善したことがわかる。

表 6 適応環境オブザーバ A を用いて一定力を印加した場合の位置の誤差平均と誤差分散

	誤差平均 [m]	誤差分散 [m ²]
適応環境オブザーバ A	1.454×10^{-2}	1.022×10^{-7}
オブザーバなし	0.104	2.602×10^{-6}

表 7 適応環境オブザーバ A を用いて一定力を印加した場合の力の誤差平均と誤差分散

	誤差平均 [N]	誤差分散 [N ²]
適応環境オブザーバ A	-6.931×10^{-2}	2.951×10^{-1}
オブザーバなし	-0.308	2.950

表 8 適応環境オブザーバ A を用いて一定力を印加した場合の $\hat{\gamma}^{-1}$, \hat{x}_0 の推定速度評価

	収束区間 [sec]	収束時間 [sec]
初期位置推定 \hat{x}_0	12.62 - 12.98	0.36
剛性推定 $\hat{\gamma}^{-1}$	12.62 - 12.90	0.28

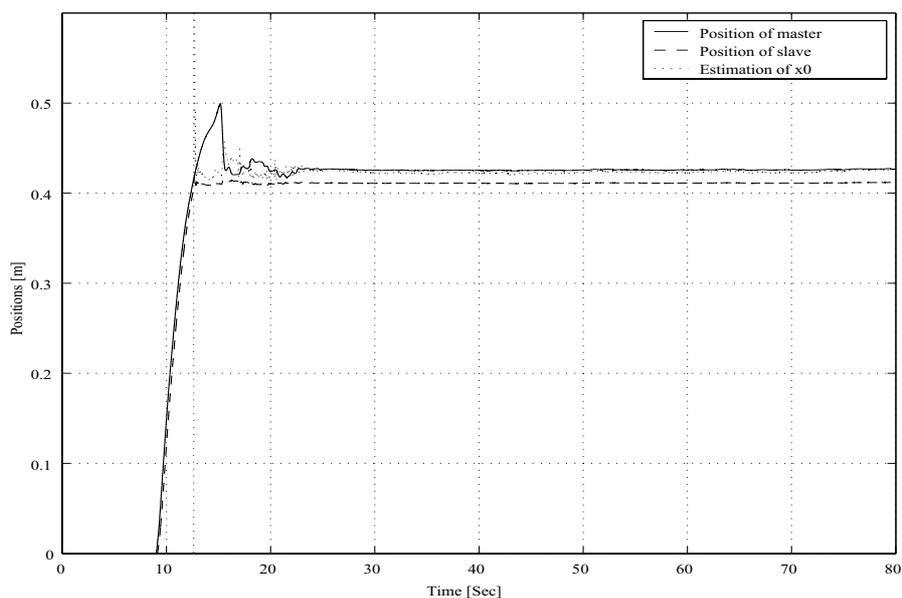


図 13 適応環境オブザーバ A を用いて一定力を印加した場合の x_m , x_s , \hat{x}_0 の実験結果

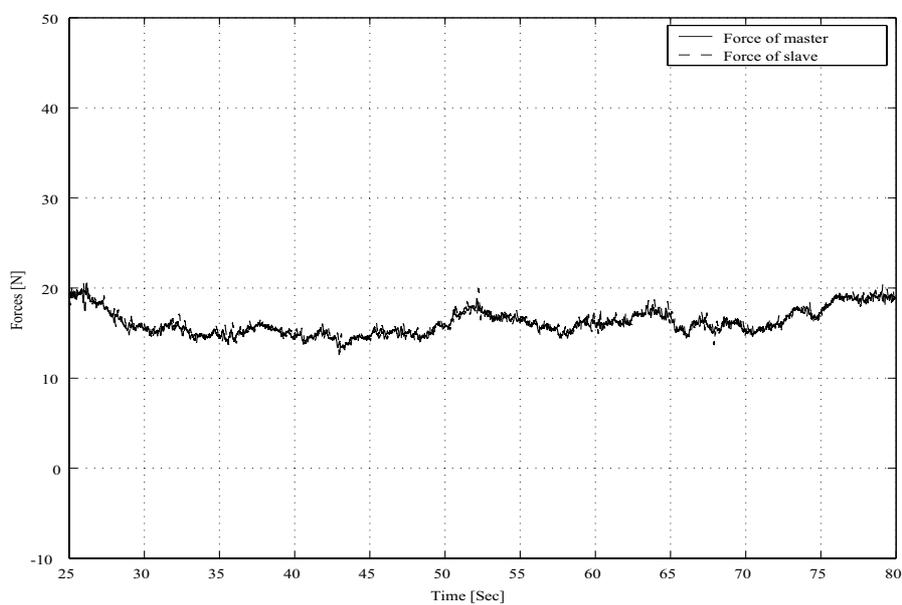


図 14 適応環境オブザーバ A を用いて一定力を印加した場合の $-f_h$, f_e の実験結果

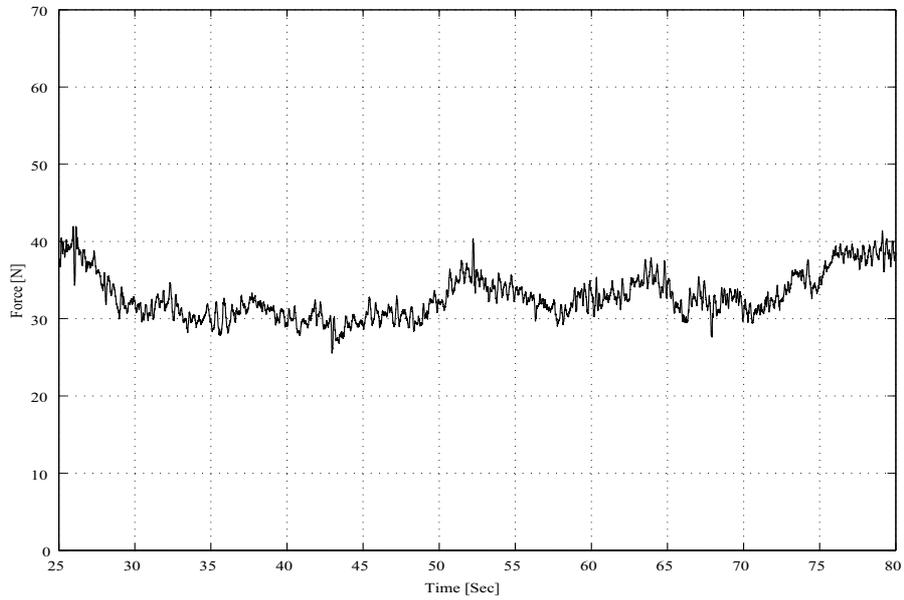


図 15 適応環境オブザーバ A を用いて一定力を印加した場合の \hat{f}_e の推定結果

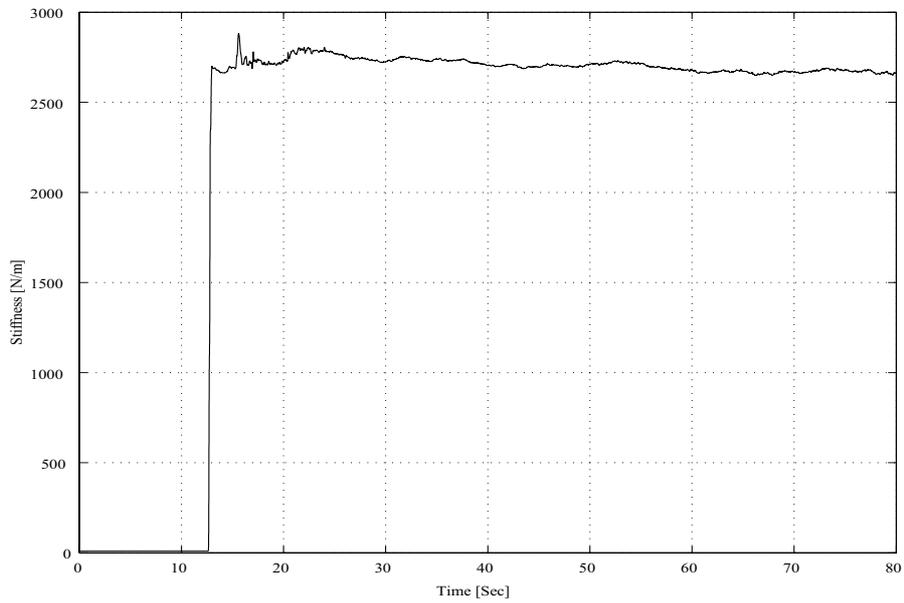


図 16 適応環境オブザーバ A を用いて一定力を印加した場合の $\hat{\gamma}^{-1}$ の推定結果

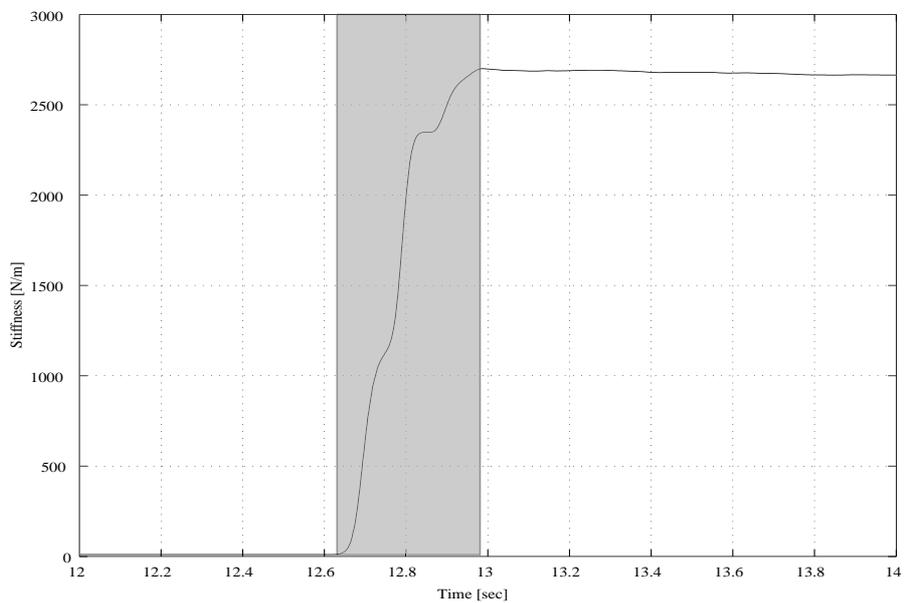


図 17 適応環境オブザーバ A を用いて一定力を印加した場合の $\hat{\gamma}^{-1}$ の推定速度評価

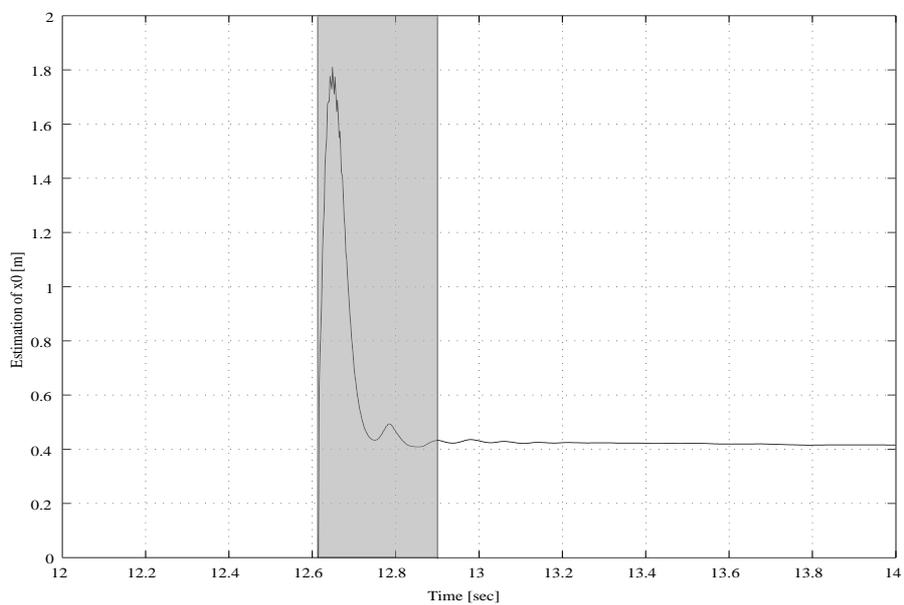


図 18 適応環境オブザーバ A を用いて一定力を印加した場合の \hat{x}_0 の推定速度評価

4.3.2 操作力を変動させた場合の Constrained motion の実験結果

マスタシステムに対しての操作力を変動させた場合の実験結果を図 19 - 22 に示す。また、適応環境オブザーバの収束速度については図 23 と図 24 で評価する。また、表 11 に収束時間の結果を示す。この結果から適応環境オブザーバは急速に真値への収束することがわかる。しかしながら、 $\hat{\gamma}^{-1}$ に振動的な特性が残ることが図 22 から分かる。この振動特性は実機環境と適応環境オブザーバの非線形性に起因する。

適応環境オブザーバを用いない場合との比較のため、誤差平均と誤差分散の結果を表 9, 10 に示す。この結果は 40 - 80 [sec] の区間で評価したものである。

提案するシステムは通信遅延の存在する環境下でも予測環境提示を行い、誤差平均と誤差分散を劇的に少なくすることができることが表 9, 10 からわかる。位置誤差は低減しているが力誤差分散が大きくなっている。力誤差分散が大きくなった要因として 2 つの原因が考えられる。一つ目は、採用したフィードフォワード型力追従制御が適応環境オブザーバに対応していないことに起因すると考えられる。本研究で採用している力追従制御は、適応制御により作業環境のコンプライアンスを推定する形式であり、適応環境オブザーバを用いて推定した剛性の使用は本来の使用方法ではない。しかしながら、本研究では実験により採用したフィードフォワード型力追従制御が利用しなかった場合に比べ、十分に性能を発揮することを確認をしたため、採用している。

力の誤差分散が大きくなったもう一つの要因として、適応環境オブザーバによる推定の結果が振動的になったこともあげられる。推定結果が振動的になった原因として実環境の持つ非線形性の影響も考えられる。振動的な振る舞いをしない適応環境オブザーバを設計することで力の誤差分散が低減する可能性もあるための改善のためのアプローチとして次章以降に振動的な性質が出にくい推定法として時間軸変換を用いた適応環境オブザーバを提案し、実験結果を示す。

表 9 適応環境オブザーバ A を用いて変動力を印加した場合の位置の誤差平均と誤差分散

	誤差平均 [m]	誤差分散 [m ²]
適応環境オブザーバ A	1.523×10^{-2}	1.030×10^{-4}
オブザーバなし	0.099	2.200×10^{-4}

表 10 適応環境オブザーバ A を用いて変動力を印加した場合の力の誤差平均と誤差分散

	誤差平均 [N]	誤差分散 [N ²]
適応環境オブザーバ A	-2.720×10^{-2}	48.04
オブザーバなし	-0.648	7.510

表 11 適応環境オブザーバ A を用いて変動力を印加した場合の $\hat{\gamma}^{-1}$, \hat{x}_0 の推定速度評価

	収束区間 [sec]	収束時間 [sec]
初期位置推定 \hat{x}_0	12.85 - 13.20	0.35
剛性推定 $\hat{\gamma}^{-1}$	12.85 - 13.15	0.30

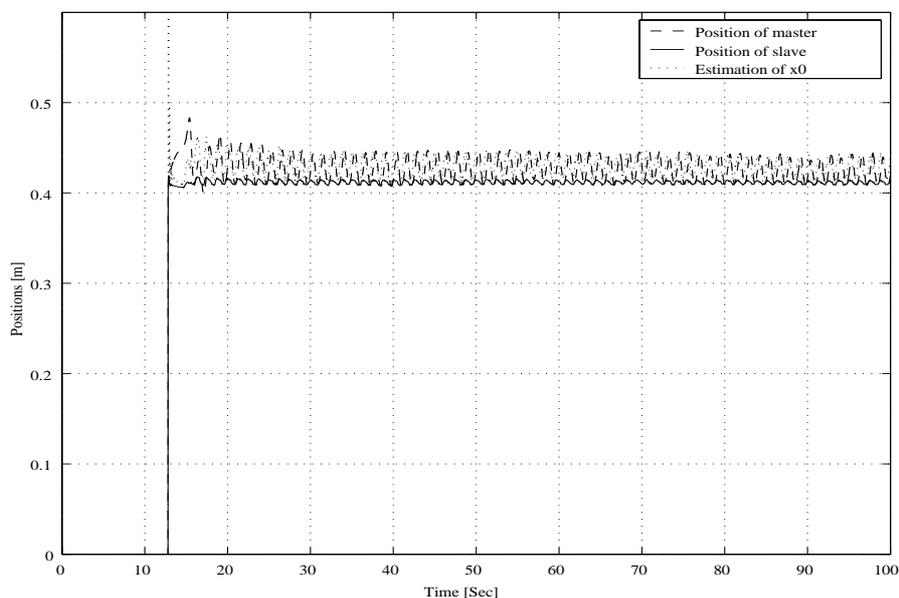


図 19 適応環境オブザーバ A を用いて変動力を印加した場合の x_m , x_s , \hat{x}_0 の実験結果

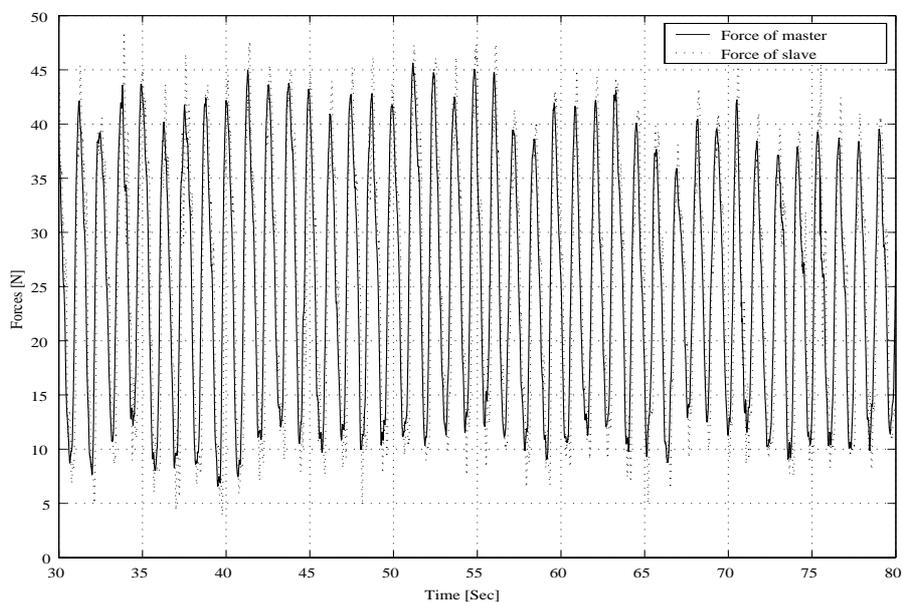


図 20 適応環境オブザーバ A を用いて変動力を印加した場合の $-f_h$, f_e の実験結果

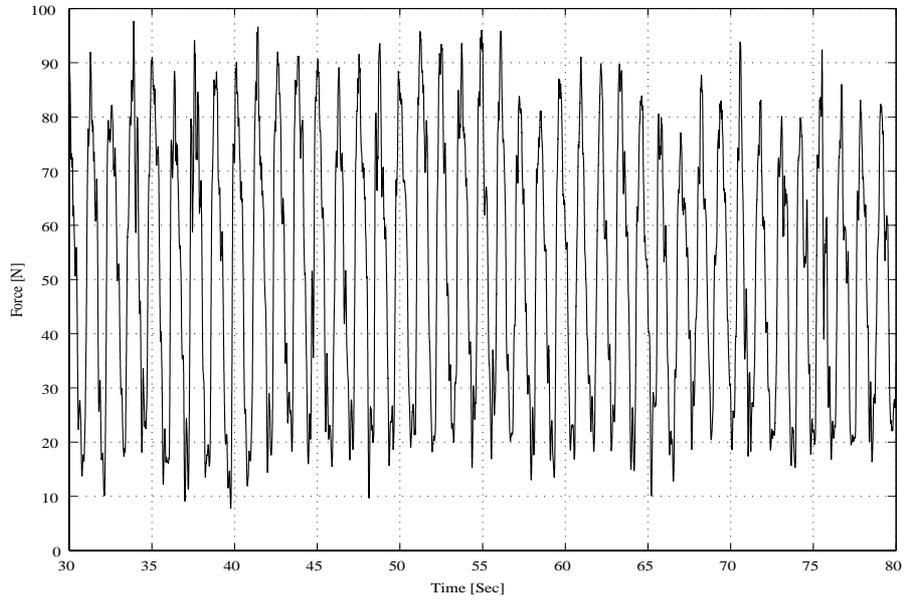


図 21 適応環境オブザーバ A を用いて変動力を印加した場合の \hat{f}_e の推定結果

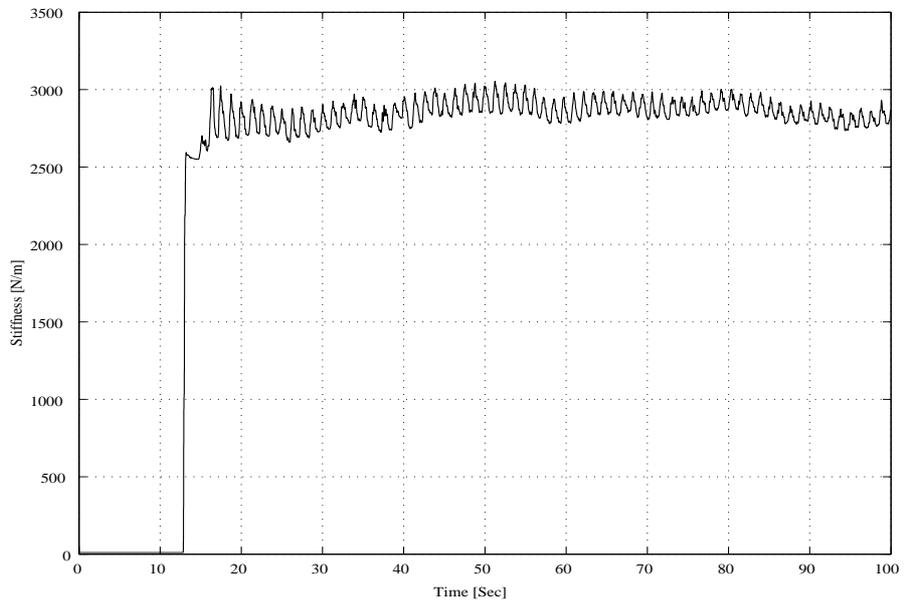


図 22 適応環境オブザーバ A を用いて変動力を印加した場合の $\hat{\gamma}^{-1}$ の推定結果

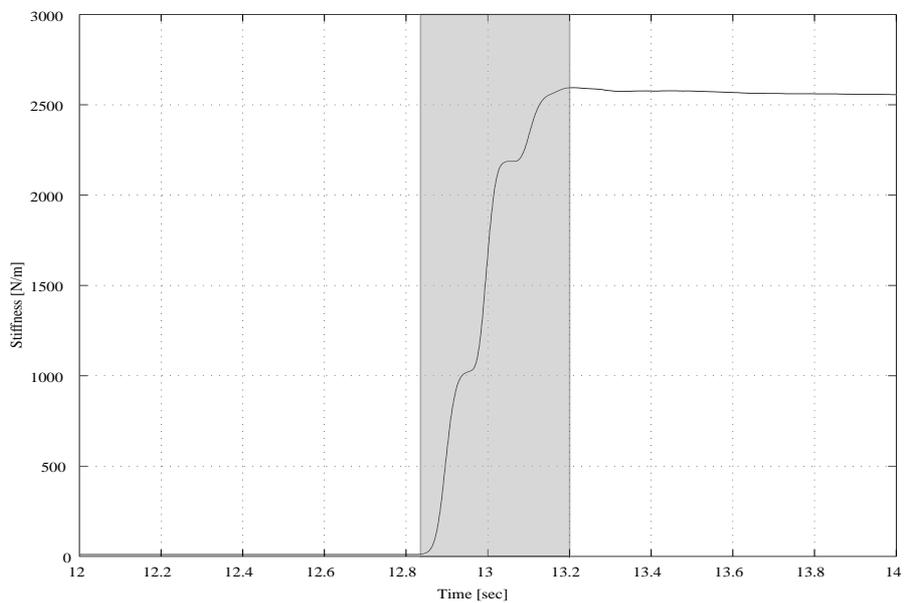


図 23 適応環境オブザーバ A を用いて変動力を印加した場合の $\hat{\gamma}^{-1}$ の推定速度評価

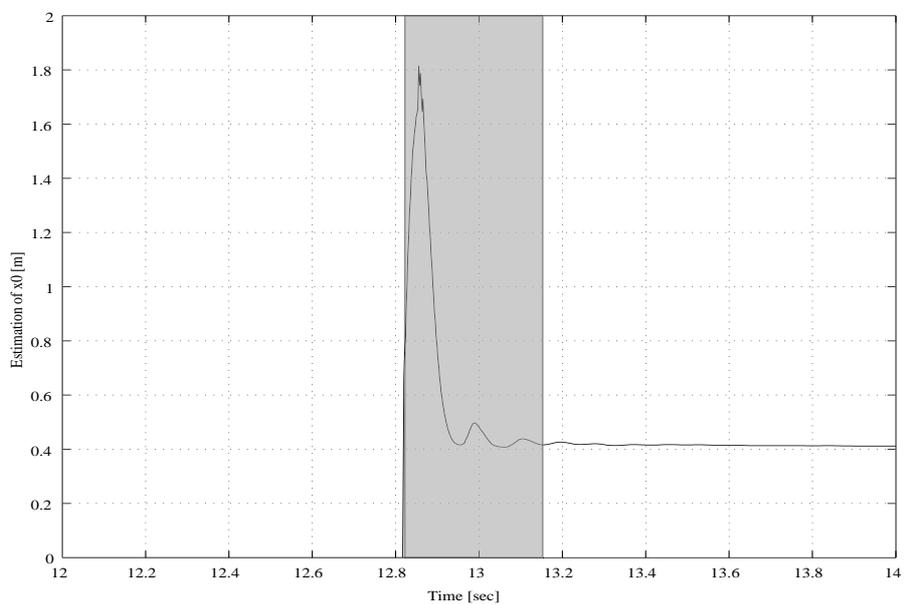


図 24 適応環境オブザーバ A を用いて変動力を印加した場合の \hat{x}_0 の推定速度評価

4.4 制御則切替時の安定性の確認

本節では制御則切替時の安定性を実験的に確認する。リアプノフ関数を用いて導出した適応環境オブザーバの実験結果を図 25, 26 に示す。どちらのグラフの発散していないことから通信遅延に対して安定であることがわかる。

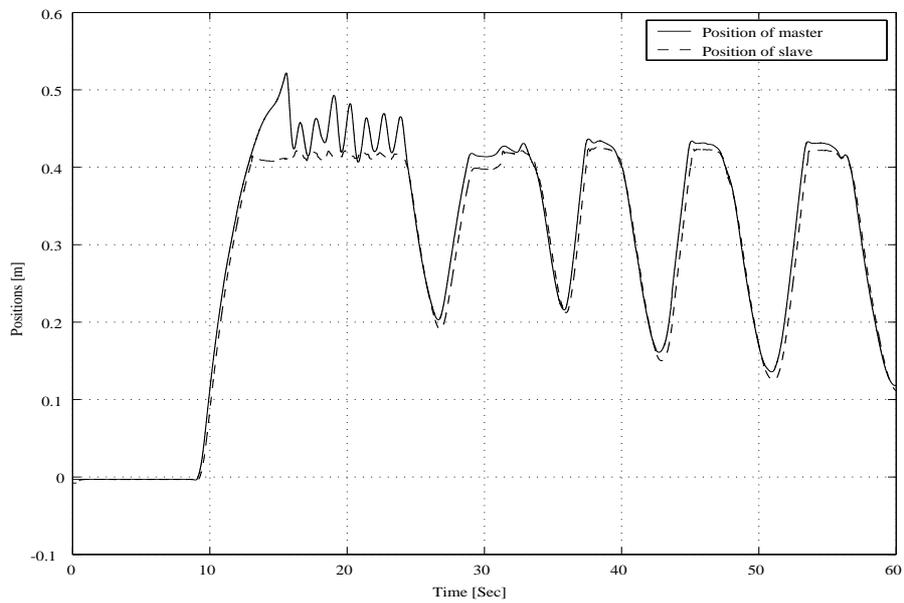


図 25 適応環境オブザーバ A を用いて制御則切替を繰り返して行った場合の x_m , x_s の実験結果

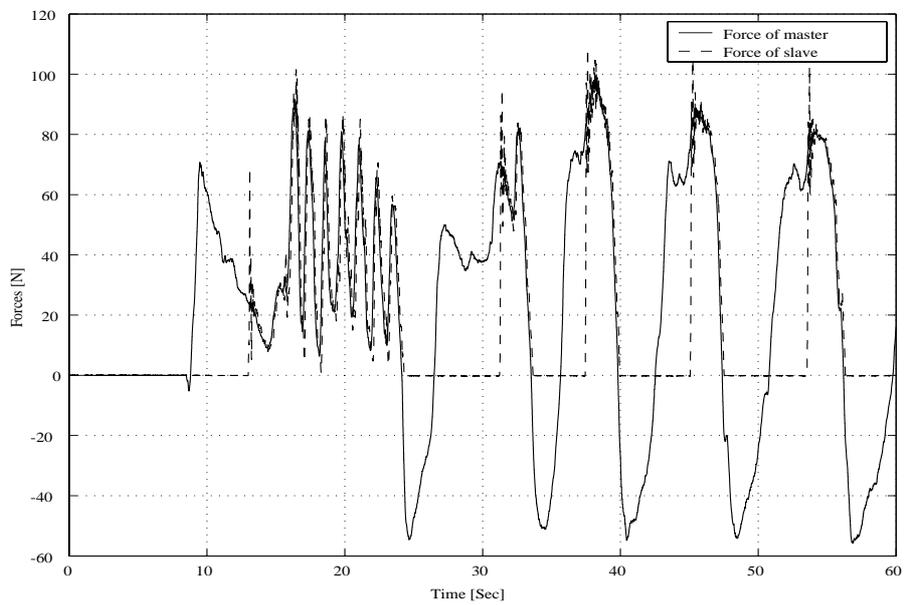


図 26 適応環境オブザーバ A を用いて制御則切替を繰り返して行った場合の $-f_h$, f_e の実験結果

4.5 適応環境オブザーバのまとめ

本節ではリアプノフ関数を用いて導出した適応環境オブザーバとその実験結果について考察を行う。提案手法は本来 $\dot{x}_s \neq 0$ の場合のみに収束するものであるが、本研究では実験的に収束条件を満たさない場合についても収束することを確認した。提案手法は状態追従、安定性ともに十分であるため、遠隔操作に適用可能であると考察できる。また、適応環境オブザーバの収束時間は0.3秒程度であり、実作業への応用に際しても十分な推定速度が得られる。しかしながら、適応環境オブザーバは特に変動する操作力を印加した場合に振動的な推定をすることが確認された。それゆえに位置追従誤差が若干増加する傾向にあることがわかった。位置追従誤差が増大する要因として適応環境オブザーバの非線形的な性質以外にも実環境の非線形性なども考えられるが、本研究では適応環境オブザーバをさらに改善することで振動的な振る舞いが少ない推定ができるオブザーバを開発することを検討する。そのための方針として三平らが提案した時間軸変換の概念を用いた非線形システムの設計法を用いる。この方法は非線形なシステムに対して線形な誤差システムを設計することで極配置による安定なゲイン設計をすることができる。次章以降では時間軸変換を用いた適応環境オブザーバとその性質、実験結果をまとめ有効性を評価する。

5. 時間軸変換を用いた適応オブザーバの設計

本研究では遠隔操作における適応環境オブザーバの有効性を確かめるために、これまでにリアプノフ関数から導出する適応環境オブザーバを用いてコンプライアント環境モデルを推定する方法を提案し、有効性を議論してきた。しかしながら、提案手法は作業環境や適応環境オブザーバ自身の非線形性の影響で推定結果が振動的になることが確認され、振動の影響で位置追従精度が劣化するこがとが分かった。

そこで本章では振動的でない推定結果が得られる適応環境オブザーバの設計法として時間軸変換を用いる方法を提案する。この方法は誤差システムを線形システムに変換することができ、線形制御理論と同様に極配置などによる安定化制御設計が可能である。すなわち、非線形な適応環境オブザーバの非線形性を補償することができる。また、線形なオブザーバと同様に推定結果の過渡応答をゲイン調整により制御することが可能であるため、出力の振動性を抑えることができる。したがって、リアプノフ関数を用いて設計した適応環境オブザーバの振動的な性質に起因する力誤差の増大を低減することがこのオブザーバの狙いである。

このとき、適応環境オブザーバは (39) - (42) 式で与えられる。

$$\dot{\hat{f}}_e = -\hat{\gamma}^{-1}\dot{x}_s - k_1|\dot{x}_s|e_f \quad (39)$$

$$\dot{\hat{\gamma}}^{-1} = k_2\sigma e_f \dot{x}_s \quad (40)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0 & (\hat{\gamma}^{-1} \geq \gamma^+ \text{ and } e\dot{x}_s \geq 0) \\ 0 & (\hat{\gamma}^{-1} \leq \gamma^- \text{ and } e\dot{x}_s \leq 0) \\ 1 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (41)$$

$$\hat{x}_0 = \frac{\hat{f}_e}{\hat{\gamma}^{-1}} + x_s \quad (42)$$

5.1 適応環境オブザーバの収束性

時間軸変換を用いて導出した適応環境オブザーバの収束性について証明する。ここで、以下の定理を考える。

定理 2

適応環境オブザーバを (39) - (42) 式考える。行列 A が安定行列であり、かつ実固有値を持つ場合、オブザーバは振動せずに漸近的に収束する。

$$A = \begin{bmatrix} -k_1 & -1 \\ k_2\sigma & 0 \end{bmatrix} \quad (43)$$

補題 1 適応環境オブザーバ (39) - (42) を考える。スレーブシステムの手先速度は $\dot{x}_s \neq 0$ であり、環境剛性の真値 $\hat{\gamma}^{-1}$ は $\gamma^- \geq \gamma^{-1} \geq \gamma^+$ を満たすものとする。このとき、 $t \rightarrow \infty$ において $\hat{\gamma}^{-1} \rightarrow \gamma^{-1}$ 、 $\hat{f}_e \rightarrow f_e$ が成立する。

証明 1 以下のような Lyapunov 関数の候補を考える。

$$V = k_2 e_f^2 + (\hat{\gamma}^{-1} - \gamma^{-1})^2 \quad (44)$$

このとき、Lyapunov 関数の微分 \dot{V} は以下ようになる。

$$\dot{V} = 2\{k_2 e_f \dot{e}_f + (\hat{\gamma}^{-1} - \gamma^{-1}) \dot{\hat{\gamma}}^{-1}\} \quad (45)$$

$$\begin{aligned} &= 2\{k_2 e_f (\gamma^{-1} \dot{x}_s - \hat{\gamma}^{-1} \dot{x}_s - k_1 |\dot{x}_s| e_f) \\ &+ (\hat{\gamma}^{-1} - \gamma^{-1}) k_2 \sigma e_f \dot{x}_s\} \quad (46) \end{aligned}$$

$$= -2k_1 k_2 e_f^2 |\dot{x}_s| + 2(\hat{\gamma}^{-1} - \gamma^{-1}) (k_2 \sigma e_f \dot{x}_s - k_2 e \dot{x}_s) \quad (47)$$

ここで、参考文献 [10] と同様の解析を行うことにより、次式が得られる。

$$\dot{V} \leq -2k_1 k_2 e_f^2 |\dot{x}_s| \quad (48)$$

すなわち、

$$\dot{V} \leq 0 \quad (49)$$

が得られた．以下も [10] と同様の解析により $t \rightarrow \infty$ において $\hat{f}_e \rightarrow f_e$ かつ $\hat{\gamma}^{-1} \rightarrow \gamma^{-1}$ が得られる．

補題 2 適応環境オブザーバ (39) - (42) を考える．スレーブシステムの手先速度の符号が変化しない，すなわち $\text{sgn}\dot{x}_s = \text{const}$ と仮定する．また，誤差を $e = [e_f, e_\gamma]^T$ ， $e_f = \hat{f}_e - f_e$ ， $e_\gamma = \hat{\gamma}^{-1} - \gamma$ と定義する．さらに，時間軸変換関数を次式のように選ぶ．

$$\frac{d\tau}{dt} = |\dot{x}_s| \quad (50)$$

このとき，誤差システムは $e = 0$ 近傍において以下のように線形化できる．

$$\frac{d}{d\tau}e = \begin{bmatrix} -k_1 & -1 \\ k_2 & 0 \end{bmatrix} e \quad (\dot{x}_s > 0) \quad (51)$$

$$\frac{d}{d\tau}e = \begin{bmatrix} -k_1 & 1 \\ -k_2 & 0 \end{bmatrix} e \quad (\dot{x}_s < 0) \quad (52)$$

証明 2

証明は自明であるため省略する．

定理の証明

補題 1 より， $\dot{x}_s \neq 0$ であればオブザーバは $k_1, k_2 > 0$ のとき正しく動作し， $t \rightarrow \infty$ において $\hat{\gamma}^{-1} \rightarrow \gamma^{-1}$ ， $\hat{f}_e \rightarrow f_e$ が成立する．これより，十分時間が経過すれば $\hat{\gamma}^{-1}$ は真値 γ^{-1} に十分近くなることに注意すれば $\sigma = 1$ とみなせる．さらに， \dot{x}_s の符号が変わらないとき補題??より誤差システムは時間軸変換により線形化される．ここで， $k_1^2 - 4k_2 > 0$ であれば，システム (51) と (52) の両方ですべての固有値は実数になるため， \dot{x}_s の符号が一定である限りにおいて誤差システムは振動せず原点に収束する．

5.2 オブザーバゲインの設計

安定で振動しない誤差システムを設計するためには行列 A を安定行列, かつ実固有値を持つように設計する必要がある. また, 適応環境オブザーバは (41) 式における $\sigma = 1$ の場合にのみ動作するため, この場合にのみ安定性を解析する.

行列 A の特性方程式 $|sI - A|$ は $s^2 + k_1s + k_2 = 0$ となり, 固有値は (53) 式, (54) 式のように求まる.

$$\lambda_1 = \frac{-k_1 + \sqrt{k_1^2 - 4k_2}}{2} \quad (53)$$

$$\lambda_2 = \frac{-k_1 - \sqrt{k_1^2 - 4k_2}}{2} \quad (54)$$

上記の固有値が安定かつ実数の値を持つ条件は以下のように求まる.

$$k_1 > 0 \quad (55)$$

$$k_2 < \frac{k_1^2}{4} \quad (56)$$

また, 固有値の実数部分を虚軸からなるべく離れた設定をする方が安定するが, センサノイズなどの外乱, 環境モデルのモデル化誤差の影響のために本研究では理想的な極配置をすることができない. そこで, 本研究では固有値 λ_1, λ_2 をそれぞれ, -9999.98, -0.02 と設定する. 設定する固有値は理論的に安定であり, 実験的にも外乱の影響を受けにくいことを確認している.

従って, オブザーバゲイン k_1, k_2 はそれぞれ $k_1 = 10000.0, k_2 = 200.0$ となる. また, 安定性を議論する場合, 2つの固有値が両方とも負であることが求められ, かつ, 振動特性は大きい方の固有値に従う.

5.3 適応環境オブザーバの実験結果

本節では時間軸変換を用いた適応環境オブザーバの実機実験結果を示す。リアプノフ関数を用いて導出した適応環境オブザーバと同じ制御仕様、実験条件で実験を行い、実機により取得した実験結果を示す。また、適応環境オブザーバ A と B の比較のため、誤差平均と誤差分散から両方法の性能を比較する。また、時間軸変換を用いた適応環境オブザーバのゲインや初期値、上界、下界などのパラメータを表 12 にまとめる。

表 12 時間軸変換を用いた方法のオブザーバゲイン k_1, k_2 , 推定初期値 $\hat{\gamma}^{-1}(0)$ と上界値 γ^+ と下界値 γ^-

k_1	k_2	$\hat{\gamma}^{-1}(0)$ [N/m]	γ^+ [N/m]	γ^- [N/m]
10000.0	200.0	100.0	50000.0	10.0

5.3.1 操作力を一定に保った場合の Constrained motion の実験結果

マスタシステムに一定の操作力を印加した場合の実験結果を示す。このときの実験結果を図 27 - 32 に示し、精度の評価指標として位置と力状態の誤差平均と誤差分散、適応環境オブザーバの収束速度を表 13 - 15 に示す。比較データとしてリアプノフ関数を用いた場合の適応環境オブザーバの誤差平均と誤差分散の結果を示す。リアプノフ関数を用いて導出した適応環境オブザーバは 1.5[cm] 程度の精度でしか、環境の情報を提示することが出来なかったが、本節で示す時間軸変換を用いた適応環境オブザーバを用いる方法は 1[mm] 程度の精度で環境情報提示が来ていることが表 13 から分かる。表 14 から力追従精度はほぼ変わらない値を示しているが、本手法は位置追従精度の向上を目指したものであるため、特に問題とならない。また、位置追従制度、力追従精度の評価区間は 20 - 60[sec] の区間とする。

表 13 適応環境オブザーバ B を用いて一定力を印加した場合の位置の誤差平均と誤差分散

	誤差平均 [m]	誤差分散 [m^2]
適応環境オブザーバ B	1.235×10^{-3}	3.424×10^{-7}
適応環境オブザーバ A	1.454×10^{-2}	1.022×10^{-7}

表 14 適応環境オブザーバ B を用いて一定力を印加した場合の力の誤差平均と誤差分散

	誤差平均 [N]	誤差分散 [N^2]
適応環境オブザーバ B	-1.378×10^{-1}	2.431
適応環境オブザーバ A	-6.931×10^{-2}	2.951×10^{-1}

表 15 適応環境オブザーバ B を用いて一定力を印加した場合の $\hat{\gamma}^{-1}$, \hat{x}_0 の推定速度評価

	収束区間 [sec]	収束時間 [sec]
初期位置推定 \hat{x}_0	11.51 - 11.90	0.39
剛性推定 $\hat{\gamma}^{-1}$	11.51 - 11.88	0.37

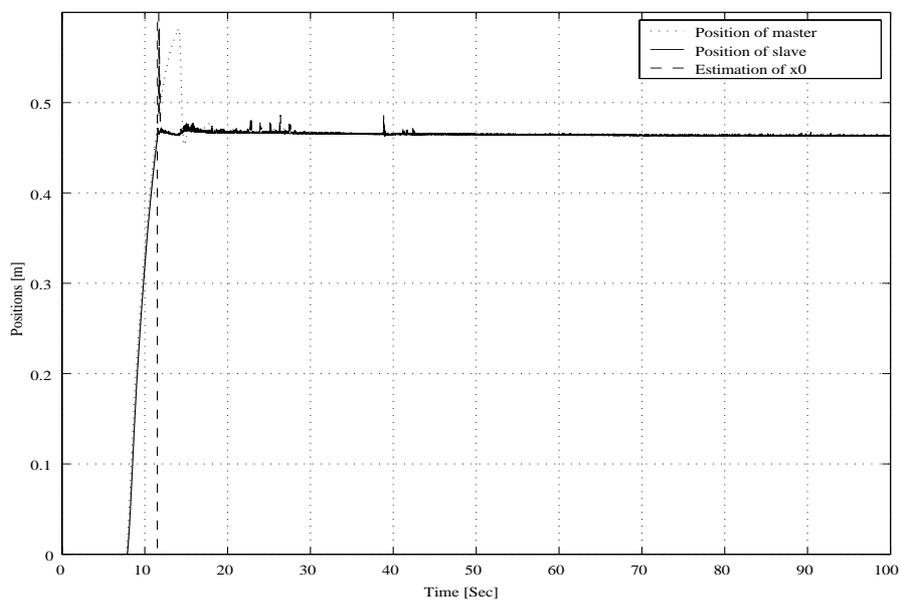


図 27 適応環境オブザーバ B を用いて一定力を印加した場合の x_m , x_s , \hat{x}_0 の実験結果

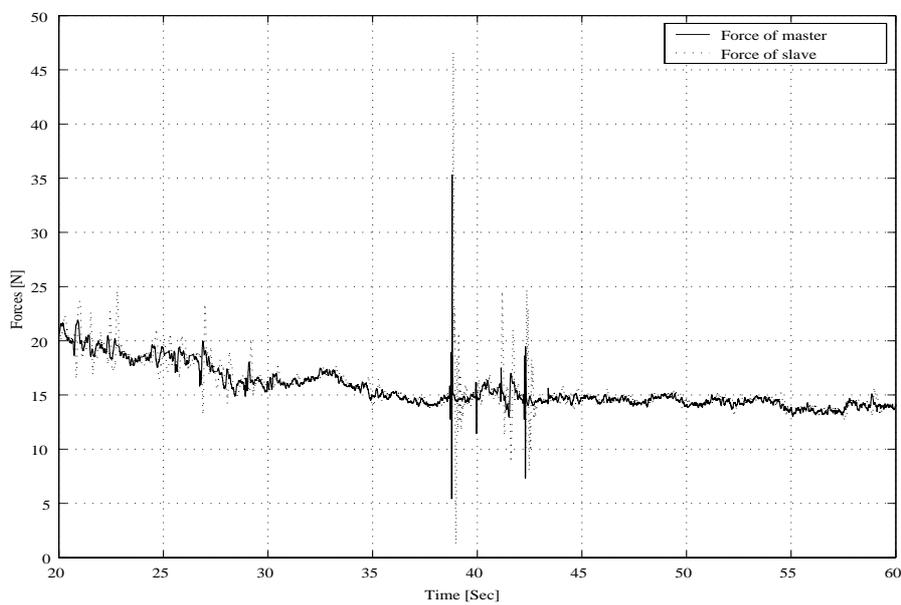


図 28 適応環境オブザーバ B を用いて一定力を印加した場合の $-f_h$, f_e の実験結果

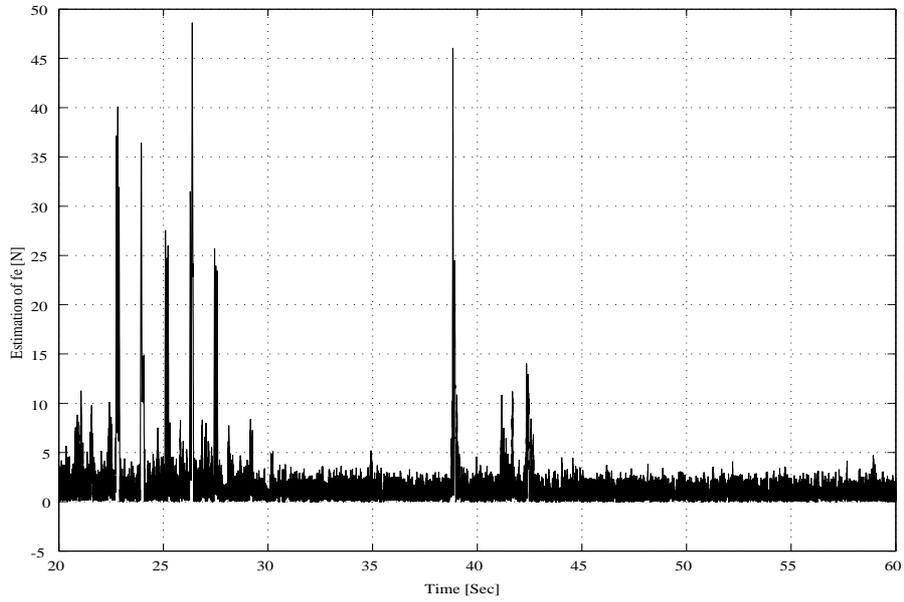


図 29 適応環境オブザーバ B を用いて一定力を印加した場合の \hat{f}_e の推定結果

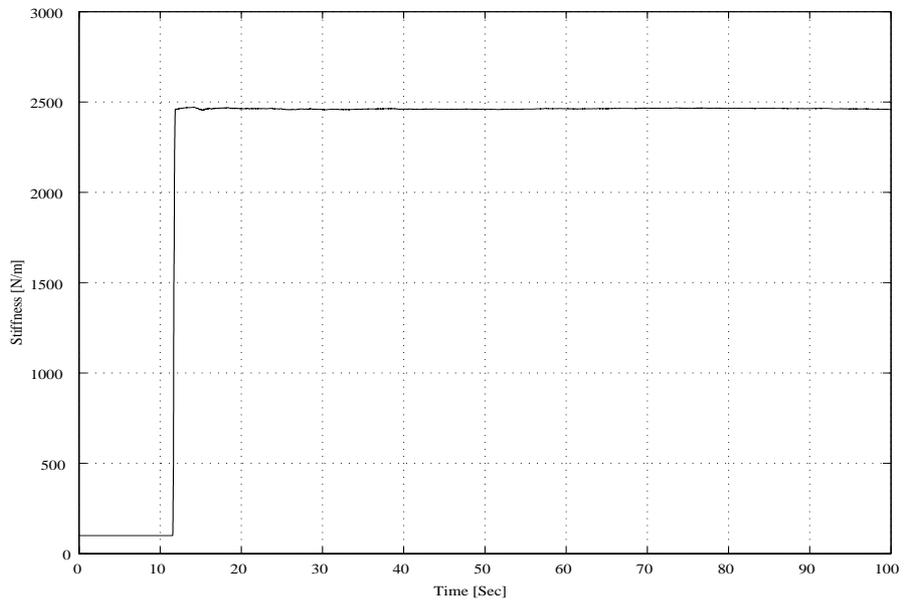


図 30 適応環境オブザーバ B を用いて一定力を印加した場合の $\hat{\gamma}^{-1}$ の推定結果

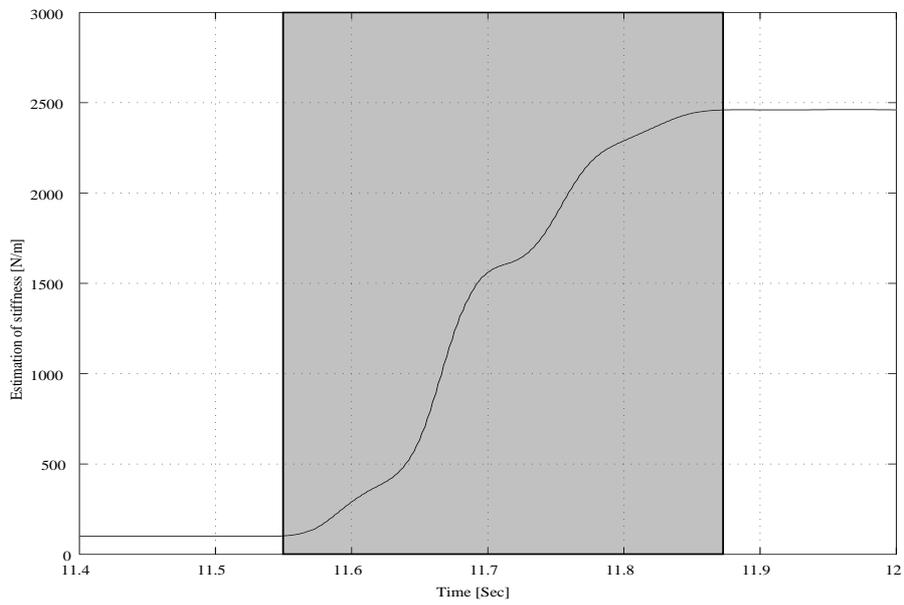


図 31 適応環境オブザーバ B を用いて一定力を印加した場合の $\hat{\gamma}^{-1}$ の推定速度評価

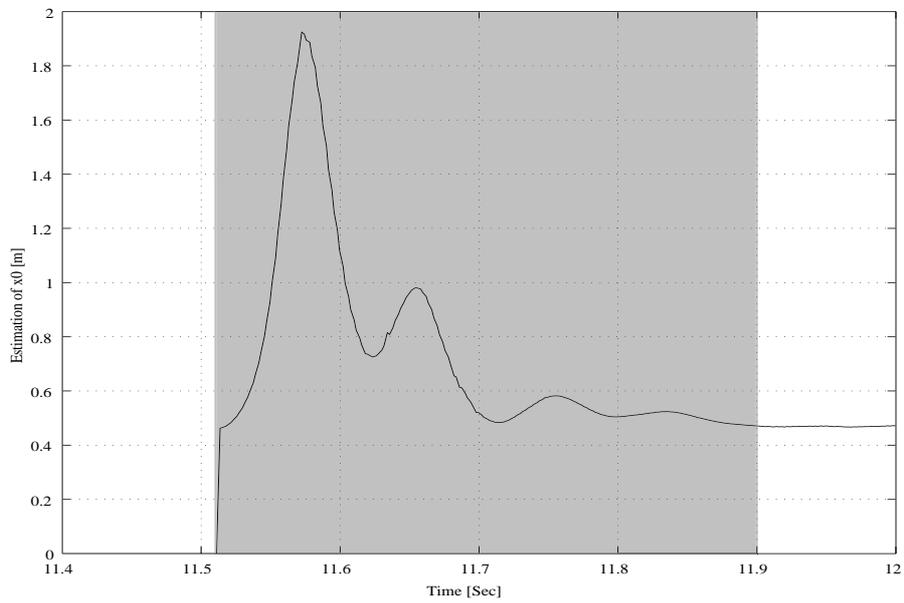


図 32 適応環境オブザーバ B を用いて一定力を印加した場合の \hat{x}_0 の推定速度評価

5.3.2 操作力を変動させた場合の Constrained motion の実験結果

マスタシステムに変動する操作力を印加した場合の実験結果を示す。本実験ではリアプノフ関数を用いて導出した適応環境オブザーバの実験と同様に周期的に変動する操作力をシステムに対して印加し、実験データを取得した。この場合の実験結果を図 33 - 38 に示し、位置と力の誤差平均と誤差分散、適応環境オブザーバの収束速度を表 16 - 18 に示す。この場合の位置追従制度は 6[mm] 程度であり、良好な環境情報提示を示している。また、力追従制度はリアプノフ関数を用いて導出した方法と同程度であるが、本手法は位置追従性の向上に着目したものであるため、特に問題はない。

なお、力追従の評価区間は 20 - 60 [sec] の区間のデータを用いた。

表 16 適応環境オブザーバ B を用いて変動力を印加した場合の位置の誤差平均と誤差分散

	誤差平均 [m]	誤差分散 [m^2]
適応環境オブザーバ B	5.885×10^{-3}	8.398×10^{-5}
適応環境オブザーバ A	1.523×10^{-2}	1.030×10^{-4}

表 17 適応環境オブザーバ B を用いて変動力を印加した場合の力の誤差平均と誤差分散

	誤差平均 [N]	誤差分散 [N^2]
適応環境オブザーバ B	-3.383×10^{-2}	54.95
適応環境オブザーバ A	-2.720×10^{-2}	48.04

表 18 適応環境オブザーバ B を用いて変動力を印加した場合の $\hat{\gamma}^{-1}$, \hat{x}_0 の収束速度評価

	収束区間 [sec]	収束時間 [sec]
初期位置推定 \hat{x}_0	13.06 - 13.43	0.37
剛性推定 $\hat{\gamma}^{-1}$	13.06 - 13.46	0.40

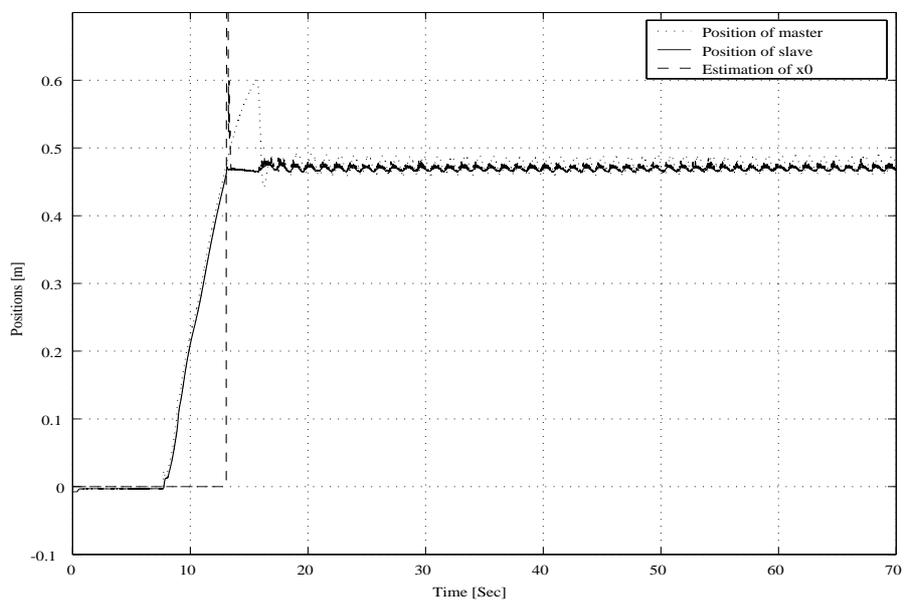


図 33 適応環境オブザーバ B を用いて変動力を印加した場合の x_m , x_s , \hat{x}_0 の実験結果

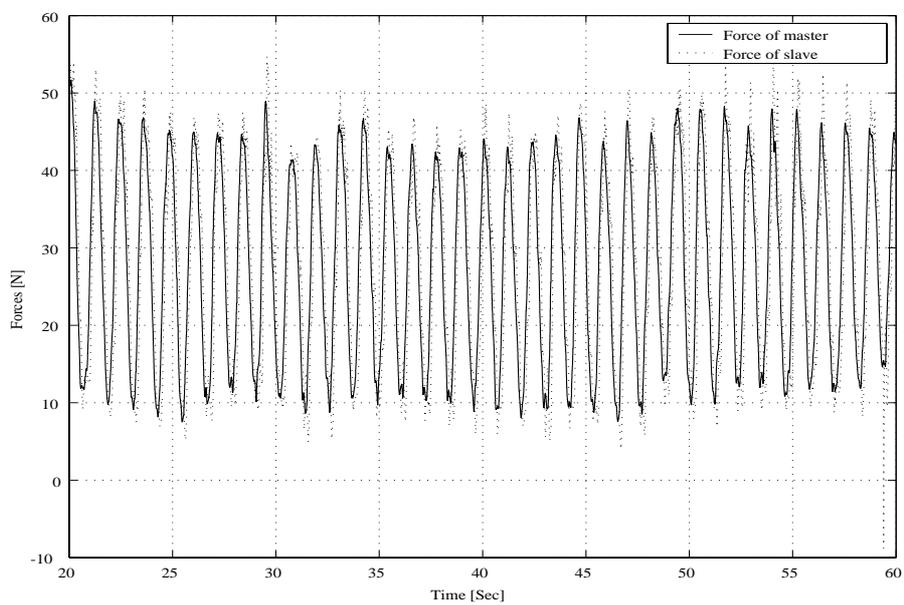


図 34 適応環境オブザーバ B を用いて変動力を印加した場合の $-f_h$, f_e の実験結果

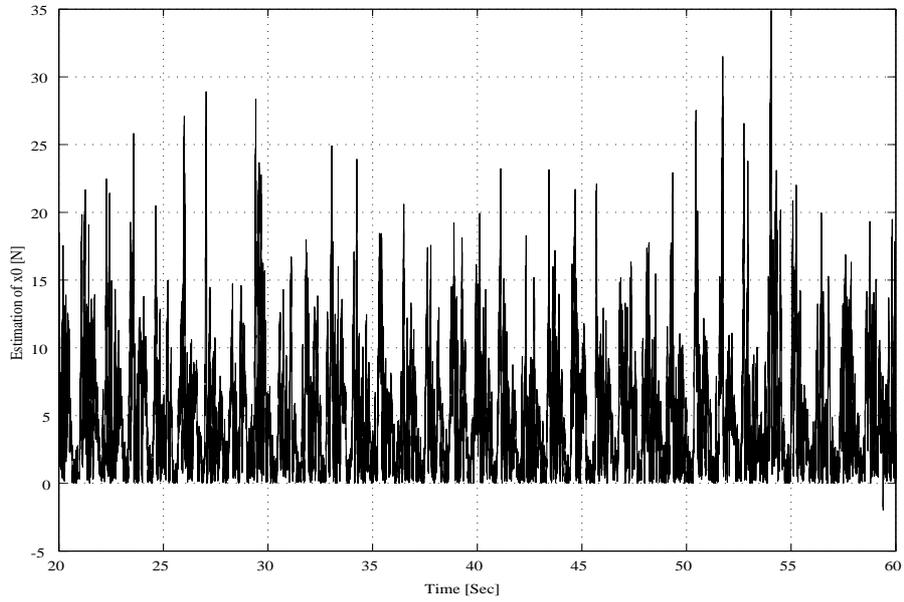


図 35 適応環境オブザーバ B を用いて変動力を印加した場合の \hat{f}_e の実験結果

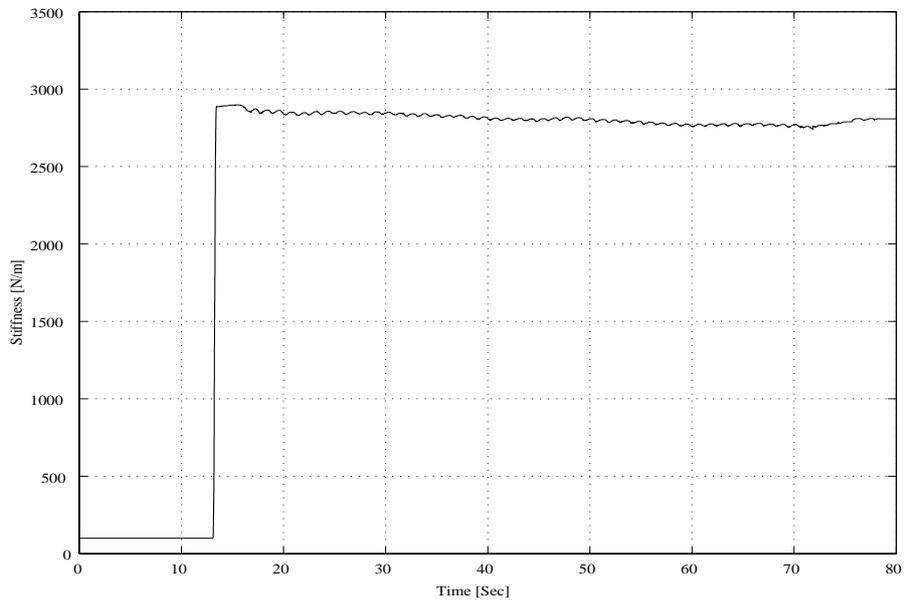


図 36 適応環境オブザーバ B を用いて変動力を印加した場合の $\hat{\gamma}^{-1}$ の実験結果

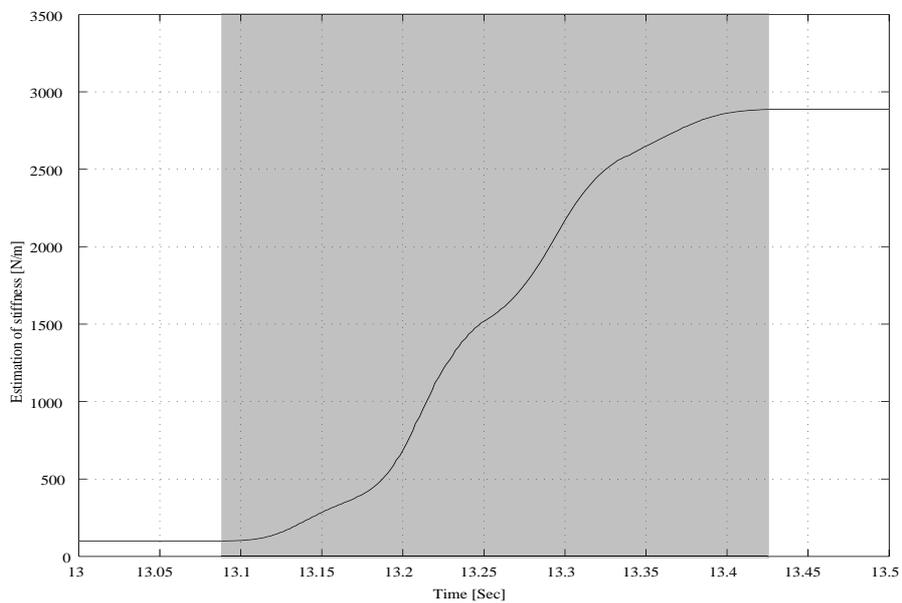


図 37 適応環境オブザーバ B を用いて変動力を印加した場合の $\hat{\gamma}^{-1}$ の推定速度評価

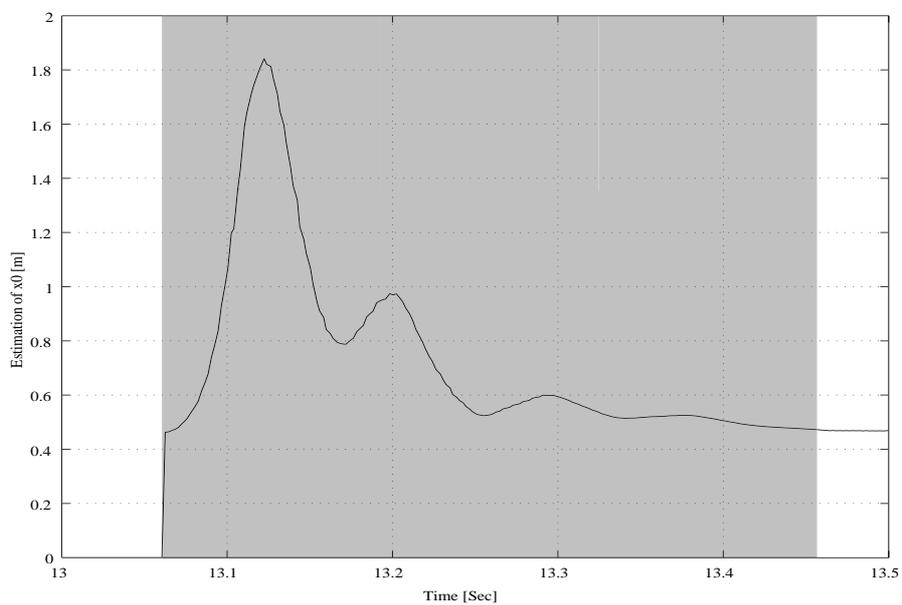


図 38 適応環境オブザーバ B を用いて変動力を印加した場合の \hat{x}_0 の推定速度評価

5.4 制御則切替時の安定性の確認

本節では制御則切替時の安定性を実験的に確認する。時間軸変換の概念を用いて導出した適応環境オブザーバの実験結果を図 39, 40 に示す。どちらのグラフの発散していないため安定であると評価できる。

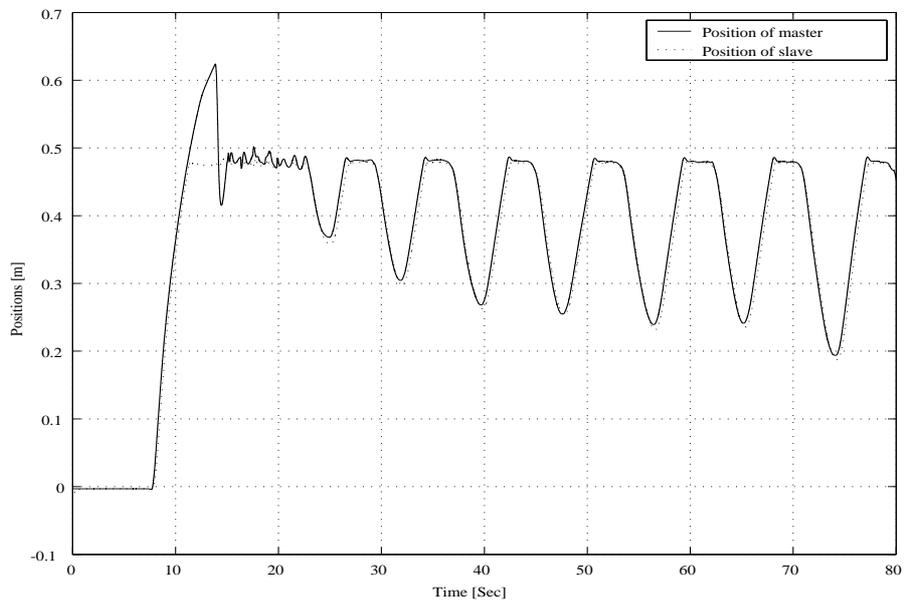


図 39 適応環境オブザーバBを用いて制御則切替を繰り返して行った場合の x_m , x_s の実験結果

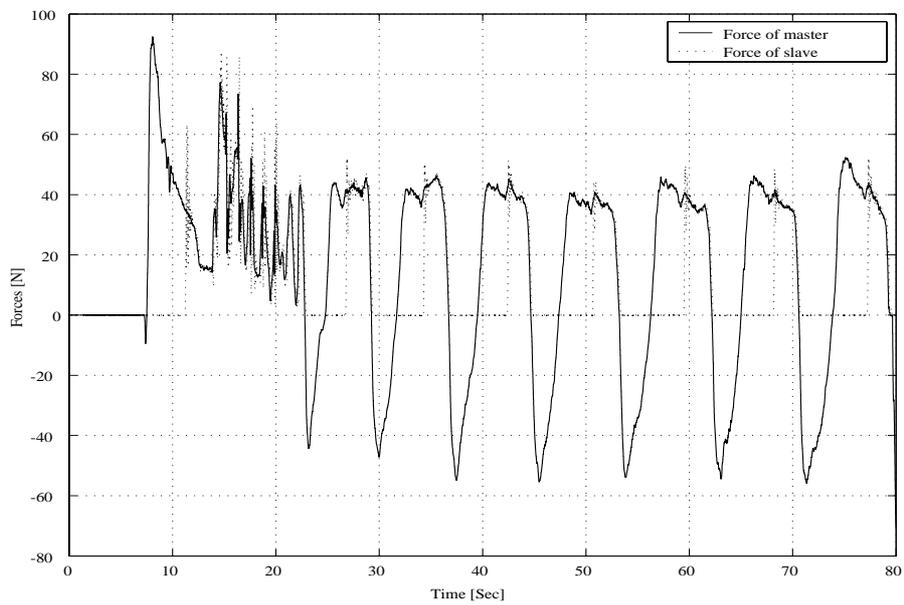


図 40 適応環境オブザーバBを用いて制御則切替を繰り返して行った場合の $-f_h$, f_e の実験結果

5.5 適応環境オブザーバのまとめ

本章では時間軸変換の概念を用いて設計した適応環境オブザーバを提案し、安定なゲインの設計方法と実験結果を示した。提案手法は極配置によるゲインの設計を行うが、作業環境の非線形性に起因するモデル化誤差やセンサのノイズの影響のために理想的な極配置ができないことがわかった。しかしながら、極配置によるゲインの設計はある条件下では有効であり、実験的にも安定な環境情報推定が行えることがわかった。また、実験結果から操作力を一定に保つ場合に関してはほぼ振動的な挙動を示さずに推定できることが確認された。

環境の提示精度、すなわち位置と力の追従精度についてはリアプノフ関数を用いる適応環境オブザーバを導入した場合に比べ、一桁ほど精度が向上した。また、力追従精度については同程度であったが十分な精密性を保っているため、本研究で提案する適応環境オブザーバを用いる方法は精密性を必要とするような制御に対しても有効であると評価することができる。推定速度については0.3秒程度と非常に高速であるため、十分に実作業への応用も検討できる。

しかしながら、操作力を変動させる場合に関してはまだ改善の余地があり、特に推定結果に若干の振動的な挙動が残る。研究課題として、まず、適応環境オブザーバが振動的な推定を行った原因を特定し、振動を除去する必要がある。また、摩擦の影響を今回は考慮していないため、本研究で提案する手法が摩擦に対して有効であるかどうかを検証する必要がある。

6. 結論

適応環境オブザーバによるリアルタイム環境推定を行うハイブリッド型遠隔操作システムを提案し、理論的、実験的に有効性を確認した。実際にロボットマニピュレータを用いて遠隔操作実験を行い、1秒間の通信遅延下においても安定で高速な環境提示が可能なことを確認した。また、適応環境オブザーバを用いない場合の結果と比較を行い、適応環境オブザーバを用いる方が優れていることを確認した。提案するシステムは通信遅延の影響を補償することができ、通信遅延下でも高速に安定な切替をできることがわかった。

適応環境オブザーバは理論的には $\dot{x}_s \neq 0$ の条件下でしか収束を保証しないが、実験より $\dot{x}_s = 0$ の場合でも収束することを確認し、かつ高速な環境推定を行うことを確かめられた。このことから実際の応用に対しても有効であると考えられる。

また、リアプノフ関数を用いる方法では推定に振動的な性質が残ることから Constrained motion 時に位置追従誤差が発生したが、時間軸変換を用いる方法はほとんど振動せずに推定することができ、追従精度も良好であった。特に時間軸変換を用いる方法は 1.5 - 6.0 [mm] 程度の誤差精度での環境提示が可能であり、実際の作業環境をかなりの高精度で提示できることが実験から分かった。しかしながら、遠隔医療のような微細な制御が求められる応用はより高精度の制御性能が必要である。そのため、時間軸変換を用いる方法で問題となったセンサノイズの影響を補償する必要がある。実験の結果を見るとセンサノイズは白色雑音に近いと考えられる。そのため、センサノイズはカルマンフィルタを用いることで解消できると考えられる。また、本研究で提案する手法は時間軸変換により線形化された誤差システムを持つため、一般のカルマンフィルタの設計法をそのまま適用できる。このカルマンフィルタを用いる方法については研究の課題とする。

本研究では基礎研究として、1自由度の高剛性マニピュレータに実装することを研究対象としており、実用的な応用をするためには多自由度への拡張が必要になる。このとき、マニピュレータ自身の剛性も考慮することが求められる。また、

実際の作業環境は非線形な弾性特性を持っているため、より精密な制御を行う際は環境モデルを再設計する必要がある。そのためロボット自身の剛性や摩擦を考慮することに加え、作業環境の粘弾性や摩擦を考慮する必要がある。今回は作業環境の剛性のみを環境モデルに取り込んでいるが、さらなる力覚提示の向上のためには作業環境の動摩擦も含めることを考えなければならない。また、多自由度化によるすべり動作を考慮する場合、摩擦の影響をどのように取り込むかが問題となる。本研究で提案する適応環境オブザーバが摩擦項を推定できる可能性もあるが、実験的に確かめる必要がある。仮に摩擦項を推定できないと分かった場合は摩擦項を別途推定するような形式に適応環境オブザーバを再設計する必要がある。これらの問題は今後の課題である。

参考文献

- [1] T. B. Sheridan: Space Teleoperation Through Time Delay: Review and Prognosis, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 9, No. 5, pp. 592-606, 1993
- [2] R. J. Anderson and M. W. Spong: Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay, *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. 39, No. 5, pp. 494-501, 1989
- [3] G. Niemeyer and J. J. E. Slotine: Designing Force Reflecting Teleoperators with Large Time Delays to Appear as Virtual Tools, *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'97)*, pp. 2212-2218, 1997
- [4] G. M. H. Leung, B. A. Francis, and J. Apkarian: Bilateral Controller for Teleoperators with Time Delay via μ -Synthesis, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 11, No. 1, pp. 105-116, 1995
- [5] 藤本 英雄, 佐野 明人, 岡本 啓史: インターネットを介した力帰還型バイラテラル遠隔操作, *日本ロボット学会誌*, Vol. 18, No. 5, pp. 713 - 720, 2000
- [6] R. Oboe and P. Fiorini: A Design and Control Environment for Internet-Based Telerobotics, *Int. J. Robotics Res*, Vol. 17, No. 4, pp. 433-449, 1998
- [7] Y. Tsumaki, Y. Hoshi, H. Naruse, and M. Uchiyama: Virtual Reality Based Teleoperation which Tolerates Geometrical Modeling Errors, *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'96)*, pp. 1023-1030, 1996
- [8] T. Kotoku: A Predictive Display with Force Feedback and its Application to Remote Manipulation System with Transmission Time Delay, *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'92)*, pp. 239-246, 1992

- [9] Y. Kakizoe, H. Nakamura, and H. Nishitani: Hybrid Control of Remote Controlled Bilateral Manipulation System, *SICE-ICASE International Joint Conference 2006*, pp. 5345 - 5349, 2006
- [10] Y. Kakizoe, H. Nakamura, H. Nishitani: Remote Hybrid Controller with Adaptive Environment Observer, *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration (SICE JCMSI)*, Vol.1 No.6, pp. 443-451. 2008.
- [11] 三平 満司, 古田 勝久: 時間軸の変換を用いた非線形システムの線形化 - 新時間軸での線形化 - , 計測自動制御学会論文集, Vol. 22, No. 10, pp. 1030 - 1036, 1986
- [12] I. Polushin, X. Liu, and C. H. Lung: A Force Reflection Algorithm for Improved Transparency in Bilateral Teleoperation with Communication Delay, *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'06)*, pp. 2914-2920, 2006
- [13] J. Roy and L. Whitcomb: Adaptive Control of Position/Velocity Controlled Robots: Theory and Experiment, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 18, No. 2, pp. 121 - 137, 2002
- [14] H. K. Khalil: Nonlinear Systems Third Edition, *Prentice Hall*, 2002
- [15] A. F. Filippov: Differential Equations with Discontinuous Righthand Sides, *Kluwer*, 1988

謝辞

本研究を進めるにあたって、主指導教官として常に暖かい指導と、研究の場を与えて下さった奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科システム制御・管理講座 西谷 紘一 教授に深く感謝いたします。

お忙しい中、論文審査委員としてご助言を頂きました小笠原 司 教授に深く感謝いたします。

貴重なご意見、及びご助言を頂きましたシステム制御・管理講座 野田 賢准 教授ならびに中村 文一 助教に深く感謝いたします。

研究業績

学術雑誌論文

- [1] Y. Kakizoe, H. Nakamura, and H. Nishitani: Remote Hybrid Controller with Adaptive Environment Observer, *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration (SICE JCMSI)*, Vol. 1 No. 6, pp. 443-451. 2008.

国際会議論文

- [1] Y. Kakizoe, H. Nakamura, and H. Nishitani: Hybrid Control of Remote Controlled Bilateral Manipulation System, *SICE-ICASE International Joint Conference 2006*, pp. 5345-5649, 2006
- [2] Y. Kakizoe, H. Nakamura, and H. Nishitani: Remote Bilateral Control of Master-slave Manipulators with an Environment Observer, *SICE Annual Conference 2007*, pp. 95-99, 2007
- [3] Y. Kakizoe, H. Nakamura, and H. Nishitani: Remote Hybrid Controller with Adaptive Environment Observer, *2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2008)*, pp. 1503-1508, 2009.
- [4] Y. Kakizoe, H. Nakamura, and H. Nishitani: Stable Hybrid Remote Manipulation System with Adaptive Environment Observer using Time-Scale Transformation, *The 48th IEEE Conference on Decision and Control (CDC 2009)*, 2009, 投稿中.

国内会議論文

- [1] 柿添有紀, 中村文一, 西谷紘一, 山下裕: ハイブリッド制御則を用いたマニピュレータの遠隔操作システム, 平成 16 年度計測自動制御学会関西支部学生研究発表会, pp165-168, 2005.

- [2] 柿添有紀, 中村文一, 西谷紘一: ハイブリッド制御則を用いたマニピュレータの遠隔操作システムの開発, 第 10 回ロボティクスシンポジウム論文集, pp. 393-398, 2005.
- [3] 中村文一, 柿添有紀, 山下裕, 西谷紘一: 遠隔操作マニピュレータシステムにおけるハイブリッド制御系の安定性解析, 第 5 回計測自動制御学会部門大会, pp231-234, 2005.
- [4] 井上照将, 柿添有紀, 中村文一, 西谷紘一: 環境オブザーバを用いた遠隔操作システムの開発, 第 24 回日本ロボット学会学術講演会, 2C21, 2006.
- [5] 柿添有紀, 中村文一, 西谷紘一: 適応環境オブザーバを用いたハイブリッド型遠隔操作システム, 第 13 回ロボティクスシンポジウム, 2008. 第 13 回ロボティクスシンポジウム論文集. pp. 19-26, 2008
- [6] 柿添有紀, 中村文一, 西谷紘一: 時間軸変換を用いた適応環境オブザーバの遠隔操作システムへの適用, 第 9 回計測自動制御学会制御部門大会, 2009, TB4-3.