

宇宙用マニピュレータの軌道制御に関する研究

山本俊彦

1	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	従来の研究	3
1.3	研究の目的	5
1.4	本論文の構成と概要	6
2	マニピュレータと搭載アンテナの同時制御	10
2.1	FFRのモデル	10
2.2	一般化ヤコビ行列と分解速度制御法	12
2.3	拡張一般化ヤコビ行列	13
2.4	同時制御	17
2.4.1	運動方程式	18
2.4.2	制御法	18
2.4.3	シミュレーションの方法	19
2.4.4	シミュレーション結果および考察	20
3	未知浮遊物体捕捉後における手先軌道制御	
	— 動力学と運動学によるパラメータ推定 —	24
3.1	FFRのモデル	25
3.2	パラメータ推定	26
3.2.1	I_M と I_S に含まれるパラメータの推定(推定1)	27
3.2.2	J_M と J_S に含まれるパラメータの推定(推定2)	28
3.3	計算機シミュレーション	29
3.3.1	シミュレーションの方法	30
3.3.2	シミュレーション結果	30
4	未知浮遊物体捕捉後における手先軌道制御	
	— デジタル適応制御 —	38
4.1	宇宙ロボットのモデル	39
4.2	運動学関係式の離散化と分解速度制御	40
4.2.1	運動学関係式の離散化	40
4.2.2	分解速度制御	40
4.3	適応制御系の設計	41
4.3.1	一般化ヤコビ行列の簡単化	42
4.3.2	制御則	43
4.4	シミュレーション	46



5	離散時間形適応制御によるデジタル制御実験	53
5.1	テストベッド設計コンセプト	53
5.2	システム構成	54
5.3	テストベッドの性能評価	59
5.3.1	FFRシステムの仕様	59
5.3.2	擬似無重力特性	59
5.3.3	サーボ特性	61
5.4	シミュレータによる実験結果	62
6	結論	69
	謝辞	70
	参考文献	71
	付録	75

第1章 序論

1.1 研究の背景

諸外国に大きく遅れをとってスタートしたわが国の宇宙計画も，国産技術で開発したH-IIロケット3号機による，静止気象衛星5号と宇宙実験・観測フリーフライヤ(SFU)の打ち上げ成功により，宇宙開発先進国との遅れを取り戻しつつある．また，米国，欧州，カナダ，ロシアとの共同による国際宇宙ステーション(ISS)計画にも参加し，宇宙環境利用研究や，宇宙実験棟JEM(Japanese Experiment Module)の暴露部におけるマニピュレータ試験などの関連技術の高度化をすすめている⁽¹⁾．しかし，独自の有人活動経験の蓄積や有人ロケット打ち上げ計画を持たないわが国は，有人支援技術の蓄積よりむしろ，HOPE(無人有翼往還機)に代表される自動化・自律化技術に期待をかけている．このような状況の中であって，宇宙ロボットは無人宇宙活動の主役の1つとして期待されている．

宇宙空間に宇宙ステーションなどを建造する場合，打ち上げ前に構造物全体をいくつかのモジュールに分けて，地球の周回軌道上に打ち上げ，宇宙空間で組み上げる方法が考えられている．また，宇宙空間では人工衛星や宇宙ステーションの点検・修理，または修理不可能な衛星の回収などの作業を行う必要性が生じる．このように宇宙開発を実行するためには数多くの船外活動が必要である．しかし，放射線被爆や浮遊物体(高速の隕石やスペースデブリ)の衝突など船外活動には非常に危険を伴うので，人間による船外活動は適切な方法とはいえない．また，母船内などからの遠隔操作は作業効率が悪い．この問題を解決する手段の一つとして，人間に代わって船外作業を行うFFR(Free-Flying Robot)と呼ばれる宇宙ロボットが提案されている⁽²⁾．このロボットは自力移動可能なロボット本体と作業用の多腕マニピュレータ，カメラなどの視覚センサおよびアンテナなどの通信装置を有する．

ここでは，FFRを制御する立場から，宇宙環境の持つ特殊性を地上環境と比較することにより明確にする．

(1) 微小重力環境である。

宇宙空間は、全てのものが浮遊状態にあり、FFRは地上のロボットのような固定点を持たない。ロボットマニピュレータの質量がロボット本体に比べ無視できない場合、マニピュレータの運動により、ロボット本体の位置、姿勢は変化する。したがって、地上のマニピュレータ用に開発された種々の制御法は、宇宙ロボットの制御にはそのままでは使用できない。

微小重力環境であるという特性は、新しい状況も発生させる。つまり、宇宙では重力の影響を無視できるため、大型構造物の建設が可能である。一方、ロケット打ち上げ時での制約（質量や大きさに関して）も加わり、構造物は軽量化設計がなされる。この結果、ロボットは軽量で長大な、言い換えると非常に柔軟な構造物を扱うことになる。また、ロボット自体がそのような構造となることもある。このことと、宇宙には足場がないという状況が重なると、地球上のロボット制御とは異なる振動制御問題が生じる。

また、宇宙空間に浮遊し作業を行うロボットは、地上または母船より指令を受けるための通信機能が必要であるが、マニピュレータを駆動するとロボット本体上に搭載しているアンテナの指向方向も当然変化する。このため、マニピュレータの駆動による反作用を考慮したアンテナの制御機能を付加する必要がある。

(2) 宇宙では高温度差が存在する。

地球の周回軌道上でロボットが活動する場合、ロボットの各部は軌道周期毎に日照と日陰の激しい熱ストレスを受ける。これはロボットのリンクや関節が、時には超高温に、またある時には超低温になることを意味する。このため、例えば関節の摩擦係数（主に粘性摩擦係数）が状態により変化する。さらにはロボット・マニピュレータが膨張・収縮し、ダイナミクスに影響を与えるので、制御にとっては厄介な問題となる。

(3) 宇宙空間は高真空である。

宇宙は高真空環境であるため、ロボットの関節部が暴露状態であれば、通常の潤滑油は使えない。真空における重要な技術課題の一つはロボット機構の潤滑である。摩擦係数は容易に大気中の10倍以上、場合により非常に大きくなる^③。

また、関節部を保護し、宇宙用の固定潤滑油を使用したとしても、真空中ではアクチュエータなどの機器からの排熱は伝導と放射により行わねばならない（空気による対流がない）ので、ある程度の温度上昇は覚悟しなければならない。この場合、専用の温度制御装置を用いることも可能であるが、かなり高価なものとなる。いずれにしても、(2)による現象と同じ結果をもたらすことになる。

以上のように、宇宙環境がFFRの制御問題に与える影響は様々であり、それに伴う悪影響から逃れるためには、新材料の開発や各種装置の開発等は勿論のこと、これらに基づいた新たな制御システムの開発が重要である。

1.2 従来の研究

1.1節で示した宇宙ロボットに固有の諸問題に対して、すでに種々の研究がなされている。諸外国が有人支援技術という立場をとっている関係から、この分野における海外の研究は少ないが、ここでは、従来の研究を1.1節の分類に沿って紹介する。

(1)「微小重力環境である」ことに由来する問題に対処する初期の研究としては、台座衛星の運動を考慮し、マニピュレータの逆運動学を扱った山田ら⁽⁴⁾の研究がある。Longmanら⁽⁵⁾は衛星に取り付けたマニピュレータの関節制御の新しい運動学を導き、衛星の姿勢制御装置によりマニピュレータ駆動時の反動トルクを補償する方法について検討した。しかし、ロボット本体（母船本体）とマニピュレータの同時制御法がアンテナの指向方向とマニピュレータの制御にも可能であるが、両手法とも本体の姿勢制御をするため、大掛かりな姿勢制御装置を必要とし、エネルギー的には得策でない。また、梅谷ら⁽⁶⁾は運動量・角運動量保存の関係式を用いて、地上用のヤコビ行列を宇宙用に拡張した「宇宙用マニピュレータの一般化ヤコビ行列」を提案し、分解速度制御⁽⁷⁾に利用した。さらに、鈴木ら⁽⁸⁾はエンドエフェクタに目標軌道まわりで螺旋（スパイラル）状の摂動を与え、衛星の姿勢変化を誘起し、手先位置姿勢および衛星姿勢の9次元の近似目標軌道を6自由度マニピュレータで実現できることを提案した。しかし、通信機能確保のためにはアンテナの恒常的かつ高精度な姿勢制御が要求されるので、これらの議論だけでは

不十分である。

宇宙空間で通信を確保するためには、宇宙ロボットに自律能力を持たせ、本体に搭載されるアンテナを常に一定方向に向けることが必要である。しかし、これらに関して、その重要性にもかかわらず議論はほとんどなされていない。なお、岡本ら⁹⁾はモーメントムホイールを介して、マニピュレータとロボット本体の同時制御を行い、本体の姿勢変動が軽減されること示している。また、吉田ら¹⁰⁾は、一般化ヤコビ行列を用いた制御問題の応用として、岩田ら¹¹⁾は分解加速度制御を用いて、双腕マニピュレータの作業に携わらないマニピュレータが本体の姿勢制御に利用できることを示唆しているが、具体的な議論はなされていない。

(2)「宇宙では高温差が存在する」、(3)「宇宙空間は高真空である」ことによるロボット制御への影響は、システムパラメータを変化させることである。また、宇宙ロボットの作業内容を考えると、浮遊物体を把持する状況も考えられ、この場合もシステムパラメータの変化が生じる。しかし、宇宙用マニピュレータで提案されている制御則のほとんどは、マニピュレータの慣性モーメントや質量などに代表される物理パラメータが既知であることを前提としているため、マニピュレータが浮遊物体を捕捉した場合、FFRの物理パラメータが変化し、制御性能の劣化を招くことになる。

この問題に対処する1つの方法は、ロボットシステムのパラメータ推定を行なうことである。荒井ら¹²⁾は地上用マニピュレータにおいて開発されている、関節トルク情報と加速度情報をもとにしてモデルに加わる外乱を推定し、それを補償する方法を宇宙用マニピュレータに拡張している。また、Murotsuら¹³⁾はパラメータ同定機能を持つ分解加速度制御により、ロボット・マニピュレータの制御が良好に行えることを示し、吉田ら¹⁴⁾は未知物体を把持した場合のロボットのパラメータ推定問題を検討し、極めて高い精度で慣性パラメータが同定可能であることを示している。

しかし、マニピュレータのパラメータ推定と制御を同時に取り扱っている研究は少ない¹⁵⁾¹⁶⁾。岩田ら¹⁵⁾は分解加速度制御則¹⁷⁾を用いたモデル規範形適応制御系を構成し、計算機シミュレーションにより良好な制御が可能であることを示した。しかし、目標関節角速度の計算には多くの演算を必要とする。また、Xuら¹⁶⁾は動力学モデルおよびパラメータの線形性をもとに、本体がスラスタージェットなど

で姿勢制御された場合の適応制御系について検討した。なお、これらの研究は連続時間系で設計・解析されており、離散時間系での議論は全くなされていない。

1.3 研究の目的

1.1 節で示した宇宙ロボットの特異性と、1.2 節で紹介した従来の研究状況を考慮し、本研究では次の2点に注目した研究を行った。

- (1) 宇宙ロボットに搭載されたアンテナとマニピュレータの同時制御法の開発。
- (2) パラメータ同定機能を備えた制御法の開発。

なお、ロボット本体はスラスタなどで姿勢制御を行わない、制御手法としては一般化ヤコビ行列を用いた分解速度制御法に基づく。

しかし、分解速度制御法はシステムのダイナミクスを考慮していないため

- (a) 高速度運動の場合、遠心力やコリオリ力の影響が大きくなり速度誤差が大きくなる。
- (b) フィードバックループを持たないので定常位置誤差を生じる。
- (c) 一般化ヤコビ行列の要素に含まれるマニピュレータの慣性モーメントや質量などの物理パラメータが全て既知でなければならない。

などの問題点があり、これらの問題点を改善する制御手法も開発する。

(1) はアンテナとマニピュレータの作業を同時に達成するための方法を開発することを目標とする。本研究では、通信確保の手段として、アンテナの高精度な姿勢制御とマニピュレータの手先位置制御を実現する方法を提案する。

(2) に関しては、宇宙ロボットのシステムパラメータの変化に対応できる制御法を開発・提案する。すなわち、次に示す2つの制御系である。

(制御系1)

宇宙用マニピュレータが未知浮遊物体を把持した条件のもとでシステムパラメータ同定法（2段階の推定法）とそれを用いた制御法を提案し、その妥当性を計算機シミュレーションにより確認する。なお、ここでは、関節の摩擦係数

がロボットの制御に大きな影響を与えるため、従来の同定法では取り扱っていない粘性摩擦係数を含めたパラメータ推定を行う。

(制御系 2)

上記分解速度制御法の問題点を解決するために、出力誤差と適応制御手法を導入した制御系を設計する。この適応制御系では一般化ヤコビ行列を未知パラメータに関して線形表示することにより、安定性・収束性が保証される構成となっている。

さらに、ロボットに搭載できる計算機はノート型パソコン程度であると言われているので、制御のサンプリング時間は長くする必要がある。これらの問題点を解決するため、制御系に演算時間（むだ時間）を考慮した離散時間形適応制御系の設計を行う。また、提案したデジタル適応制御系の妥当性を計算機シミュレーションと実験により確認する。

1.4 本論文の構成と概要

本論文は、以下の6章より構成される。

第1章「序論」では、本研究の背景、目的について述べた。

第2章では、FFRに搭載されるアンテナの指向方向とマニピュレータの同時制御について述べる。まず、双腕マニピュレータを持つFFRのための一般化ヤコビ行列を拡張した「拡張一般化ヤコビ行列」を導出する。次に、この拡張一般化ヤコビ行列を用いた分解速度制御に基づき制御系を構成する。この制御系により、マニピュレータとアンテナの同時制御が可能であることを明らかにする。

第3章では、パラメータ推定を伴う未知浮遊物体捕捉後の軌道制御法について述べる。ここではFFRの動力学と運動学方程式を用いた2段階のパラメータ推定法を提案する。この推定法に基づき分解速度制御系を構成すれば、良好な手先軌道制御性能が実現可能であることを明らかにする。

第4章では、離散時間形適応制御系の設計法を用いた未知浮遊物体捕捉後の軌道制御について述べる。一般化ヤコビ行列の推定値と位置誤差を付加した分解速度制御法に基づく離散時間形適応制御系を提案する。この方法を用いると、分解速度制御法および一般化ヤコビ行列の問題点を解決するとともに、比較的大きなサンプリング時間の場合も、非常に良好な制御性能が得られることを示す。

第5章では、空気浮上式シミュレータ SMART-I (Space Manipulator Robot Testbed - I) を開発し、4章で提案した制御手法の検証実験を行った結果について述べる。実験より、提案した手法が有効であることを示す。

第6章では、以上の結論を述べる。

主な記号

本論文の解析で用いた記号は次のとおりである。

- r_i : 座標系 Σ_i の原点からリンク i の質量中心へのベクトル
 P_i : 座標系 Σ_i の原点から関節 i へのベクトル
 a_i : 関節 i からリンク i の質量中心へのベクトル
 b_i : リンク i の質量中心から関節 $i+1$ もしくはエンドエフェクタへのベクトル
 l_i : $l_i = a_i + b_i$
 k_i : 関節 i の軸方向を表す単位ベクトル
 P^M, P : エンドエフェクタの先端位置を表すベクトル
 P^A : アンテナの先端位置を表すベクトル
 r_g : 座標系 Σ_1 の原点からロボットの質量中心へのベクトル
 P_t : ターゲットの位置を表すベクトル
 ω_0 : ロボット本体の姿勢角速度ベクトル $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$
 ϕ^M, ϕ_M : マニピュレータの関節角度ベクトル
 ϕ^A : アンテナの関節角度ベクトル
 ϕ_i : マニピュレータの関節角度 ($i=0..n$)
 I_i : リンク i の質量中心回りの慣性テンソル
 m_i : リンク i の質量 (ロボット本体はリンク 0 とみなす)
 M : ロボットの全質量
 ψ : マニピュレータ (M) またはアンテナ (A)
 n_ψ : マニピュレータ自由度 (n_M) またはアンテナの自由度 (n_A)
 n_r, n_p, n_y : 本体の姿勢を roll, pitch, yaw で表したときの各回転軸の単位ベクトル
 n_i : a_i または b_i の単位ベクトル
 τ_i : 関節 i への入力トルク

記号 \sim : ベクトル $\mathbf{x} = (x_1 \ x_2 \ x_3)^T$ に対し

$$\tilde{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & -x_3 & x_2 \\ x_3 & 0 & -x_1 \\ -x_2 & x_1 & 0 \end{bmatrix}$$

と定義した交代行列を表す.

本論文での基本的な仮定を以下に示す.

【仮定】

- (1) FFRを構成するリンクなどの要素はすべて均質な剛体である.
- (2) FFRに対して外力は作用しない.
- (3) FFRの初期全運動量は0とする.
- (4) FFRのマニピュレータはすべて回転関節で構成される.

第2章

マニピュレータと搭載アンテナの同時制御⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾

本章では、衛星に搭載されたアンテナの恒常的な指向方向性の確保とマニピュレータの移動制御問題を一般化ヤコビ行列を拡張した考え方で定式化する。

まず、本章で用いる仮定および宇宙ロボット・マニピュレータモデルを定義する。ここでは宇宙ロボットモデルとして、衛星本体に2本のマニピュレータを有する双腕マニピュレータモデルを考え、その腕の1本をアンテナと想定する。

運動学関係式の定式化においては、梅谷らによって提案された「一般化ヤコビ行列」^⑥の考え方に、アンテナが常に一定方向を指向しているという条件を付加した「拡張一般化ヤコビ行列」を導出する。なお、制御系はPD形コントローラを用いて構成する。

最後に、2リンク二次元平面のシミュレーションモデルにより、指向方向誤差、サンプリング時間などを評価基準とし、提案した手法の有効性を考察する。

2.1 FFRのモデル

本章で扱うFFRのモデルとして、図2.1に示すモデルを想定する。ロボットは、本体部、 n 本のリンクからなるマニピュレータ部、およびアンテナ部から構成される。解析において用いた仮定は1章で述べた仮定以外に次の仮定を設定した。なお、特に断らない限りベクトル、テンソルは慣性座標系 Σ_I に関する表示である。

[仮定]

- (5) FFR本体の姿勢角、姿勢角速度、並進速度、およびマニピュレータ各関節の角度、角速度、アンテナ各関節の角度、角速度、エンドエフェクタの速度は計測可能である。
- (6) FFRの各関節において摩擦は作用しない。
- (7) アンテナの質量中心は駆動軸上にある。

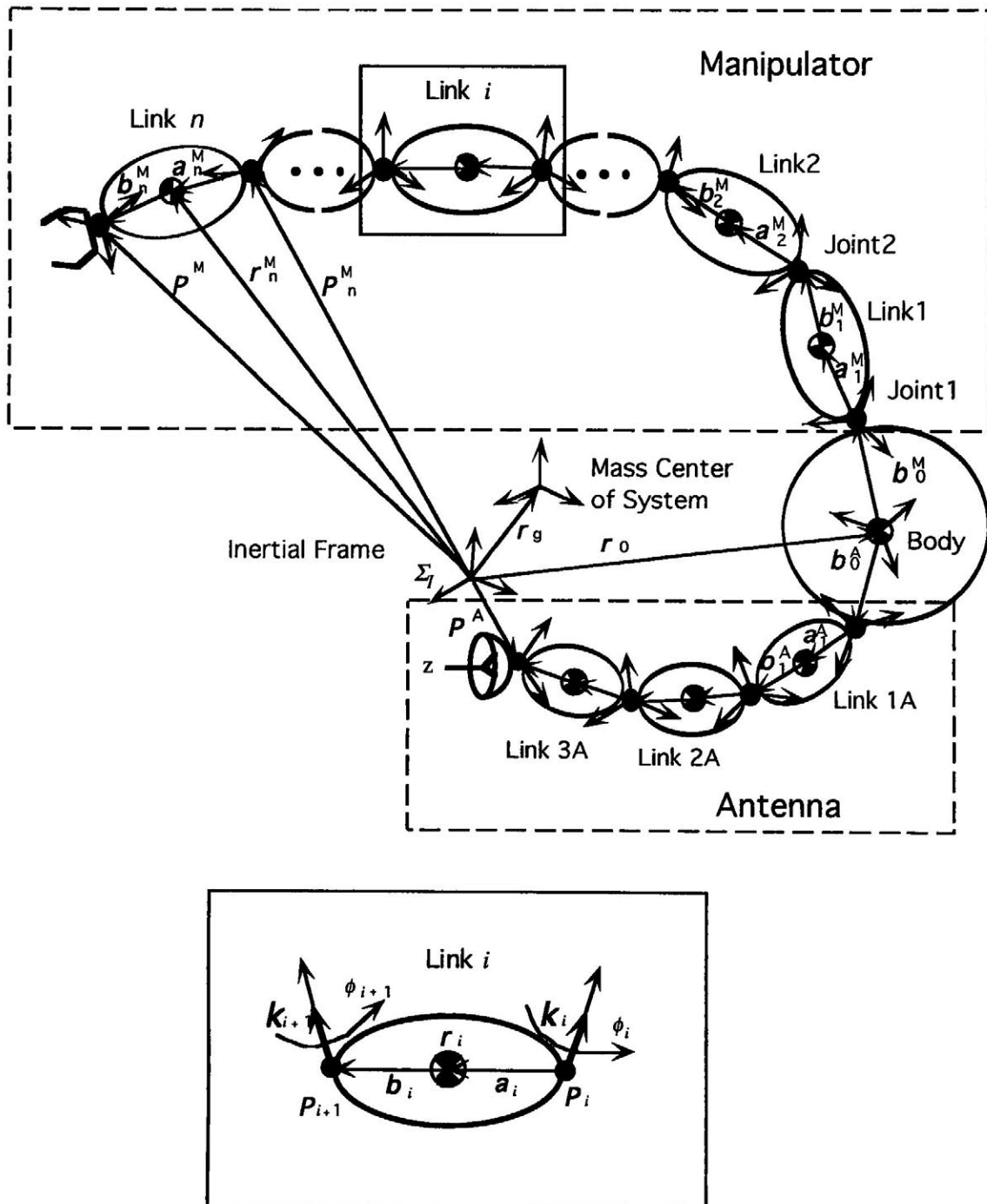


図 2.1 フリーフライングロボットのモデル

2.2 一般化ヤコビ行列と分解速度制御法

本節では、梅谷らによって提案されたFFRの一般化ヤコビ行列⁶⁾の導出と分解速度制御法を簡潔に説明する。

図2.1においてアンテナのない単腕のFFRの場合、系の質量中心の定義、並進運動量保存則、リンクの幾何学的関係およびマニピュレータの特性方程式より、エンドエフェクタの速度ベクトル \dot{P} は、本体の姿勢角速度ベクトル $\dot{\phi}_S$ とマニピュレータの関節角速度ベクトル $\dot{\phi}_M$ を用いると次式で表すことができる。

$$\dot{P} = J_S \dot{\phi}_S + J_M \dot{\phi}_M \quad (2.1)$$

ただし、 $J_S \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 、 $J_M \in \mathbf{R}^{3 \times n}$ はリンクの質量比を含んだヤコビ行列である。また、角運動量保存則より、

$$I_S \dot{\phi}_S + I_M \dot{\phi}_M = 0 \quad (2.2)$$

が得られ、式(2.1)と式(2.2)より $\dot{\phi}_S$ を消去すると次式が得られる。

$$\dot{P} = \left(J_M - J_S J_S^{-1} I_M \right) \dot{\phi}_M = J^* \dot{\phi}_M \quad (2.3)$$

式(2.3)の J^* を梅谷らは「宇宙マニピュレータ用の一般化ヤコビ行列」と呼んでいる⁶⁾。

地上用マニピュレータのヤコビ行列はマニピュレータのリンクの長さや関節角の関数となるが、宇宙用に拡張した一般化ヤコビ行列は、さらに質量や慣性モーメントを含む関数となる。すなわち、例えば地球上のマニピュレータの場合には、衛星本体の質量が無限大に対応し、 $I_S^{-1} I_M \rightarrow 0$ 、 $J_M \rightarrow J$ となり、通常のヤコビ行列となる。

分解速度制御法では、まずエンドエフェクタの望ましい速度および姿勢角速度を実現するための各関節角速度 $\dot{\phi}_{MC}$ を、目標手先速度 \dot{P}_d と一般化ヤコビ行列の逆行列を用いて決定する。次に、この決定された角速度 $\dot{\phi}_{MC}$ を各関節のサーボ系で実現することによりエンドエフェクタの軌道制御を行う。すなわち、式(2.3)を $\dot{\phi}_M$ に関して変形し、 \dot{P} を \dot{P}_d に置換した次式に基づくものである。

$$\dot{\phi}_{MC} = J^{*-1} \dot{P}_d \quad (2.4)$$

2.3 拡張一般化ヤコビ行列

図2.1のようにモデル化したロボットは双腕マニピュレータをもつFFRとみなせるので、吉田らが提案している双腕マニピュレータを有するFFRのための一般化ヤコビ行列を用いる方法⁽¹⁰⁾が利用できる。吉田らの結果をまとめると次のようになる。

ロボットの並進運動量，角運動量の初期値を零とすると，ロボットの姿勢角速度ベクトル ω_0 およびエンドエフェクタの速度 \bar{E} はマニピュレータの関節角速度ベクトル $\dot{\phi}^M$ とアンテナの関節角速度ベクトル $\dot{\phi}^A$ で次のように表すことができる。

$$\omega_0 = -(J_{\omega A} \dot{\phi}^A + J_{\omega M} \dot{\phi}^M) \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \bar{E} = \begin{bmatrix} \dot{P}^M \\ \omega_n^M \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -J_{VA} + (\widetilde{P^M - r_0}) J_{\omega A} \\ -J_{\omega A} \end{bmatrix} \dot{\phi}^A + \left\{ \begin{bmatrix} -J_{VM} + (\widetilde{P^M - r_0}) J_{\omega M} \\ -J_{\omega M} \end{bmatrix} + J_M^M \right\} \dot{\phi}^M \\ &= \bar{J}_A \dot{\phi}^A + \bar{J}_M \dot{\phi}^M \end{aligned} \quad (2.6)$$

ただし，

$$J_{V\nu} = \sum_{\nu} \left(\frac{K_{V\nu}}{M} + (\widetilde{r_0 - r_g}) S^1 r_g K_{V\nu} - (\widetilde{r_0 - r_g}) S^1 K_{\omega\nu} \right) \dot{\phi}^{\nu}$$

$$J_{\omega\nu} = \sum_{\nu} S^1 (K_{\omega\nu} - \widetilde{r_g} K_{V\nu}) \dot{\phi}^{\nu}$$

$$J_M^M = \begin{bmatrix} k_1^{\psi} \times (P^{\psi} - P_1^{\psi}) & \dots & k_n^{\psi} \times (P^{\psi} - P_n^{\psi}) \\ k_1^{\psi} & \dots & k_n^{\psi} \end{bmatrix}$$

$$S = K_{\omega} - M \widetilde{r_g} (\widetilde{r_0 - r_g})$$

$$K_{\omega} = I_0 + \sum_{\psi} \sum_{i=1}^{n_{\psi}} \left\{ I_i^{\psi} + m_i^{\psi} \widetilde{r}_i^{\psi} (\widetilde{r}_0 - r_i^{\psi}) \right\}$$

$$K_{V_{\psi}} = \sum_{i=1}^{n_{\psi}} m_i^{\psi} J_{U_i}^{\psi}$$

$$K_{\omega_{\psi}} = \sum_{i=1}^{n_{\psi}} (I_i^{\psi} J_{L_i}^{\psi} + m_i^{\psi} r_i^{\psi} J_{U_i}^{\psi})$$

$$J_{U_i}^{\psi} = \left[k_1^{\psi} \times (r_i^{\psi} - P_1^{\psi}) \cdots k_i^{\psi} \times (r_i^{\psi} - P_i^{\psi}) \right]$$

$$J_{L_i}^{\psi} = \left[k_1^{\psi} \quad \cdots \quad k_i^{\psi} \right]$$

また、アンテナについても同様に、

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} \dot{P}^A \\ \omega_3^A \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} -J_{VA} + (\widetilde{P}^A - r_0) J_{\omega A} \\ -J_{\omega A} \end{bmatrix} + J_M^A \right\} \dot{\phi}^A + \begin{bmatrix} -J_{VM} + (\widetilde{P}^A - r_0) J_{\omega M} \\ -J_{\omega M} \end{bmatrix} \dot{\phi}^M \quad (2.7)$$

と表せる。

次に、アンテナが一定方向（通信相手の方向）を指向しているための条件を導く。アンテナの先端座標系におけるZ軸方向単位ベクトル z_A をアンテナ指向方向とし、初期状態ではこの方向は通信相手のほうを向いていると仮定する。慣性座標系 Σ_I から見たアンテナ先端の座標を ${}^I A$ (${}^I A_x, {}^I A_y, {}^I A_z$)^T、静止している通信相手の座標を ${}^I T_a$ (${}^I T_x, {}^I T_y, {}^I T_z$)^Tとする。図2.2より慣性座標系から眺めたアンテナ先端ベクトルと、アンテナ先端から通信相手までのベクトル ${}^I zT$ の和は、通信相手ベクトルに等しい。つまり、通信可能であるための条件は次のようになる。

$${}^I A + {}^I zT = {}^I T_a \quad (2.8)$$

ただし、 ${}^I z$ は z_A を慣性座標系 Σ_I で表現したベクトルで、スカラー量 T は、

$$T = \sqrt{({}^I T_X - {}^I A_X)^2 + ({}^I T_Y - {}^I A_Y)^2 + ({}^I T_Z - {}^I A_Z)^2}$$

である。通信相手が慣性座標系に対して静止している場合、 ${}^I T_a$ は一定なので、次の関係が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} {}^I A_X \\ {}^I A_Y \\ {}^I A_Z \end{bmatrix} + {}^I R_0 {}^0 R_A \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ T \end{bmatrix} = \text{const} \quad (2.9)$$

${}^A R_B$ は座標系 B で表されたベクトルを座標系 A に変換する回転変換行列で、添字 I は慣性座標系、0 はロボット本体座標系、A はアンテナ座標系を表す。ここでは、通信相手が静止しているとしているが、運動を行っている場合は、右辺を修正することにより以下と同様の解析が可能である。この式を時間で微分し、アンテナの姿勢角、本体の姿勢角（ロール、ピッチ、ヨー）に対して解くと、式(2.10)として、本体の姿勢角速度、アンテナの関節角速度、マニピュレータの関節角速度の関係が導かれる。なお、式(2.10)の A, B, C の導出方法を付録Aに示す。

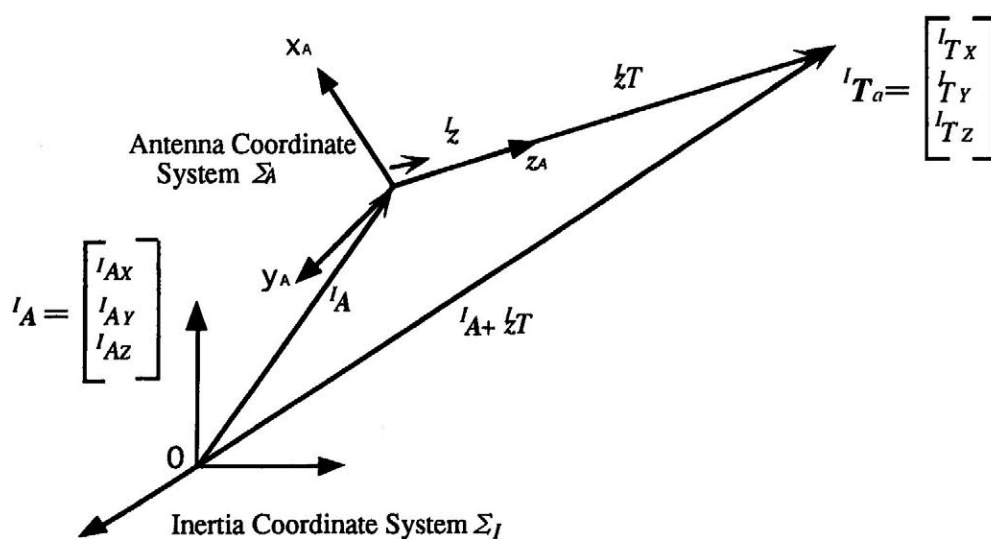


図 2.2 アンテナと通信相手の関係

$$A \begin{bmatrix} \dot{R} \\ \dot{P} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} + B\dot{\phi}^A + C\dot{\phi}^M = 0 \quad (2.10)$$

この関係式は、ロボット本体の姿勢角速度およびマニピュレータの関節角速度に対し、アンテナの角速度が満たさなければならない条件を与えている。なお、 A は本体の姿勢角とアンテナの関節角度を変数とする 3×3 行列、 B は本体の姿勢角、アンテナの関節角度、アンテナ先端位置、通信相手の位置を変数とする 3×3 行列、 C はマニピュレータの関節角度、アンテナ先端位置、通信相手の位置を変数とする $3 \times n$ 行列である。また、 R, P, Y はそれぞれロボット本体のロール角、ピッチ角、ヨー角である。さらに、 $(\dot{R}, \dot{P}, \dot{Y})$ を $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ へ変換する 3×3 行列を K とすると、式(2.5)と式(2.10)より、マニピュレータ関節角速度 $\dot{\phi}^M$ とアンテナの関節角速度 $\dot{\phi}^A$ の関係は次式となる。

$$(KA^{-1}B - J_{\omega A})\dot{\phi}^A = -(KA^{-1}C - J_{\omega M})\dot{\phi}^M \quad (2.11)$$

式(2.11)を式(2.6)に代入すると

$$\bar{E} = \{\bar{J}_M - \bar{J}_A(KA^{-1}B - J_{\omega A})^{-1}(KA^{-1}C - J_{\omega M})\}\dot{\phi}^M \quad (2.12)$$

が得られ、アンテナ駆動の動作を含めた拡張一般化ヤコビ行列が導出される。アンテナの姿勢角速度 ω_3^A についても、式(2.7)と式(2.11)より次の関係式が導出される。

$$\omega_3^A = -\{(J_M^A - J_{\omega A})(KA^{-1}B - J_{\omega A})^{-1}(KA^{-1}C - J_{\omega M}) + J_{\omega M}\}\dot{\phi}^M \quad (2.13)$$

式(2.12)より、マニピュレータの関節角速度 $\dot{\phi}^M$ が求まり、式(2.13)より駆動すべきアンテナの姿勢角速度が求まる。これらの関係式は、吉田らが双腕マニピュレータのために導いた式⁽¹⁰⁾に、アンテナが常に通信相手を指向していなければならない条件を付加したものとなっている。

2.4 同時制御

2.3節で示した式(2.12)と(2.13)により求められる角速度情報と分解速度制御法²⁰⁾を用いると、マニピュレータとアンテナの同時制御が可能である。しかし、一般にアンテナの許容指向方向誤差は小さい(0.05 deg 以下)、また分解速度制御法はシステムのダイナミクスを考慮していないので、必ずしも高精度な制御が期待できなく、動力学を考慮した検討が必要となる。ここでは、問題を簡単にするために、図2.3に示す二次元モデルについて検討する。このモデルはロボット本体、2リンクのマニピュレータおよび回転軸が中央にある1本の棒状のアンテナから構成されている。

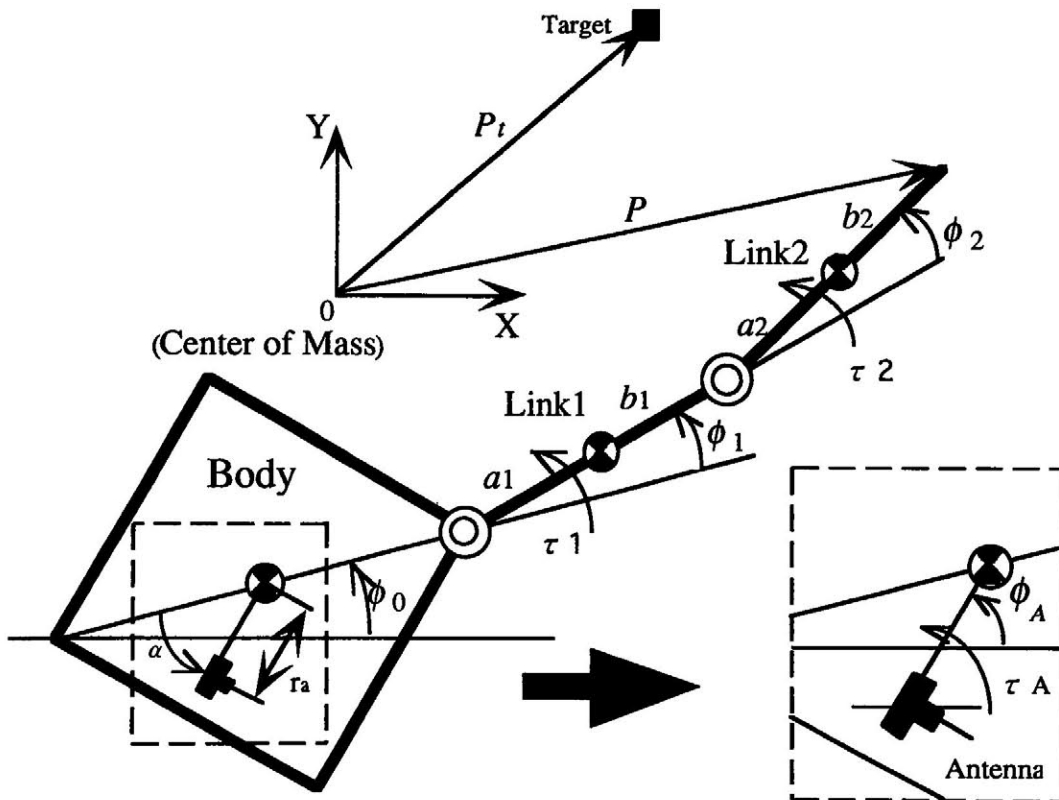


図 2.3 アンテナ搭載型モデル

2.4.1 運動方程式

図 2.3 のアンテナ搭載形マニピュレータの運動方程式は、通常のロボットと同型の

$$M(\phi) \ddot{\phi} + h(\phi, \dot{\phi}) = \tau \quad (2.14)$$

で表される。ここで、

$$\phi = (\phi_0, \phi_1, \phi_2, \phi_A)^T, \tau = (\tau_1, \tau_2, \tau_A)^T$$

$M(\phi)$: 慣性行列

$h(\phi, \dot{\phi})$: 遠心力, コリオリ力などの非線形項

である。また、アンテナの運動方程式は、

$$I_A \ddot{\phi}_A = \tau_A \quad (2.15)$$

である。

2.4.2 制御法

エンドエフェクタは、初期位置と目標位置を結ぶ直線軌道上を移動するものとする。ただし、アクチュエータの特性を考慮して、関節角の最大速度には制限を設定し、その条件を考慮してエンドエフェクタの速度パターンを決定した。

また、コントローラはPD形コントローラ

$$\tau = K_p(\phi_d - \phi) + K_v(-\dot{\phi}) \quad (2.16)$$

を採用した。ただし、 K_p と K_v はコントローラゲイン、 ϕ_d は目標角度、 τ は操作トルクである。コントローラゲインは次のように決定する。

(1) 各サンプル時間ごとにマニピュレータの姿勢より、次の三つの慣性モーメントを求める。

・リンク 2 の、関節 2 回りの慣性モーメント

- ・リンク1とリンク2を1本のリンクとみなしたときの，関節1回りの慣性モーメント
- ・アンテナの回転軸回りの慣性モーメント

(2) 上記三つのリンクの運動を2次系とみなし，減衰係数が1となるように K_p と K_v を決定する。

この方法では，システムの干渉を考慮していない，コントローラゲインを等価慣性モーメントで近似している等の原因により，エンドエフェクタの目標速度と実軌道速度に誤差を生じる．そこで，運動の誤差を次の目標速度で補償する方法を用いた．つまり，時刻 t でのエンドエフェクタの位置を $x(t)$ ，目標位置及び目標速度をそれぞれ $x_d(t)$ ， $v_d(t)$ とした時，時刻 $t+\Delta t$ での目標速度 $v_d(t+\Delta t)$ を $(x_d(t+\Delta t) + (x_d(t) - x(t)))/\Delta t$ に変更する．この方法は，分解加速度制御法などに比べ，非線形項の補償などの複雑な行列計算をしなくてすむので，実用的であるといえる．

2.4.3 シミュレーションの方法

シミュレーションに用いたフリーフライングロボットに関するパラメータは表2.1である．表中のアンテナについては，アンテナ質量による制御性能への影響を調べるために，変数で表示してある．また，アンテナの取付け位置 r_a ，取付け角度 α はそれぞれ0.5 m，45 degとした．

表2.1 宇宙用マニピュレータの仕様

	Body	Link1	Link2	Antenna
Mass (kg)	2000	50	50	M_a
Moment of Inertia (kgm^2)	2083.3	26.0	26.0	$I_A = M_a \times L^2 / 2$
Length (m)	2.5×2.5	2.5	2.5	$L=1$

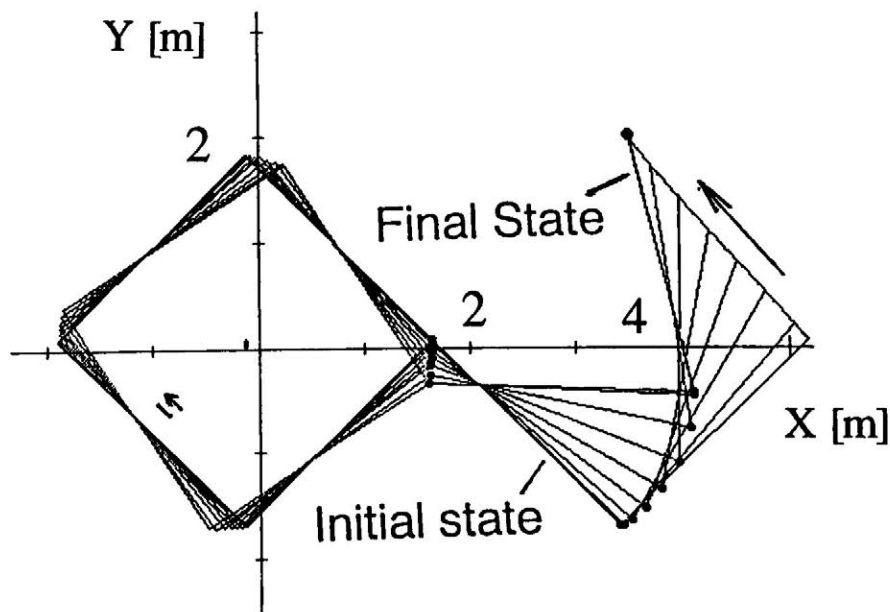
微分方程式の解法は4次のルンゲクッタ法により，刻み時間0.0002秒で実行した．この値は，サンプリング時間内での制御性能を調べるために十分小さく取っ

である。また、エンドエフェクタがターゲットに対し 0.001 m 以内に近づいたときに制御をストップするようにしてある。また、アンテナの許容最大指向方向誤差を ± 0.05 deg としている。なお、マニピュレータの関節角速度およびアンテナの角速度の目標値は、各サンプル時間ごとに式(2.12)と式(2.13)により求める。

2.4.4 シミュレーション結果および考察

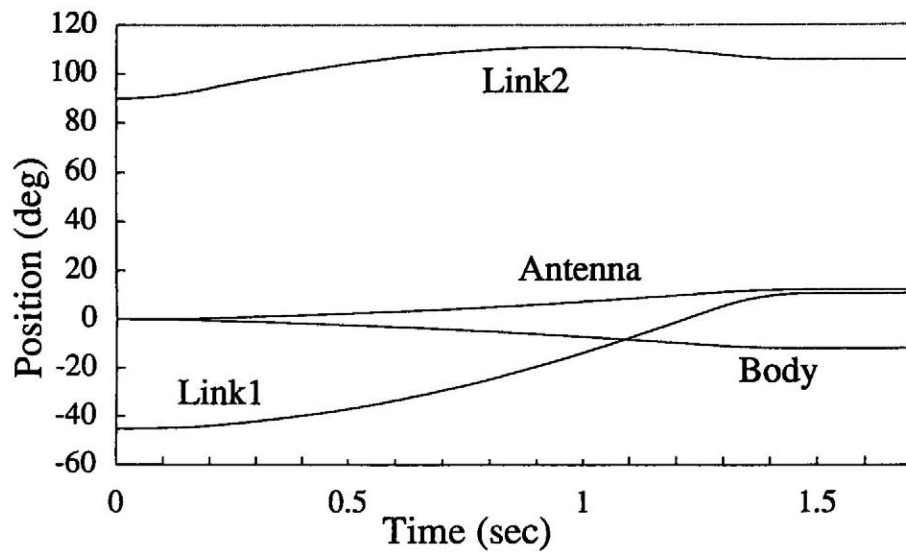
図 2.4 にエンドエフェクタの目標を (3.5m, 2.0m) としたときのシミュレーション結果を示す。(a) はロボット本体とマニピュレータの運動の様子を、(b) はこのときのロボット本体姿勢、マニピュレータの二つの関節角度およびアンテナの角度の変化を、(c) はエンドエフェクタの平均速度の時間履歴をそれぞれ表している。なお、(c) の Desired output はアクチュエータ性能より決めた台形速度パターン、Reference は台形速度を得るための目標速度、Output は出力速度である。

(a) では、エンドエフェクタの軌跡を 0.01 秒ごとに、本体およびリンクを 0.2 秒ごとに描いてある。(b) より、ロボット本体の姿勢角とアンテナの姿勢角が逆向きに同じ大きさだけ動いていることがわかる。(c) より、若干のオーバーシュートをしているが、その後目標速度と一致していることがわかる。

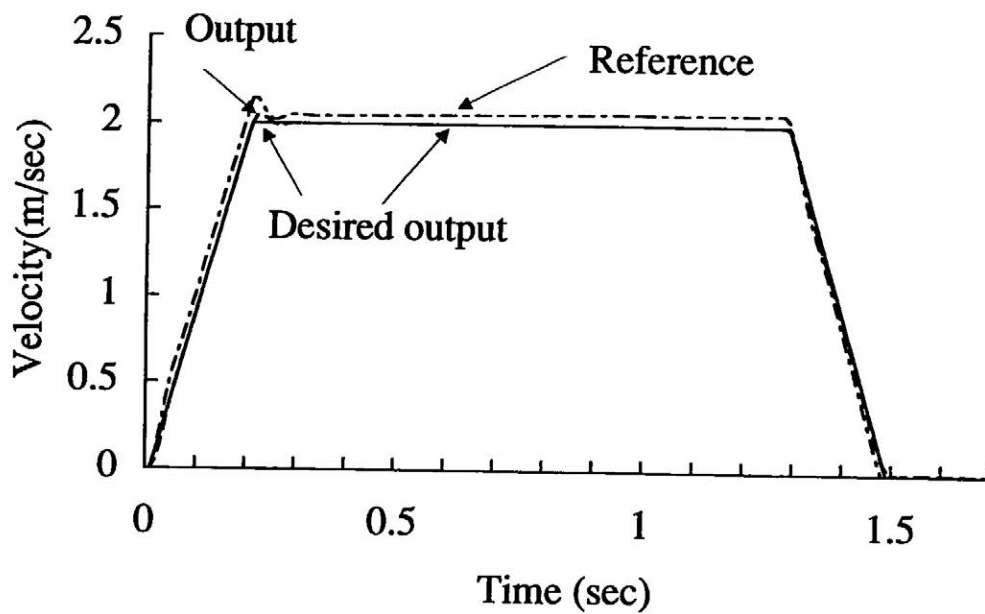


(a) シミュレーション結果

図 2.4 シミュレーション例



(b) 関節およびアンテナ角の時間履歴



(c) 目標速度および出力速度の時間履歴

図 2.4 シミュレーション例

アンテナ指向方向誤差の最大値は，エンドエフェクタの目標位置，分解速度制御のサンプリング時間に依存する．図 2.5 は，図に示す初期姿勢からいくつかの目標位置へエンドエフェクタを移動させたときのアンテナ指向方向誤差の最大値を示している．ターゲットまでの距離だけでなくターゲットの位置によりアンテナの最大指向方向誤差は変化しているが，すべての場合について，その値は±0.05 deg以下である．また，エンドエフェクタは目標値に対してすべて0.01 m以内に達している．

表 2.2 はアンテナ指向方向誤差の最大値と，分解速度制御のサンプリング時間の関係を調べたものである．許容されるアンテナ指向方向誤差を±0.05 degとすると，シミュレーションで用いたシステムパラメータの場合，サンプリング時間は0.06秒以下である必要がある．

表 2.3 はアンテナとロボット本体の質量比を変化させたときの最大アンテナ指向方向誤差である．ロボット本体とアンテナの質量比を変化させても最大アンテナ指向方向誤差への影響は十分小さいことがわかる．

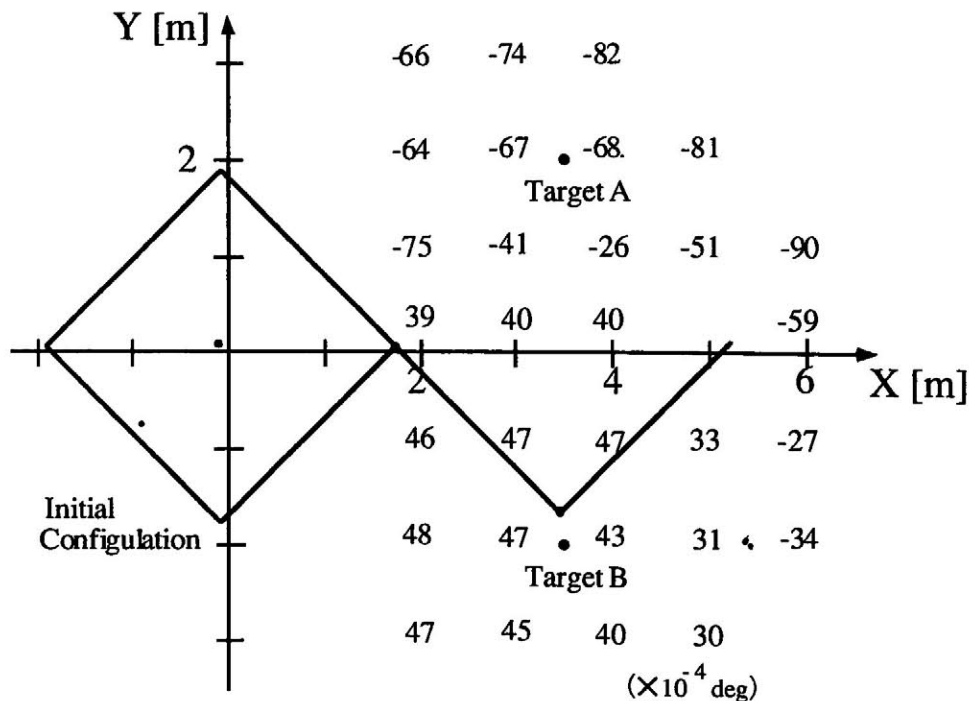


図 2.5 最大アンテナ指向方向誤差

表 2.2 サンプルング時間とアンテナ指向方向誤差との関係

Sampling Time (sec)	Maximum Antenna Positioning Control Error (deg)	
	Target A	Target B
0.07	-0.050	-0.045
0.04	-0.028	0.018
0.01	-0.007	0.005
0.004	-0.003	0.002

表 2.3 アンテナとロボット本体の質量比とアンテナ指向方向誤差の関係

Mass (kg)		Maximum Antenna Positioning Error (deg)	
Body	Antenna	Target A	Target B
2090	10	-0.006	0.005
2000	100	-0.007	0.005
1500	600	-0.007	-0.007

第3章

未知浮遊物体捕捉後における手先軌道制御

— 動力学と運動学によるパラメータ推定 — ⁽²¹⁾⁻⁽²⁴⁾

宇宙空間において、宇宙ステーションなどの建造物の建設を目的に、浮遊している建設材料や部品を捕捉し目標位置まで移動する場合、または物体の衝突などにより破損・変形したものを修理のため移動させる場合、対象としている物体の長さや質量などの物理パラメータが未知であるため、従来の制御法では所望の軌道制御性能を実現することが困難となる。

本章では、エンドエフェクタが未知浮遊物体を捕捉した後、ヤコビ行列の各要素 J_M , J_S , I_M , I_S に含まれるパラメータを、動力学および運動学の2種類の方程式より推定する方法について述べる。さらに、推定したパラメータで構成したヤコビ行列を用いて、分解速度制御法による新たなエンドエフェクタの軌道制御法を提案する。なお、パラメータ推定においては、従来陽に扱われていなかった粘性摩擦係数をも対象とする。

最後に、提案した手法の有効性を検証するために、パラメータ推定あり（提案した手法）と推定なし（従来手法）について計算機によるシミュレーションを行う。その結果、手先軌道制御性能がほとんど劣化することなく制御可能であること、また、パラメータ推定を行わない場合と比較して改善されることを示す。

3.1 FFRのモデル

対象モデルとして，図3.1に示すロボット本体に一本の n 自由度マニピュレータを有するFFRを採用する。

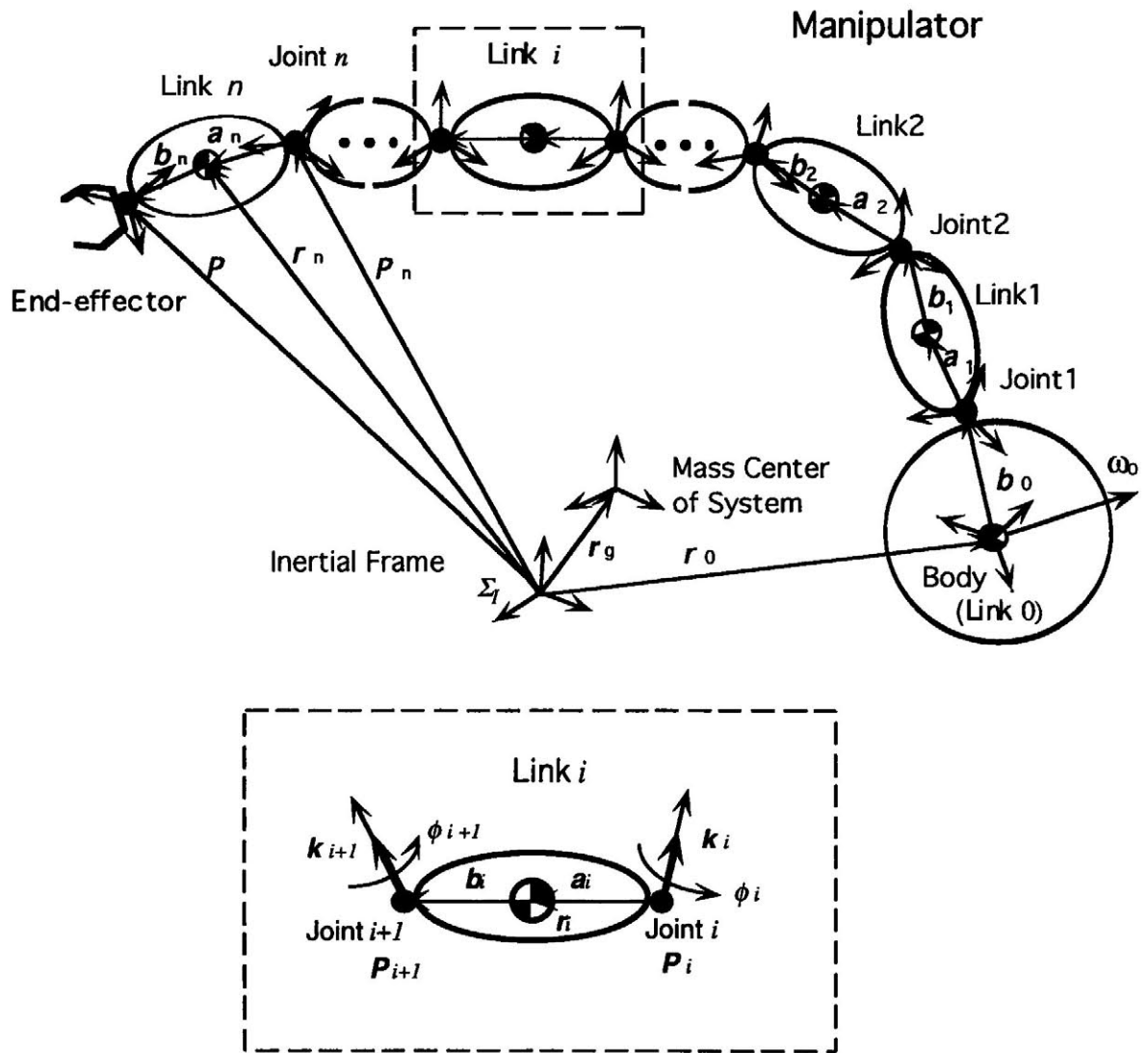


図3.1 FFRのモデル

また、解析においては、1章の仮定に加えて以下に示す仮定(5)と(6)を追加する。

[仮定]

(5) FFR本体の姿勢角、姿勢角速度、並進速度、およびマニピュレータ各関節の角度、角速度、エンドエフェクタの速度は計測可能である。

(6) FFRの各回転関節において、粘性以外の摩擦力は作用しない。

3.2 パラメータ推定

FFRが未知浮遊物体を捕捉すると、ロボットシステムの質量や慣性モーメントなどの物理パラメータが変化する。

分解速度制御を行なう場合、梅谷らはマニピュレータのエンドエフェクタの速度ベクトル \dot{P} と関節角速度ベクトル $\dot{\phi}_M$ の関係を次のように定式化した⁶⁾。

$$\dot{P} = (J_M - J_S I_S^{-1} I_M) \dot{\phi}_M = J^* \dot{\phi}_M \quad (3.1)$$

ただし、 J_M と J_S は各リンクの質量比を含んだ拡張ヤコビ行列、 I_M と I_S はロボット本体、マニピュレータの慣性マトリックスである。また、 J^* は一般化ヤコビ行列と呼ばれる行列である。

FFRのマニピュレータが未知浮遊物体を捕捉した場合、先端リンクの慣性モーメントや質量が変化する。一般化ヤコビ行列 J^* の構成要素である J_M 、 J_S 、 I_M 、 I_S のすべてに影響を及ぼす。

J_M 、 J_S 、 I_M 、 I_S に含まれる物理パラメータの推定においては、ロボット本体やマニピュレータのパラメータはすべて未知として推定する方法を提案する。

その手順は次のとおりである。まず(1) I_M と I_S に含まれるパラメータを推定し、その後に(2) J_M と J_S に含まれるパラメータの推定を行う。ただし、未知パラメータの推定が完了するまでは、未知浮遊物体把持以前のパラメータを用いて制御を行なうこととする。推定過程をこのように2段階に分離するおもな理由は、 J^* の決定には I_S の逆行列計算を必要とするため、全てのパラメータを計測可能な情報より推定することはできないためである。しかし、 I_M と I_S に含まれるパラメータ

が既知であれば、(2)の推定が非常に簡単に行なえるためである。以下にそれぞれのパラメータ推定法について述べる。

3.2.1 I_M と I_S に含まれるパラメータの推定 (推定1)

図3.1に示したFFRの運動方程式は次のように記述される。

$$H(\phi)\ddot{\phi} + h(\phi, \dot{\phi}) = \tau \quad (3.2)$$

$$\phi = (\phi_0 \cdots \phi_n)^T$$

ここで $H(\phi)$ は慣性行列であり、 $h(\phi, \dot{\phi})$ は遠心力、コリオリ力、粘性摩擦力をまとめた項、 τ はマニピュレータの各関節の入力トルクである。なお、 $H(\phi)$ と $h(\phi, \dot{\phi})$ は、次に示すように $I_S^{-1}I_M$ を演算するために必要な物理パラメータとある既知関数の線形結合で表現される。いま、この物理パラメータを p 個と仮定し、これを σ_j ($j=1, 2, \dots, p$) とすると、 $H(\phi)$ と $h(\phi, \dot{\phi})$ は

$$H(\phi) = \sum_{j=1}^p \sigma_j H_j(\phi) \quad , \quad h(\phi, \dot{\phi}) = \sum_{j=1}^p \sigma_j h_j(\phi, \dot{\phi}) \quad (3.3)$$

と表現できる。ここで、 $H_j(\phi)$ と $h_j(\phi, \dot{\phi})$ は仮定5より物理パラメータを含まない行列とベクトルであり、その要素は ϕ と $\dot{\phi}$ の関数である。なお、次節で取り扱う二次元平面モデル(図3.2)の場合の $H_j(\phi)$ と $h_j(\phi, \dot{\phi})$ とパラメータ σ の決定方法を付録Bに示す。このように表現できるシステムに対しては、井上らによるパラメータ推定法⁽²⁵⁾を適用することができる。この方法に必要な情報は仮定5に示された情報と関節トルク情報であり、加速度信号を必要としない点に特徴がある。

3.2.2 J_M と J_S に含まれるパラメータの推定 (推定2)

まず, 推定1により, I_M と I_S は既知であるとし,

$$I_S^{-1}I_M = I_{SM} = \begin{bmatrix} I_{SM11} & \cdots & I_{SM1n} \\ I_{SM21} & \cdots & I_{SM2n} \\ I_{SM31} & \cdots & I_{SM3n} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

と定義する. また, 未知物理パラメータ σ_j^* を

$$\sigma_0^* = \frac{m_0}{M}b_0, \sigma_1^* = \left(\frac{m_0}{M}a_1 + \frac{m_0+m_1}{M}b_1\right), \dots, \sigma_n^* = \left(\sum_{i=0}^{n-1} m_i \frac{a_n+b_n}{M}\right)$$

と定義すると, 一般化ヤコビ行列 J^* は

$$J^* = \begin{bmatrix} -\sigma_0^*(I_{SM11}Kn_r + I_{SM21}Kn_p + I_{SM31}Kn_y) \times n_0 + \cdots \\ + \sigma_n^* \left\{ (k_1 - I_{SM11}Kn_r - I_{SM21}Kn_p - I_{SM31}Kn_y) \times n_n \right\}, \\ \vdots \\ -\sigma_0^*(I_{SM1n}Kn_r + I_{SM2n}Kn_p + I_{SM3n}Kn_y) \times n_0 + \cdots \\ + \sigma_n^* \left\{ (k_n - I_{SM1n}Kn_r - I_{SM2n}Kn_p - I_{SM3n}Kn_y) \times n_n \right\} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

と表現できる. ただし, 行列 K はロボット本体のロール角, ピッチ角, ヨー角の微分 ($\dot{R}, \dot{P}, \dot{Y}$) を ω_0 へ変換する (本体姿勢角度をパラメータとする) 行列である.

以上の結果を用いて式(3.1)を未知物理パラメータ σ^* に関して整理すると, 次の関係式が導出される.

$$\dot{P} = \Gamma \sigma^* \quad (3.6)$$

ただし

$$\Gamma = \begin{bmatrix} -(\dot{\phi}_1 R_1 + \dot{\phi}_2 R_2 + \dots + \dot{\phi}_n R_n) \times n_0, \\ \vdots \\ \left\{ \dot{\phi}_1 (k_1 - R_1) + \dot{\phi}_2 (k_2 - R_2) + \dots + \dot{\phi}_n (k_n - R_n) \right\} \times n_n \end{bmatrix}$$

$$\sigma^* = \left[\sigma_0^*, \sigma_1^*, \dots, \sigma_n^* \right]^T$$

$$R_i = I_{SM1i} K n_r + I_{SM2i} K n_p + I_{SM3i} K n_y$$

である。

式(3.6)において \dot{P} と Γ は仮定5より既知とみなすことができるので、この方程式を解くために必要な $n+1$ 個の (\dot{P}, Γ) のデータが得られれば、分解速度制御法に必要なパラメータ σ^* を求めることができる。

3.3 計算機シミュレーション

FFRが未知浮遊物体を捕捉したことによる制御性能の悪化が、3.2節に示したパラメータ推定法を利用することにより、どの程度改善されるかを調べるために計算機シミュレーションを行なった。

シミュレーションに用いるモデルは二次元平面で運動可能なロボット本体に、回転関節で構成されている1本の2自由度のマニピュレータを有するモデルである。図3.2にシミュレーションモデルを、表3.1にモデルの物理パラメータを示す。なお、浮遊物体は半径0.5 mの円筒形であるとし、粘性摩擦係数を $1.0 \text{ kg m}^2/\text{s}$ としている。

3.3.1 シミュレーションの方法

ここでは、静止状態においてFFRが未知浮遊物体を捕捉し、目標位置までの直線軌道でエンドエフェクタを移動させるとする。エンドエフェクタの目標速度を、台形パターンで与えた「台形速度パターン」の場合と目標位置とエンドエフェクタの位置の差をサンプリング時間で割り、これをエンドエフェクタの目標速度とする「速度パターンを与えない」の場合で検討した。ただし、エンドエフェクタの目標速度があらかじめ与えられた上限を越える場合は、その上限値に設定するとした。エンドエフェクタ移動開始直後からまず推定1によりパラメータ σ が推定され、これらの推定値が収束した後、推定2を開始するとした。なお、パラメータ推定には離散時間系重み付き逐次最小二乗法²⁰⁾を用いた。推定値 σ の収束の判定は、式(3.6)から計算されるエンドエフェクタ速度と、計測により得られるエンドエフェクタ速度との誤差が0.0001 m/s以下になったときとした。

与えられたエンドエフェクタ速度に対し、関節角速度の目標値が式(3.1)により求められる。これを実現するためのコントローラとしてP形を採用し、出力がオーバーシュートせず、サンプリング周期間に関節速度が目標値に十分近い値となるようにパラメータを調節する方法を採用している¹⁹⁾。微分方程式の解法にはルンゲクッタ法を用い、そのきざみ時間は0.1 msとした。また、制御のためのサンプリング時間は10 msとした。

3.3.2 シミュレーション結果

図3.3～図3.8に台形速度パターンを与えた場合のシミュレーション結果を示す。図3.3はFFRの運動の様子を示している。いま、目標軌道からのズレの最大値を最大軌道制御誤差と定義すると、この例の場合、3.0 cmである。図3.4は関節角度およびロボット本体の姿勢角度の時間履歴を、図3.5～3.8はパラメータ σ と σ^* の時間履歴を表している。図3.5～3.7よりパラメータ σ の推定は運動開始後約0.2 sで終了し、図3.8よりパラメータ σ^* の推定は約0.3 sで終了していることがわかる。なお、図3.7において、 σ_7 と σ_8 は関節1および2の粘性摩擦係数の推定値である。図より、それぞれの粘性摩擦係数がうまく推定されているこ

とがわかる.

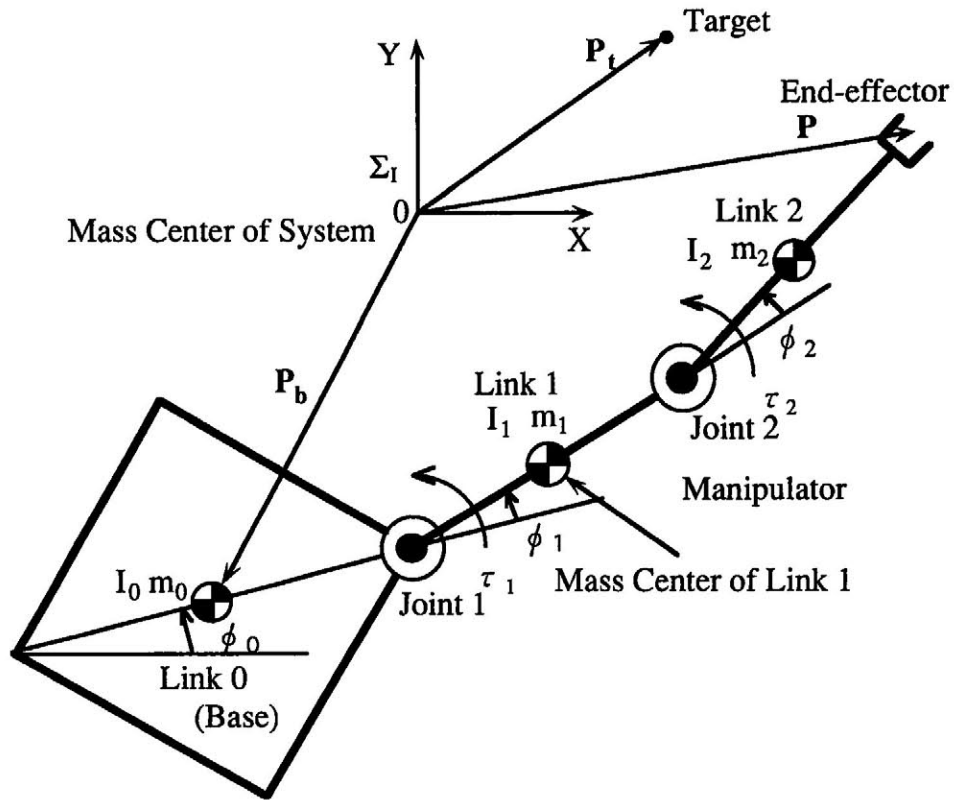


図 3.2 シミュレーションモデル

表 3.1 モデルおよび未知物体の物理パラメータ

	Base	Link1	Link2	unknown object
Mass (kg)	2000	50	50	80
Moment of Inertia (kgm ²)	2083	26.04	26.04	2.5
Length (m)	3.54	2.50	2.50	1.0

図3.9に、速度パターンを与えない場合のシミュレーション結果を示す。この場合、最大軌道制御誤差は7.3 cmであり、目標位置までに要する時間は1.22 sである。また、「推定1」および「推定2」から推定される未知物理パラメータの推定過程は、図3.5～3.8に示した推定過程とほとんど同じである。

図3.10と図3.11はパラメータ推定を行わなかった場合のシミュレーション結果である。未知浮遊物体を捕捉した後、推定を行なう場合のシミュレーション結果と、推定を行わない場合のシミュレーション結果を比較すると、台形速度パターンの場合、最大軌道制御誤差において72.9%の減少、速度パターンを与えない場合、最大軌道制御誤差において34.2%の減少、到達に要する時間は28.1%短縮され、いずれの制御性能においても改善が見られる。また、図3.3と図3.10の台形速度パターンのいずれの場合もエンドエフェクタは目標位置に到達していないが、前者の場合の誤差は13.1 cmで、後者の79.2 cmに比べ、大幅な改善がみられる。

以上のように、本論文で提案した推定法を用いて分解速度制御を行えば、マニピュレータが未知浮遊物体を捕捉してもエンドエフェクタの制御性能悪化を改善できることが明らかとなった。

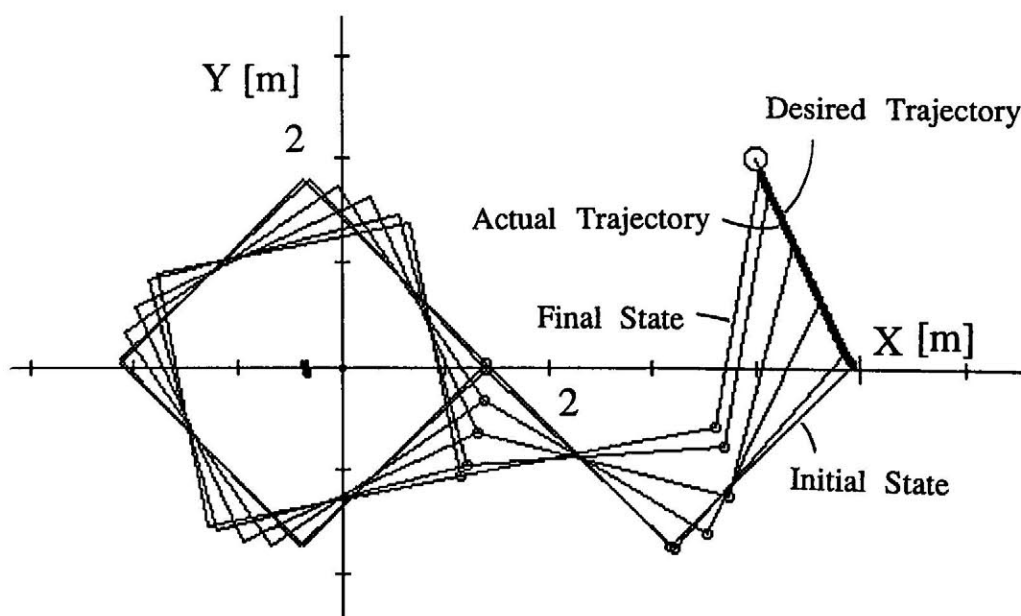


図3.3 シミュレーション結果（台形速度パターン）

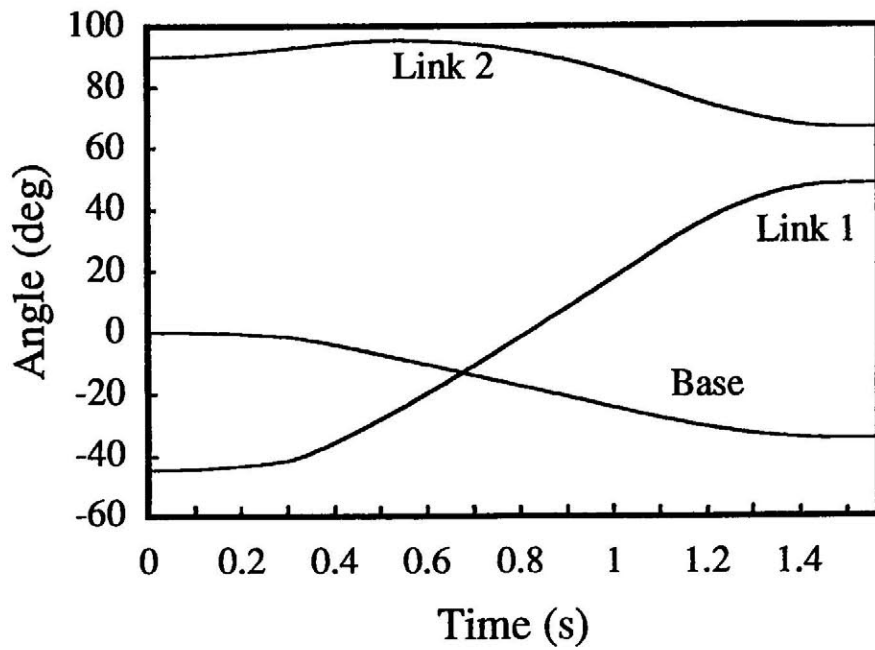


図 3.4 リンク,本体の角度の時間履歴(台形速度パターン)

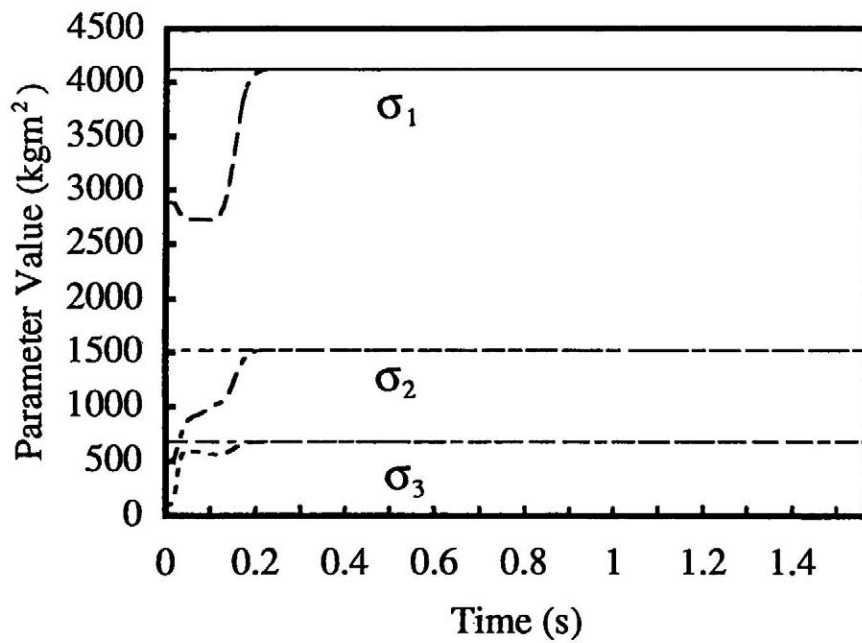


図 3.5 パラメータ $\sigma_1 \sim \sigma_3$ の時間履歴(台形速度パターン)

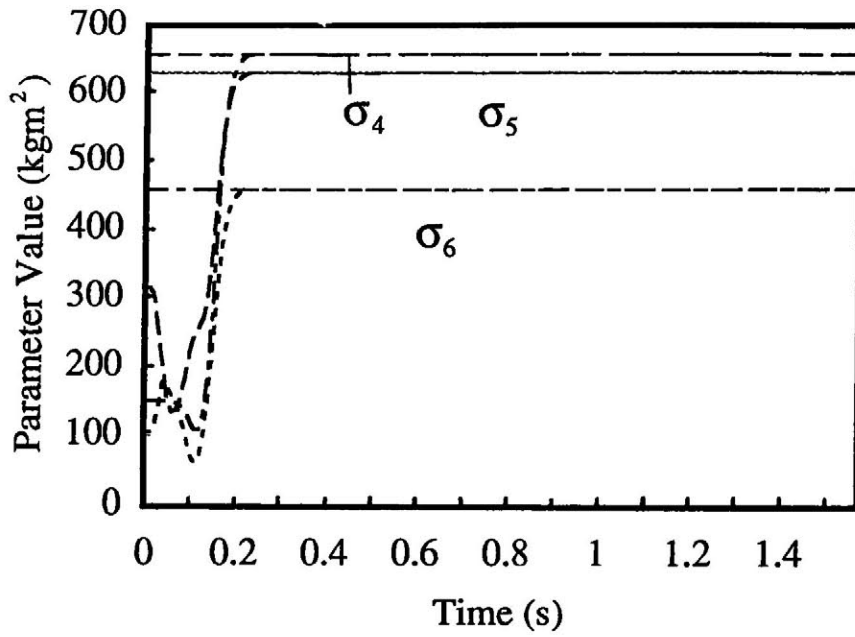


図 3.6 パラメータ $\sigma_4 \sim \sigma_6$ の時間履歴 (台形速度パターン)

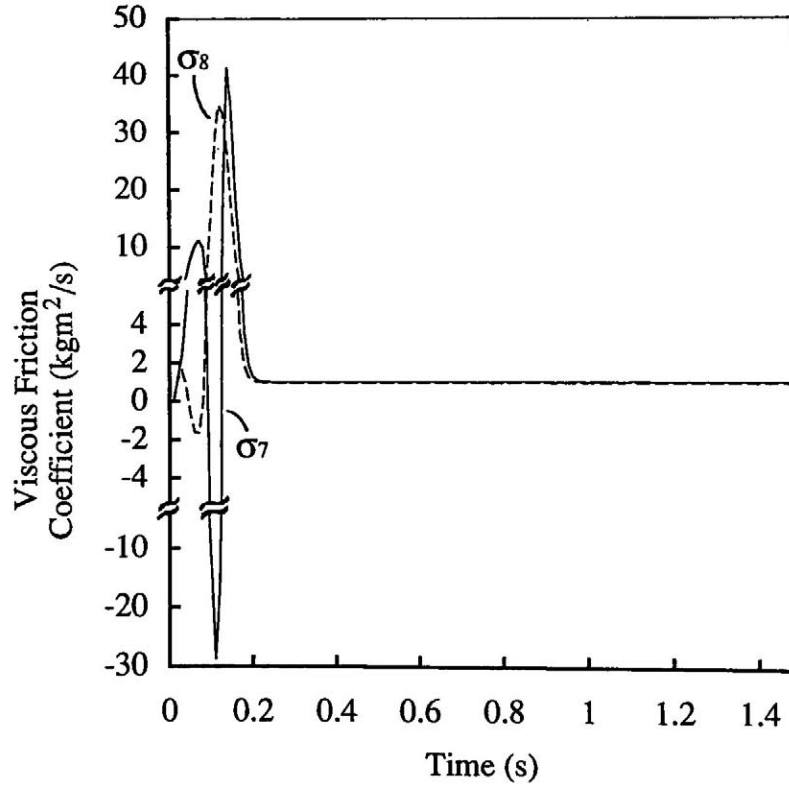


図 3.7 パラメータ σ_7, σ_8 の時間履歴 (台形速度パターン)

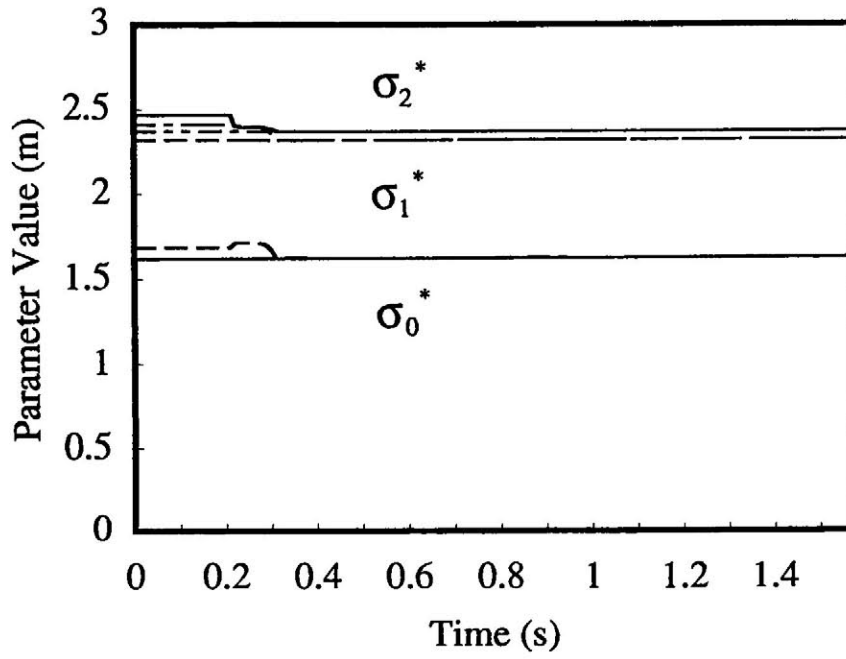


図 3.8 パラメータ σ_0^* ~ σ_2^* の時間履歴 (台形速度パターン)

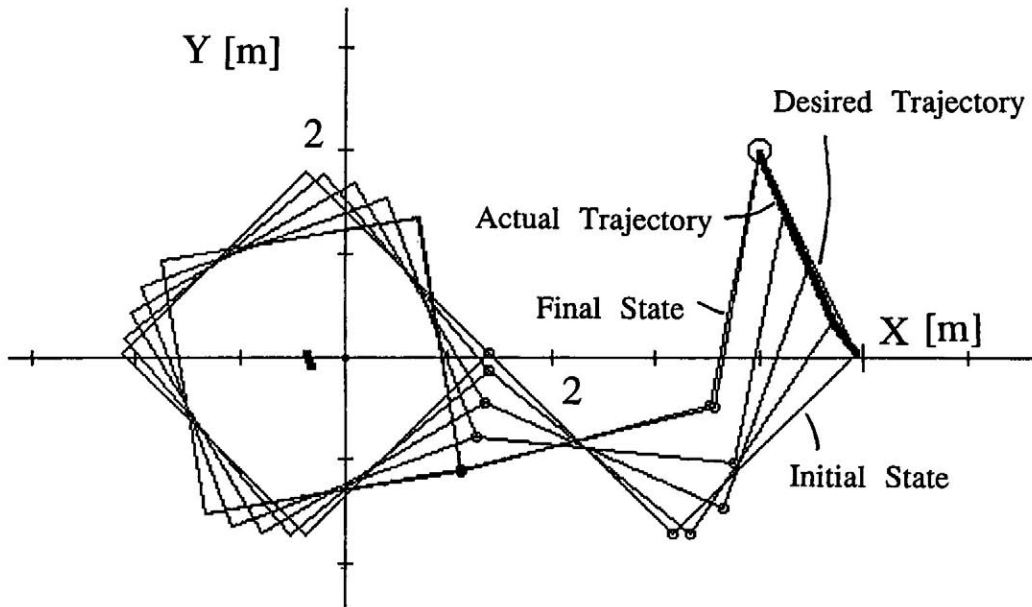


図 3.9 シミュレーション結果 (速度パターンなし)

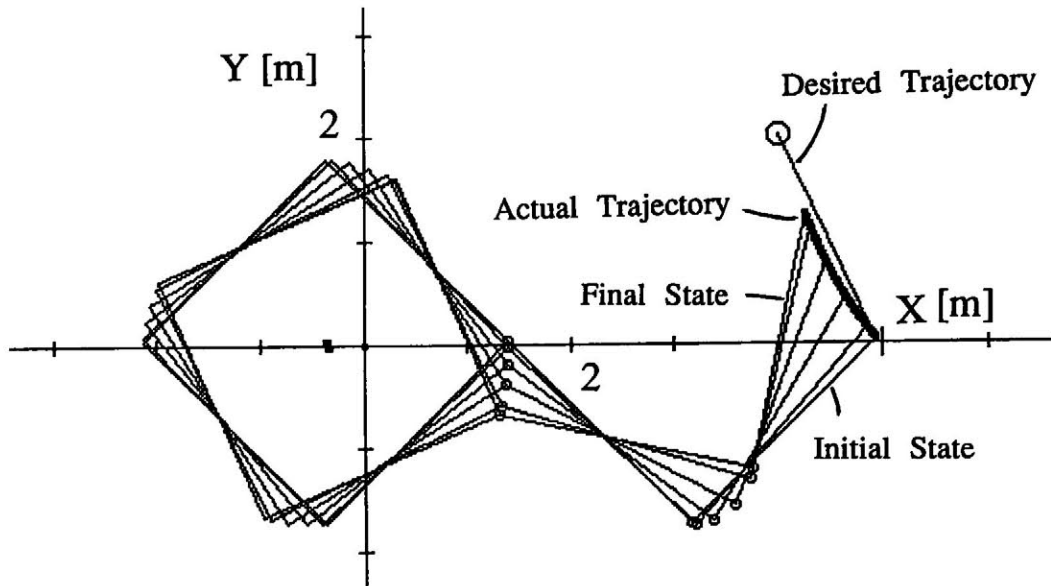


図 3.1 0 推定法を使わないシミュレーション結果 (台形速度パターン)

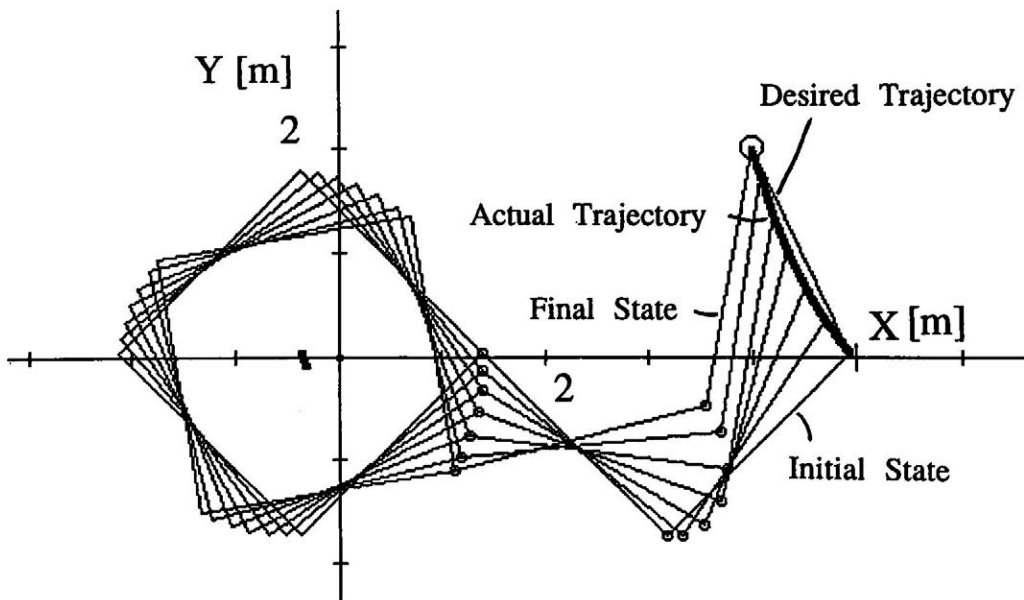


図 3.1 1 推定法を使わないシミュレーション結果 (速度パターンなし)

ここではFFRに搭載されたマニピュレータが未知浮遊物体を捕捉した場合のパラメータ推定法と分解速度制御法によるエンドエフェクタ軌道制御について検討した。パラメータ推定は慣性パラメータに加え，関節の粘性摩擦係数についても行った。得られたおもな結果は以下のとおりである。

- (1) 一般化ヤコビ行列の特性を解析することにより，2段階のパラメータ推定法を用いると簡潔に同定可能であることを明らかにした。
- (2) 2種類のパラメータ推定法と分解速度制御法を併用することにより，マニピュレータが未知物体を捕捉した場合も，良好な制御性能が得られることが計算機シミュレーションにより裏づけられた。

第 4 章

未知浮遊物体捕捉後における手先軌道制御

—デジタル適応制御—⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾

3章において、一般化ヤコビ行列の推定とその結果を用いたFFRの位置制御法を提案した。しかし、この同定にはかなりの演算量と時間を要する。一方、打ち上げ時の重量制限より宇宙へ持って行くことができる計算機は、ノート型パソコン程度であると言われている。また、1章で述べたように分解速度制御法はダイナミクスを考慮していないため高速度運動の場合、速度誤差と位置誤差が生じる。

ここでは、上述のことを考慮し、陽な同定を用いずに、未知パラメータ系に有効な適応制御系の設計法を提案する。なお、計算機の負担を軽減するために、比較的長いサンプリング周期でも有効な離散時間形適応制御系を構成する。さらに、適応制御系の収束性と安定性を保証するために、位置誤差を導入する方法を提案する。なお、演算処理時間としてのむだ時間を考慮したアルゴリズムを導出する。

設計手順はまず、一般化ヤコビ行列を用いた運動学関係式を離散化する。次に、演算時間としての1サンプリング周期のむだ時間を導入したシステムに対して、適応制御系を構成する。さらに、収束性と安定性を保証するために、位置誤差を導入した新しい分解速度制御則を導入する。なお、一般化ヤコビ行列は線形表示不可能であるため、 $I_s^{-1}I_m^T$ を一定と仮定することによってヤコビ行列を単純化し、ヤコビ行列が未知の場合の離散時間形適応制御系を設計する。

提案した制御系の設計手法の特徴は以下のとおりである。

- (1) 離散時間系として設計しているため、設計の結果は直接に計算機制御で実現できる。また、サンプリング周期を比較的大きく取れること、ならびに演算時間としてのむだ時間を考慮しているため、演算量をそれほど気にする必要がない。
- (2) 一般化ヤコビ行列の単純化を行っているため、比較的簡単なアルゴリズムで実現可能である。
- (3) 本手法で必要な情報は、ロボット本体の姿勢角度、マニピュレータの関節角

度および手先の位置情報のみである。

4.1 宇宙ロボットのモデル

本章で対象とした宇宙ロボットの二次元モデルを図4.1に示す。このモデルは3章のモデルと同じモデルで、ロボット本体と2本のリンクからなるマニピュレータで構成され、各関節は回転関節で、アクチュエータを備えている。

また、制御則に手先の位置誤差を用いるため、手先位置情報を追加した。すなわち、ここでは仮定を以下のように修正する。

[仮定]

- (5) FFR本体の姿勢角，マニピュレータの各関節角，各関節角速度およびエンドエフェクタの位置は計測可能である。
- (6) FFRの各回転関節において，摩擦力は作用しない。

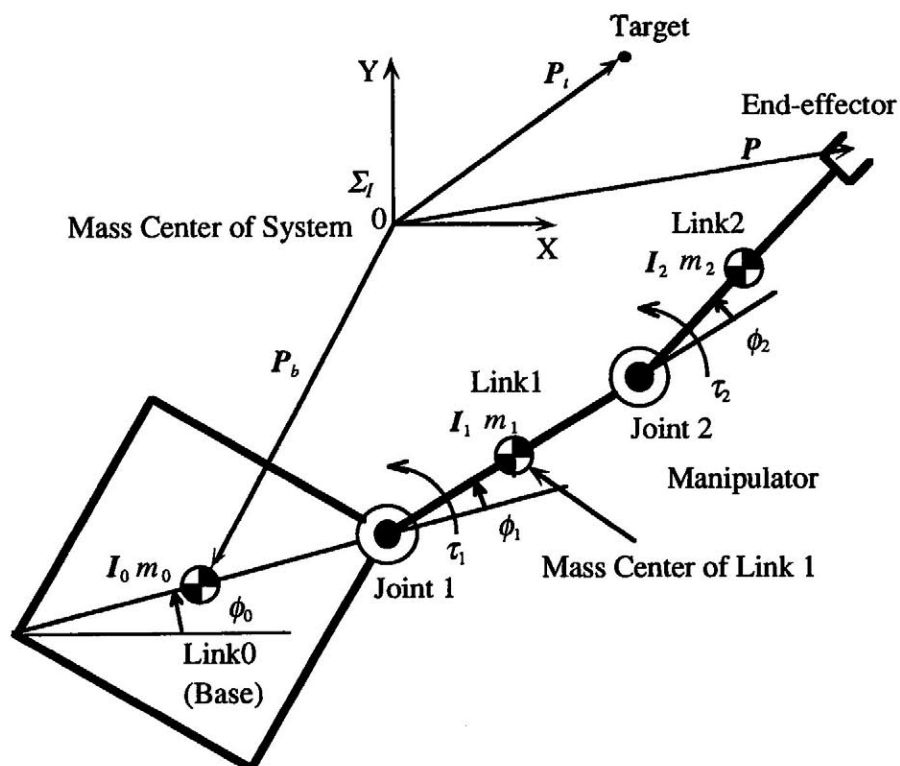


図4.1 宇宙ロボットの2次元モデル

4.2 運動学関係式の離散化と分解速度制御

本節では、まず宇宙ロボットの運動学関係式を離散化し、つぎに離散時間形式の分解速度制御則を導出する。

4.2.1 運動学関係式の離散化

マニピュレータの関節角速度 $\dot{\phi}_m(t)$ とエンドエフェクタの速度 $\dot{P}(t)$ の間には、次の運動学関係式が成り立つ⁶⁾。

$$\dot{P}(t) = J^*(t)\dot{\phi}_m(t) \quad (4.1)$$

ただし、 $J^*(t)$ は一般化ヤコビ行列である。

式(4.1)に対して、 $\dot{P}(t)$ に前進差分近似を用い、さらに入力 $\dot{\phi}_m(k)$ の合成において演算時間に起因する1サンプリング周期のむだ時間を考慮すると、次式となる。

$$P(k+1) - P(k) = TJ^*(k)\dot{\phi}_m(k-1) \quad (4.2)$$

なお、 T はサンプリング周期である。

式(4.2)に示す離散化を行うと、外力の働かない宇宙ロボットに対して成立する運動量・角運動量の保存関係が厳密には成立しなくなるが、後に示す適応制御手法により、その点は補償できると考える。

本章では、式(4.2)を対象とするロボットの数式モデルとし、制御系の設計を行う。

4.2.2 分解速度制御

式(4.2)を $\dot{\phi}_m(k)$ について解き、 $P(k)$ をその目標値 $P_d(k)$ で置換すると、分解速度制

御則の離散時間形式として

$$\dot{\phi}_m(k) = \frac{1}{T} [J^*(k)]^{-1} \{P_d(k+2) - P_d(k+1)\} \quad (4.3)$$

が得られる。なお、ここでは未来値 $J^*(k+1)$ は、その変動が1 サンプルング周期間で微小とし $J^*(k)$ で近似している。

分解速度制御は動特性を考慮していないため、高速動作を行うような場合には、十分な制御性能が期待できない。また、フィードバックループを持たないため、定常位置誤差が生じる。これらの問題を解決するために、式(4.3)に位置誤差 $e(k)$ を導入した新たな分解速度制御則を

$$\dot{\phi}_m(k) = \frac{1}{T} [J^*(k)]^{-1} [P_d(k+2) - P_d(k+1) - Ae(k)] \quad (4.4)$$

とする。ただし、

$$e(k) = P_d(k) - P(k) \quad : \text{位置誤差}$$

$$A = \text{diag} \{ \lambda_1, \lambda_2 \} \quad : \text{ゲイン行列}$$

である。

4.3 適応制御系の設計

一般化ヤコビ行列 J^* の正確な同定、とりわけ未知浮遊物体を捕捉した場合の同定は、質量や慣性モーメントの変化により困難であり、その結果、満足いく制御性能が期待できない。動特性が未知、あるいは変動する制御対象に対して、適応制御が有効であることが知られている。したがって、制御則式(4.4)に対して、 J^* が未知の場合の離散時間形適応制御系を設計する。

4.3.1 一般化ヤコビ行列の簡単化

一般化ヤコビ行列は次式に示すように、4つの要素から成り立っている。

$$J^* = J_m - J_s I_s^{-1} I_m^T \quad (4.5)$$

ここで、 I_s は衛星本体の慣性モーメント、 I_m はマニピュレータの慣性モーメントベクトル、 J_s と J_m は各リンクの質量比を含んだ拡張ヤコビ行列である。一般化ヤコビ行列を構成する要素 I_s 、 I_m 、 J_s と J_m のそれぞれは、物理パラメータに関して線形表示可能であるが、 I_s の逆数演算により一般化ヤコビ行列自身は線形表示不可能である。したがって、このままでは適応制御系の構成が非常に複雑となる。

図4.1のマニピュレータの手先を、一般化ヤコビ行列を用いた分解速度制御法で点(-2m, 2m)に移動したときの $I_s^{-1} I_m^T$ の構成要素を求めた結果が図4.2である。図4.2よりベクトル $I_s^{-1} I_m^T$ の各要素の変化は比較的緩やかである。したがって、ここでは $I_s^{-1} I_m^T$ を一定と仮定する。この仮定により、一般化ヤコビ行列は物理パラメータに関して線形表示でき、比較的簡潔に適応制御系の設計が可能となる。上に述べた仮定より、一般化ヤコビ行列は次式で表現できる。

$$J^* = \begin{bmatrix} \alpha_1 S_0 + \alpha_2 S_1 + \alpha_3 S_2 & \alpha_4 S_0 + \alpha_5 S_1 + \alpha_6 S_2 \\ \beta_1 C_0 + \beta_2 C_1 + \beta_3 C_2 & \beta_4 C_0 + \beta_5 C_1 + \beta_6 C_2 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

ただし、

$$\theta_0 = \phi_0, \theta_1 = \phi_0 + \phi_1, \theta_2 = \phi_0 + \phi_1 + \phi_2$$

$$S_i = \sin \theta_i, C_i = \cos \theta_i \quad (i = 0, 1, 2)$$

$$\alpha_j, \beta_j \quad (j = 1, \dots, 6) : \text{FFRの物理パラメータからなるパラメータ}$$

である。

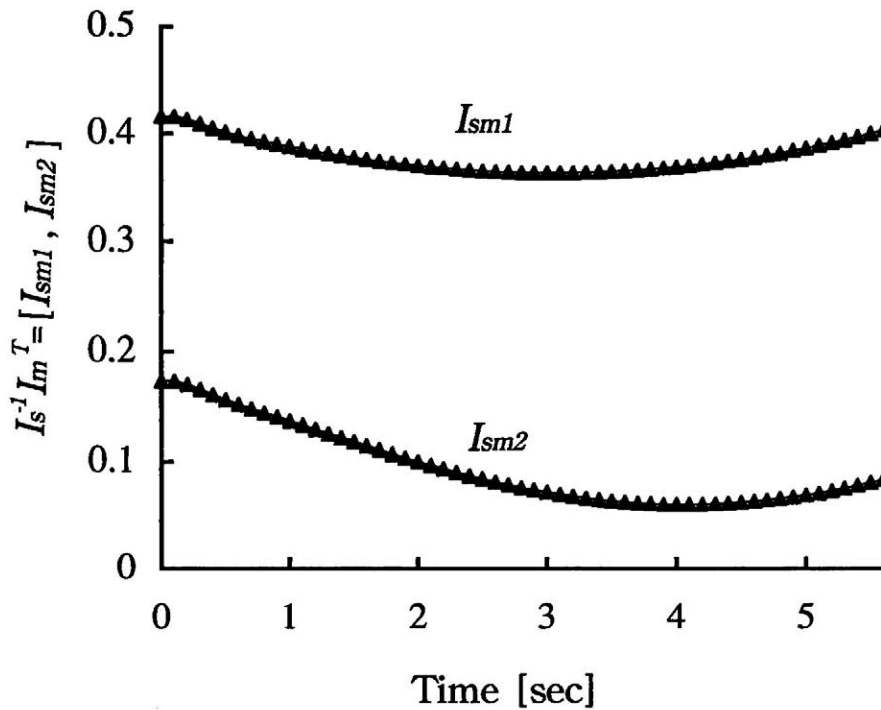


図 4.2 $I_s^{-1} I_m^T$ の時間履歴

4.3.2 制御則

宇宙用マニピュレータの手先位置制御手法として、式(4.4)の分解速度制御則を適応形とした適応形分解速度制御則を次式とする。

$$\dot{\phi}_m(k) = \frac{1}{T} \left[\hat{J}^*(k, k) \right]^{-1} \left[P_d(k+2) - P_d(k+1) - \Lambda e(k) \right] \quad (4.7)$$

ここで、 $\hat{J}^*(m, n)$ は次式で示すように、 m 時点における関節角 $\theta_i(m)$ を用いた α_i と β_i の、 n 時点における推定値 $\hat{\alpha}_i(n)$ と $\hat{\beta}_i(n)$ から構成される、一般化ヤコビ行列の推定値である。

$$\hat{J}^*(m, n) = \begin{bmatrix} \hat{\alpha}_1(n) S_0(m) + \hat{\alpha}_2(n) S_1(m) + \hat{\alpha}_3(n) S_2(m) \\ \hat{\beta}_1(n) C_0(m) + \hat{\beta}_2(n) C_1(m) + \hat{\beta}_3(n) C_2(m) \end{bmatrix}$$

$$\left. \begin{aligned} & \hat{\alpha}_4(n)S_0(m) + \hat{\alpha}_5(n)S_1(m) + \hat{\alpha}_6(n)S_2(m) \\ & \hat{\beta}_4(n)C_0(m) + \hat{\beta}_5(n)C_1(m) + \hat{\beta}_6(n)C_2(m) \end{aligned} \right\}$$

式(4.2)より $P(k)$ の推定値 $\hat{P}(k)$ を

$$\hat{P}(k) = P(k-1) + T \hat{J}^*(k-1, k) \phi_m(k-2) \quad (4.8)$$

とすると, 同定誤差 $\varepsilon(k)$ は式(4.2)と式(4.8)より,

$$\begin{aligned} \varepsilon(k) &= \hat{P}(k) - P(k) \\ &= T \left\{ \hat{J}^*(k-1, k) - J^*(k-1) \right\} \phi_m(k-2) \end{aligned} \quad (4.9)$$

となる. ここで, 式(4.9)を要素に分解すると次式となる.

$$\varepsilon_1(k) = \left\{ \hat{\alpha}(k) - \alpha \right\}^T \xi_1(k-1) \quad (4.10a)$$

$$\varepsilon_2(k) = \left\{ \hat{\beta}(k) - \beta \right\}^T \xi_2(k-1) \quad (4.10b)$$

ただし,

$$\varepsilon(k) = \left[\varepsilon_1(k), \varepsilon_2(k) \right]^T$$

$$\alpha = \left[\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_6 \right]^T$$

$$\beta = \left[\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_6 \right]^T$$

$$\hat{\alpha}(k) = \left[\hat{\alpha}_1(k), \hat{\alpha}_2(k), \dots, \hat{\alpha}_6(k) \right]^T$$

$$\hat{\beta}(k) = \left[\hat{\beta}_1(k), \hat{\beta}_2(k), \dots, \hat{\beta}_6(k) \right]^T$$

$$\xi_1(k) = T \left[\begin{array}{l} \phi_{m_1}(k-1) S_0(k), \phi_{m_1}(k-1) S_1(k), \phi_{m_1}(k-1) S_2(k), \\ \phi_{m_2}(k-1) S_0(k), \phi_{m_2}(k-1) S_1(k), \phi_{m_2}(k-1) S_2(k) \end{array} \right]$$

$$\xi_2(k) = T \left[\begin{array}{l} \phi_{m_1}(k-1) C_0(k), \phi_{m_1}(k-1) C_1(k), \phi_{m_1}(k-1) C_2(k), \\ \phi_{m_2}(k-1) C_0(k), \phi_{m_2}(k-1) C_1(k), \phi_{m_2}(k-1) C_2(k) \end{array} \right]$$

である。式(4.9)に対しては、種々の適応アルゴリズムにより、 $k \rightarrow \infty$ で、

$$\begin{aligned} \varepsilon(k) &\rightarrow 0, \hat{\alpha}(k) - \hat{\alpha}(k-1) \rightarrow 0, \hat{\beta}(k) - \hat{\beta}(k-1) \rightarrow 0 \\ \hat{J}^*(k, k+1) - \hat{J}^*(k, k) &\rightarrow 0 \end{aligned} \quad (4.11)$$

が保証できる⁽²⁹⁾。

一方、式(4.2)と式(4.7)より、追従誤差方程式は次式となる。

$$\{z(z-1)I - \Lambda\}e(k) = T \left\{ \hat{J}^*(k, k) - J^*(k+1) \right\} \phi_m(k)$$

ただし、 z は1サンプリング周期の進みオペレータである。

1サンプリング間での一般化ヤコビ行列 J^* の変化は比較的小さく、 $\hat{J}^*(k+1, k+2) \cong \hat{J}^*(k, k+1)$ が成立すると、

$$\{z(z-1)I - \Lambda\}e(k) = T \left\{ \hat{J}^*(k+1, k+2) - J^*(k+1) \right\} \phi_m(k) - T \left\{ \hat{J}^*(k, k+1) - \hat{J}^*(k, k) \right\} \phi_m(k)$$

となり、式(4.9)より、次式が得られる。

$$\{z(z-1)I - \Lambda\}e(k) = \varepsilon(k+2) - T \left\{ \hat{J}^*(k, k+1) - \hat{J}^*(k, k) \right\} \phi_m(k) \quad (4.12)$$

ここで、適応アルゴリズムにより式(4.11)の条件が保証されているので、 $\phi_m(k)$ が有界ならば、

$$\{z(z-1)I - \Lambda\}e(k) \rightarrow 0 \quad \text{for } k \rightarrow \infty$$

となる。したがって、ゲイン行列 Λ の対角要素 λ_i が条件 $-1 < \lambda_i < 0$ を満たすように選ぶと、 $e(k) \rightarrow 0 (k \rightarrow \infty)$ が保証される。

4.4 シミュレーション

提案した適応制御系の有効性を検証するために、式(4.7)の適応形分解速度制御則を用いて手先位置制御のシミュレーションを行った。シミュレーションで用いる宇宙ロボットの物理パラメータを表4.1に示す。

表 4.1 宇宙ロボットの物理パラメータ

	Base	Link 1	Link 2
Mass [kg]	2000	50	50
Moment of inertia [kgm ²]	2083	26.0	26.0
Length [m]	3.54	2.50	2.50

ここで、各リンクの慣性モーメントは各リンクの質量中心まわりのものである。また、未知捕捉物体は質量100 kgの質点であるとした。なお、サンプリング周期 T およびゲイン行列 Λ は、それぞれ $T=0.1$ 秒、 $\Lambda = \text{diag}\{-0.3, -0.3\}$ とした。

図4.3から図4.5はそれぞれ

- (1) 位置誤差付き適応制御
- (2) 位置誤差なし分解速度制御
- (3) 位置誤差付き分解速度制御

のシミュレーション結果である。また、各図(a)は0.2秒ごとのロボット本体とマニピュレータの運動の様子を、図(b)はこのときの追従誤差の変化を、図(c)は関節角速度の時間履歴をそれぞれ表している

図4.3 (a)より、提案した適応制御系を用いると、エンドエフェクタの軌道は目

標軌道とほぼ一致し、 $I_s^{-1}I_m^T$ を一定にした影響を適応制御系が十分に補償していることが読み取れる。しかし、図 4.4 (a)より、分解速度制御則のみでは目標軌道を大きく外れ、目標位置に届かないことがわかる。また、図 4.4 (a)と図 4.5 (a)より、位置誤差を導入しただけでも比較的良好な軌道制御が可能であることが読み取れる。

図 4.3 (b)に示すように、適応制御の初期過程では一般化ヤコビ行列が十分に同定されず、追従誤差は十分に収束しない。しかし、一般化ヤコビ行列が同定されると追従誤差は非常に小さくなる。さらに、図 4.2 (b)と図 4.5 (b)より、最大追従誤差はそれぞれ0.05 mと0.09 mであり、提案した手法の最大追従誤差は小さいことがわかる。また、1章で述べた分解速度制御則の問題点である追従誤差の累積が顕著に現れているのが、図 4.4 (b)に示されている。

以上より、提案した適応制御系により追従誤差が改善され、良好な制御性能が実現されることが明確に確認された。なお、種々の条件に対して実験を行ったが、同様な結果が得られた。

以上、結果をまとめると表 4.2 となる。

表 4.2 制御性能の比較

制 御 手 法	追従性能
分解速度制御 (位置誤差なし)	×
分解速度制御 (位置誤差付き)	△
適応制御+分解速度制御 (位置誤差付き)	◎

◎：良好 △：やや不良 ×：不良

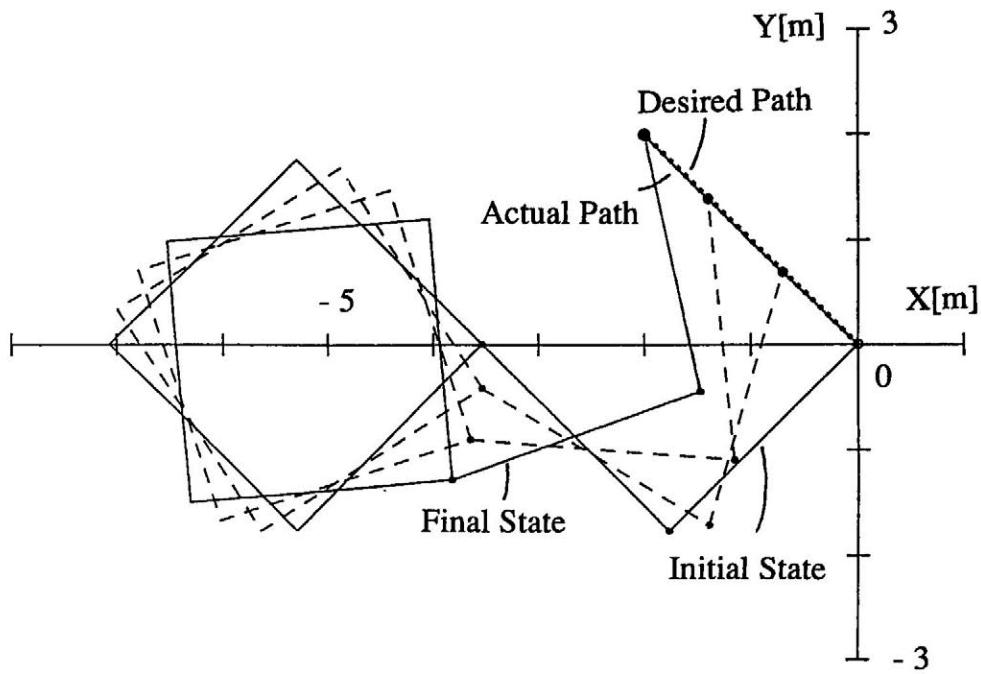


図 4.3 (a) シミュレーション結果 (適応制御)

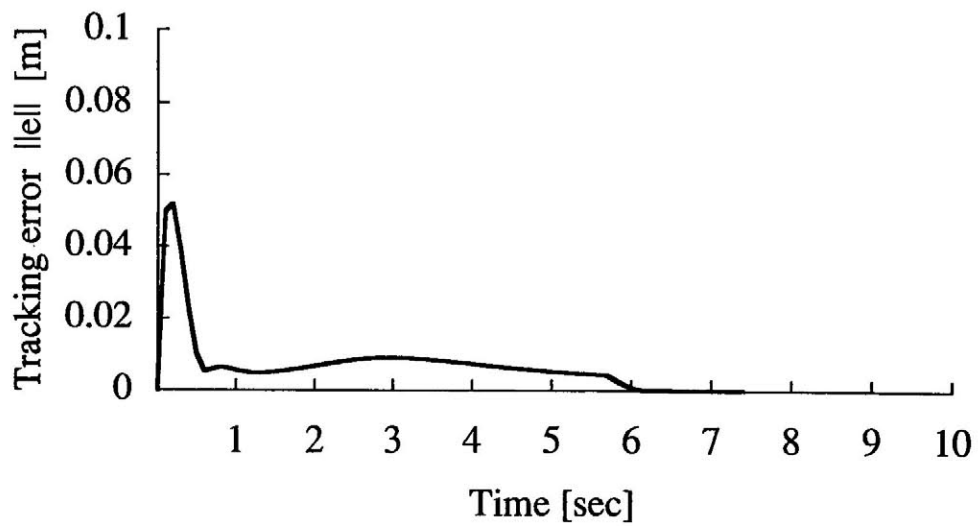


図 4.3 (b) 追従誤差 (適応制御)

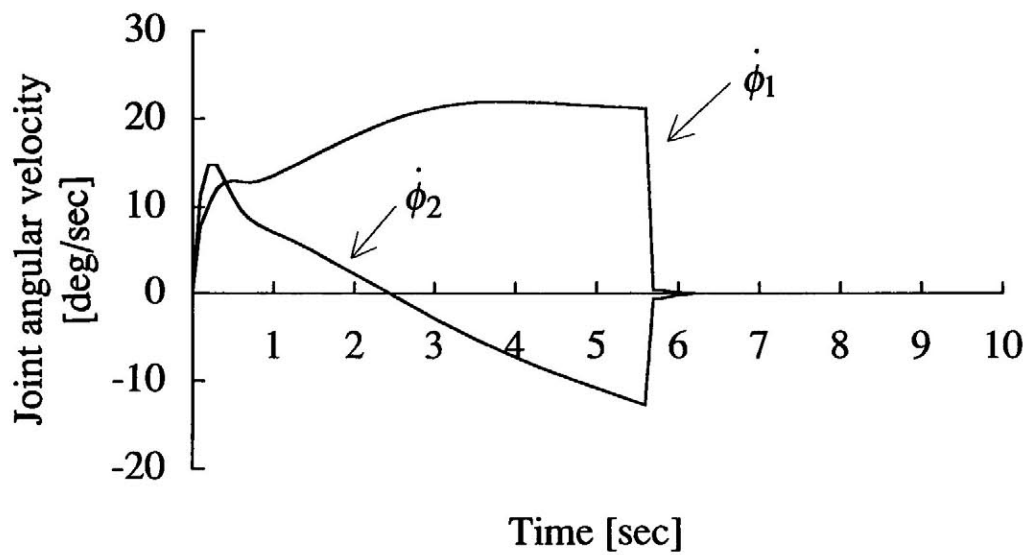


図 4.3 (c) 関節角速度の時間履歴 (適応制御)

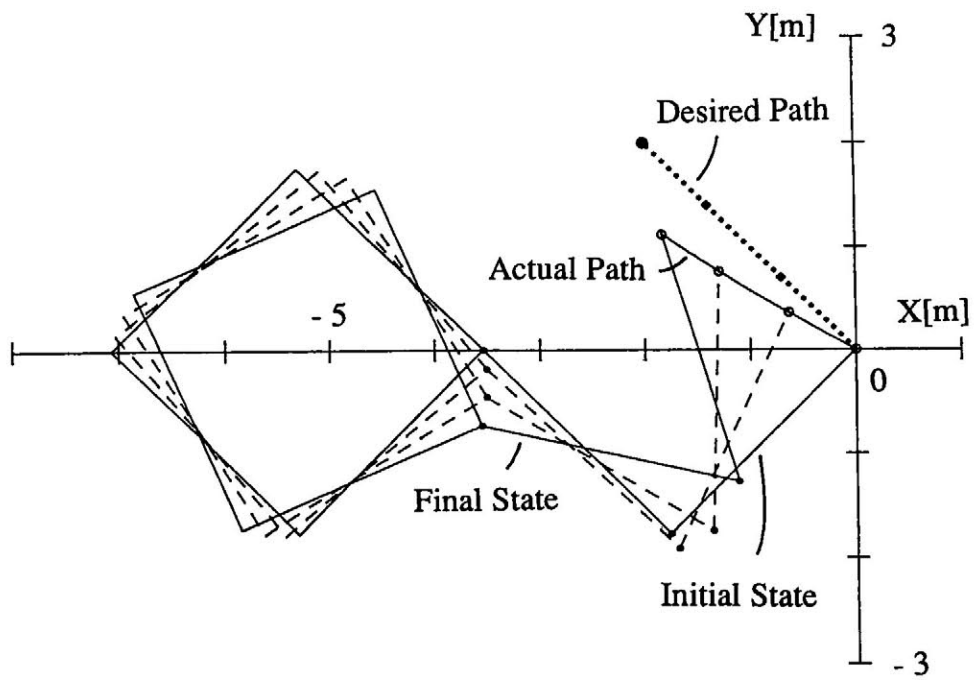


図 4.4 (a) シミュレーション結果 (位置誤差なし)

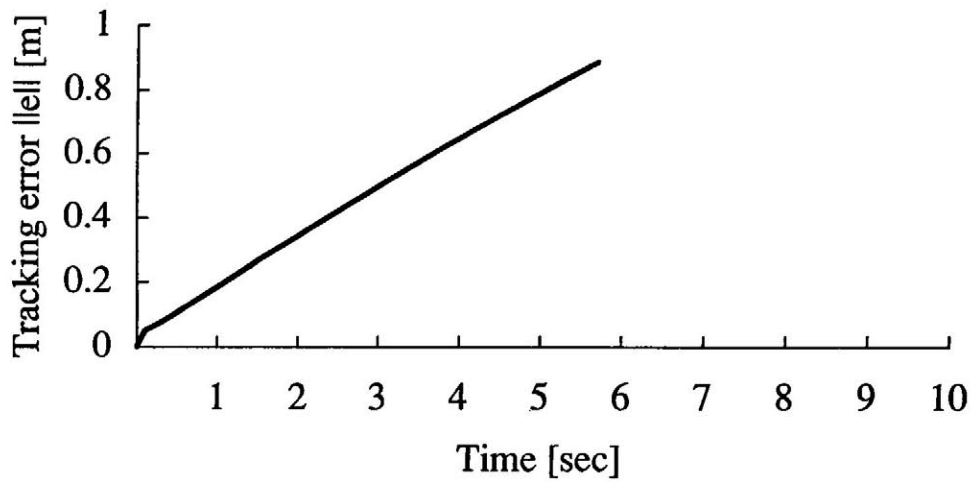


図 4.4 (b) 追従誤差 (位置誤差なし)

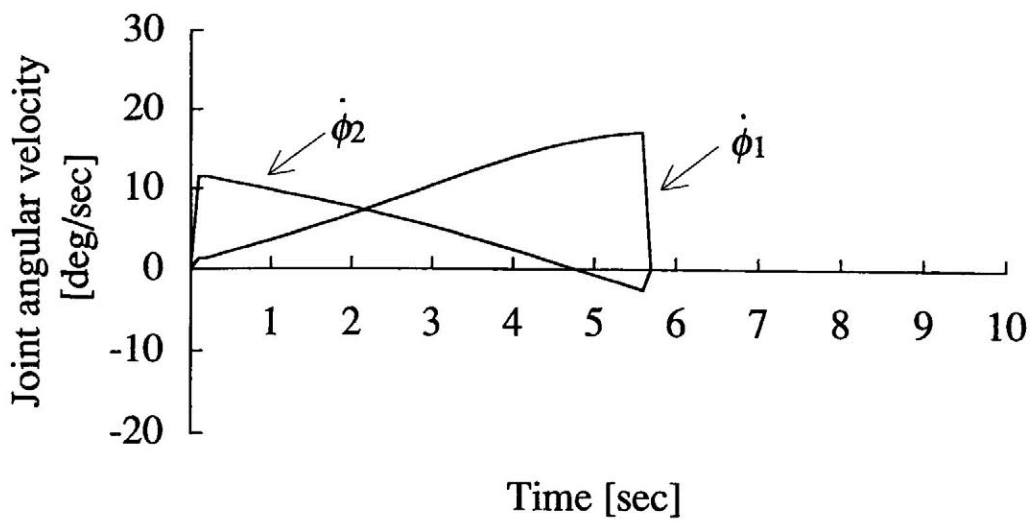


図 4.4 (c) 関節角速度の時間履歴 (位置誤差なし)

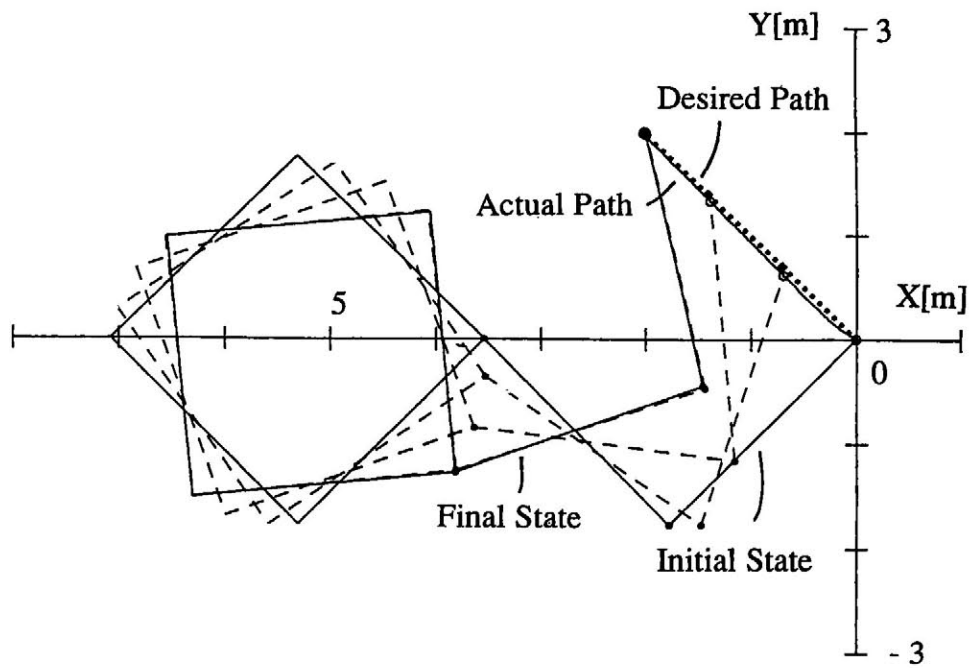


図 4.5 (a) シミュレーション結果 (位置誤差付き)

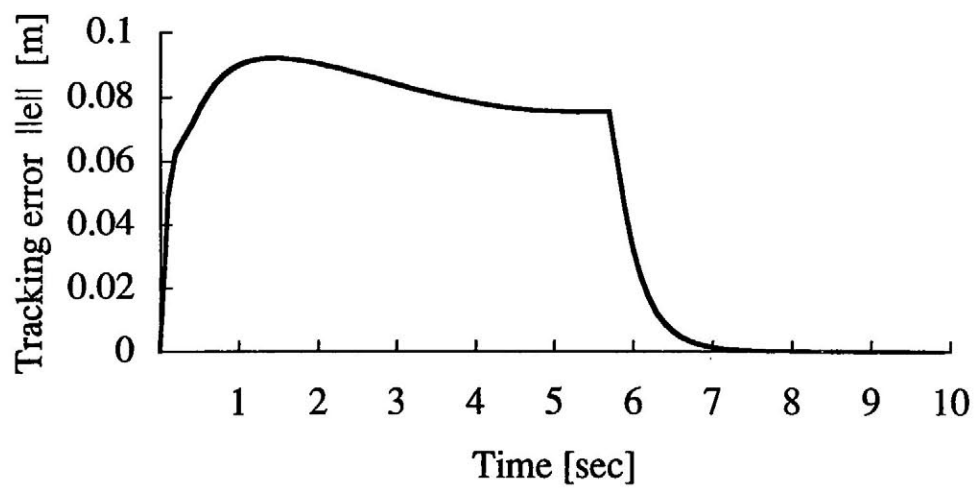


図 4.5 (b) 追従誤差 (位置誤差付き)

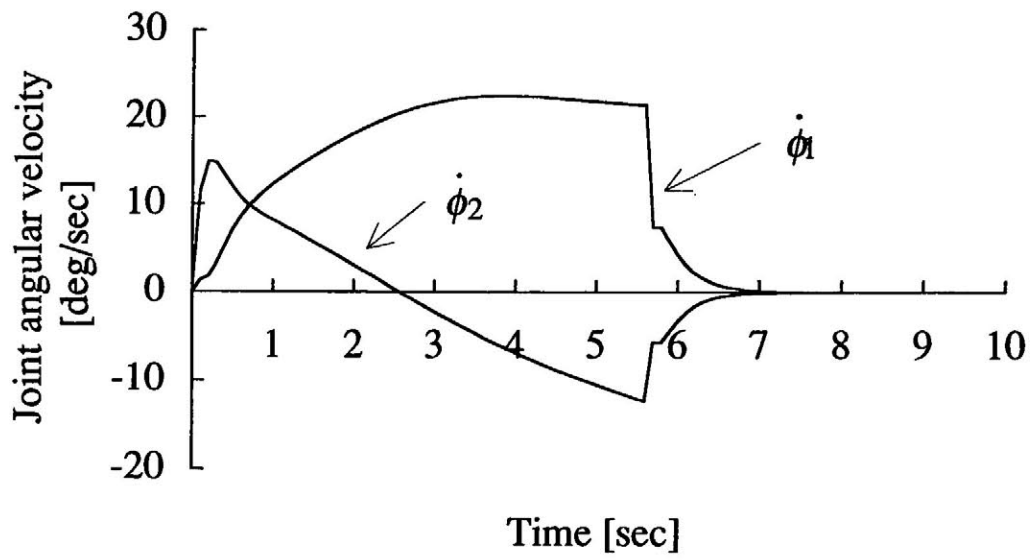


図 4.5 (c) 関節角速度の時間履歴 (位置誤差付き)

第5章

離散時間形適応制御によるデジタル制御実験⁽²⁸⁾⁽³⁰⁾⁻⁽³²⁾

理論解析で得られた結果の実用性を検討するためには、解析や計算機シミュレーションにとどまらず、実機での検討が重要である。この立場からすでにいくつかのシミュレータが試作されている⁽³³⁾⁻⁽⁴³⁾。いずれのシミュレータにおいても、微小重力環境の実現に工夫が凝らされており⁽⁴⁴⁾、おもな方式は以下のとおりである。

- (1) 空気浮上により擬似無重力状態を実現する方法⁽³³⁾⁻⁽⁴⁰⁾
- (2) ソフト的に重力を補償する方法⁽⁴¹⁾⁽⁴²⁾
- (3) 落下塔あるいは弾道飛行により微小重力状態を実現する方法⁽⁴³⁾
- (4) 水中の浮力を利用する方法⁽⁴⁵⁾

(1)の方法は、ロボットの運動が平面に限定されるが、製作が比較的簡単である。一方、(2)の方法は三次元運動が可能であるが、装置が大がかりになり、実機のモデルをソフト的にどの程度正確に作成できるかの問題点がある。また、(3)の落下塔の方法は実験装置を小型にする必要があり、実験可能時間が短い。弾道飛行の方法は経費等に問題がある。最後に、(4)の方法は、大掛かりな水槽が必要となり、水の慣性および粘性抵抗のため、力学的正確さの追求が困難である。

本章では、まず開発した空気浮上式シミュレータ SMART - I (Space Manipulator Robot Testbed - I)⁽⁶¹⁾の基本構成と性能評価結果を述べる。さらに、4章で提案した適応制御系を構成し、その有効性を検証する。

5.1 テストベット設計コンセプト

テストベット設計にあたっては、FFRの運動環境が微小重力環境である、つまり物体はすべて浮遊状態にあることを主眼とし、以下のコンセプトで設計した。

- (1) 微小重力環境を模擬できる。
- (2) ロボットは半自立型とする。

(1)の実現のため、圧縮空気をロボットから定盤に噴出し、ロボットを浮遊させる方式を採用した。この方式により実現できる微小重力環境は水平二次元平面内の運動に限定されるが、良好な微小重力環境が期待できる。(2)は宇宙ロボットの活動状況を考慮してのコンセプトであり、ロボット制御のために必要な装置はすべてロボット上に搭載することとした。ただし、圧縮空気を供給するエアースホースだけが外部環境とつながっている。なお、スラスタ、リアクションホイールのようなロボット本体の位置や姿勢角を制御するための装置は搭載されていない。

5.2 システム構成

開発したテストベッドのシステム構成図を図5.1に示す。テストベッドはFFRシステムと座標計測・無線通信システムの2つのサブシステムから構成されている。

FFRシステムの外観を図5.2に示す。FFRシステムは本体部に1本の2リンク回転型マニピュレータを有し、次の要素から構成されている。

- ・各関節に設置された減速器付きDCサーボモータ
(2個, 定格出力20W, 減速比1/100)
- ・各関節に設置されたインクリメンタルエンコーダ (2個, 500P/R)
- ・PWM方式サーボモータドライバ (4ch.)

一方、座標計測・無線通信システムは、ロボットの慣性座標系における位置を計測する座標計測システムと、計測結果をロボットの伝送する情報通信システムから構成されている。座標計測システムはロボット本体に搭載するのが現実的であるが、座標計測システムのコードがロボットの運動を阻害することならびに、FFRシステムが大きくなりすぎるという2つの理由で、本システムではこの構成としている。

図5.3にシステムのブロック図を示す。各サブシステムでは次の処理を行う。座標計測システムでは、リンク2の先端および、先端より関節2に向かって100mm離れた場所にそれぞれ取り付けられた2個のLEDの位置情報を、CCDカメラを介して二次元運動計測装置(X-Y Tracker)に取り込む。さらに、GP-IBインターフェースを介して計算機(NEC PC9821An)に転送し、慣性座標系におけるマニピュレータの手先位置およびFFR本体の姿勢角を求める。また、この情報は情報通信システムにより、FFRシステムの制御用ボードコンピュータに伝送される。FFRシステムではエンコーダで計測した関節角度情報と座標計測・通信システムから送信された位置データをもとに、関節角速度または角度の目標値を求める。さらに、求められた目標値と計測値から制御入力が決まり、D/Aコンバータを通してPWM方式サーボモータドライバに伝達され、DCサーボモータが駆動される。

二次元運動計測装置の処理能力の制約のため、最小サンプリング周期 T は100msである。従って、マニピュレータの滑らかな運動を実現するために、図5.4に示すように目標値を設定した。すなわち、この制御系では100msごとに作成される目標値に対して、その目標値を10等分し、10msごとに目標値を変化させる。システムはその目標値に追従するように制御される。

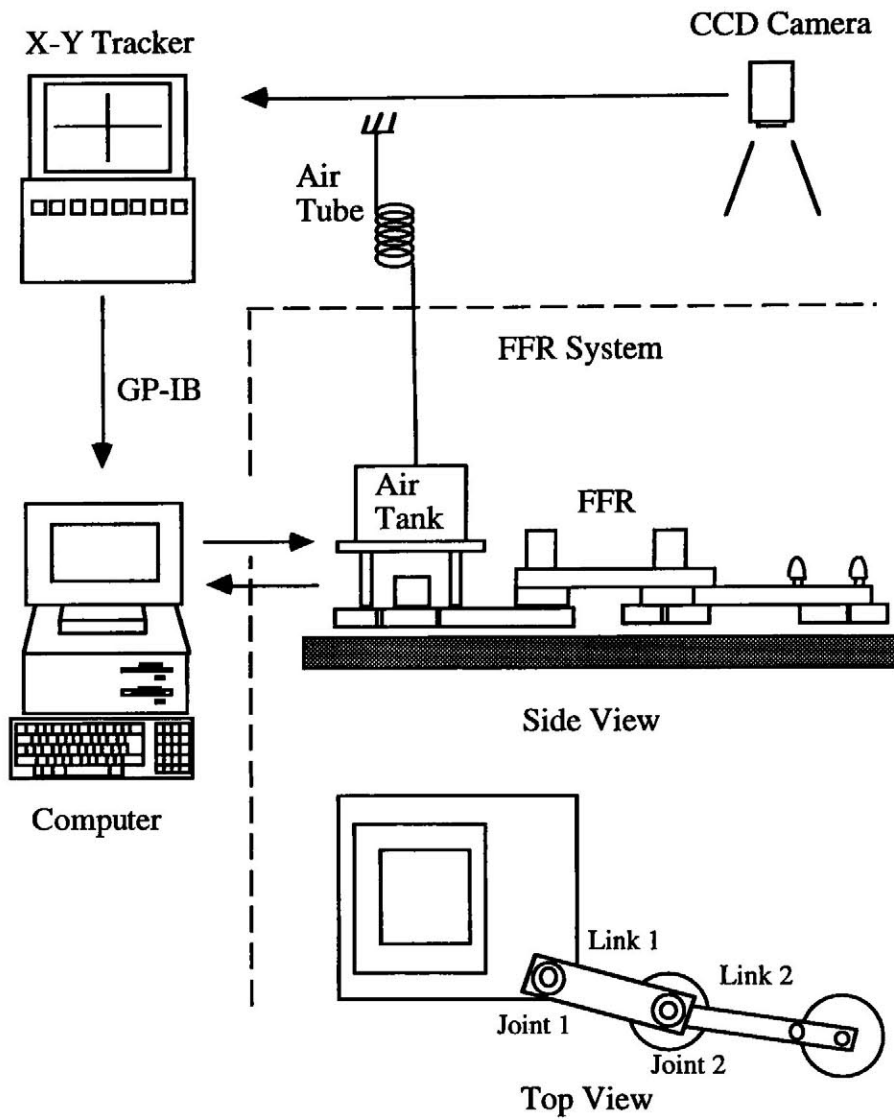


図 5.1 シミュレータのシステム構成

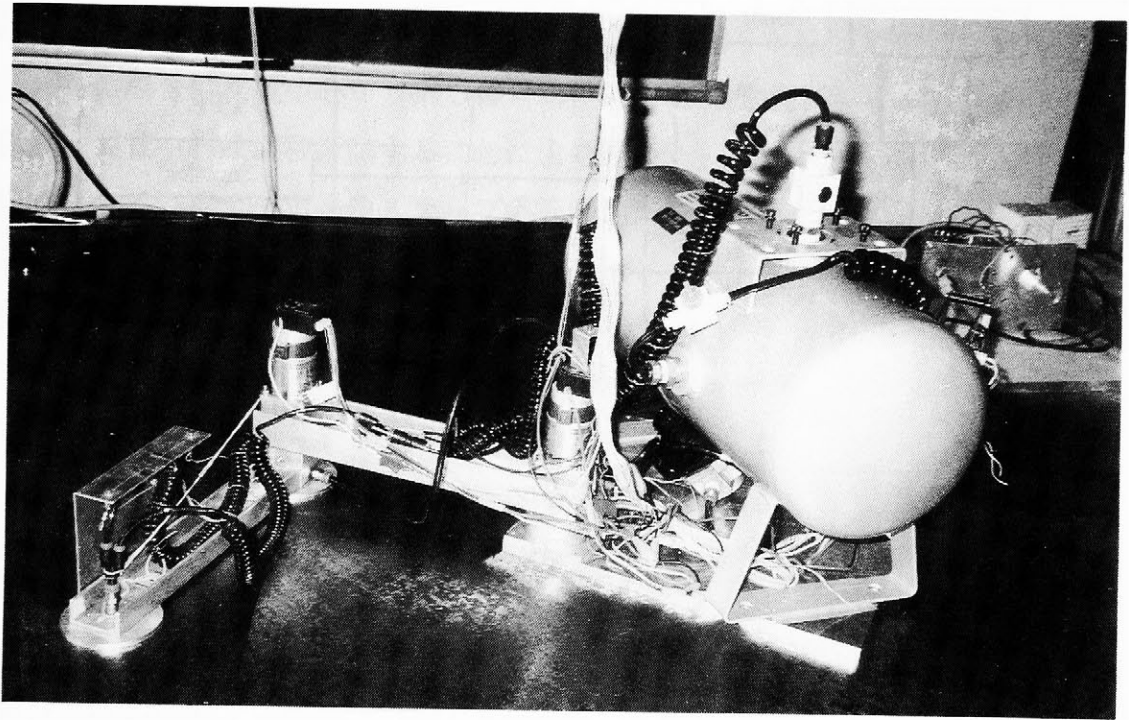


図5.2 シミュレータのシステム外観

Measurement and Communication System

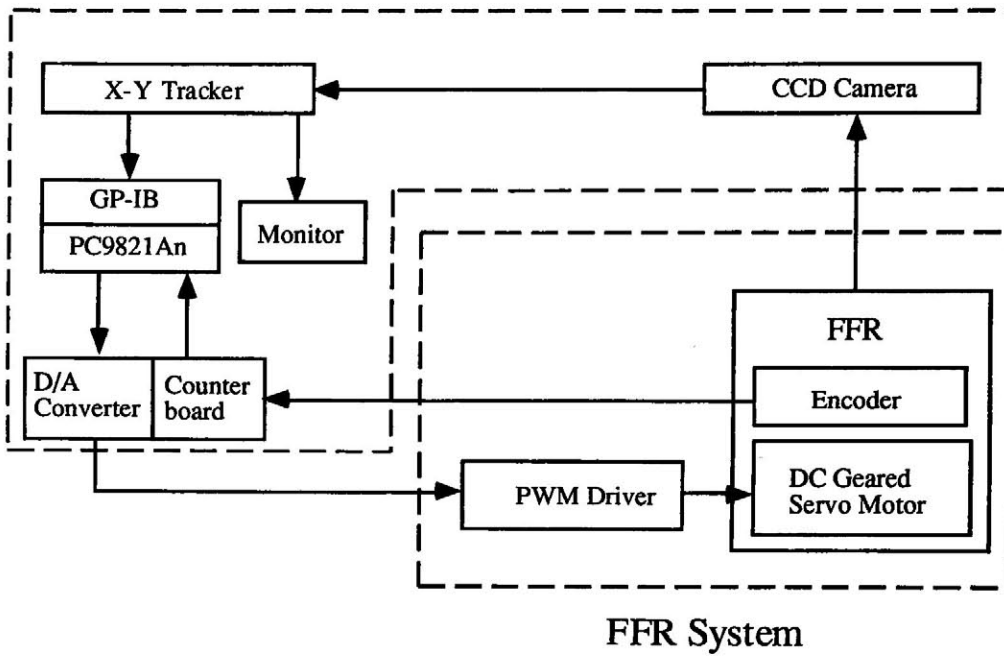


図 5.3 シミュレータの構成図

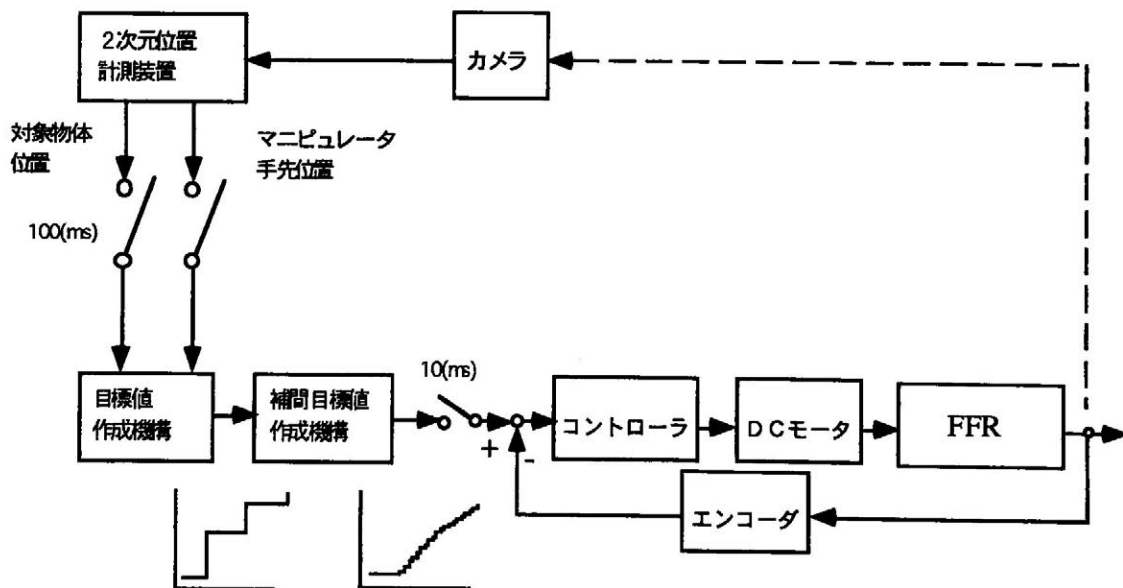


図 5.4 制御系ブロック図

5.3 テストベッドの性能評価

5.3.1 FFRシステムの仕様

試作したFFRシステムの機械的仕様を表5.1に示す。関節およびリンクの番号は図5.5に示す。質量中心は、FFR本体の場合関節1から質量中心までの長さ、リンクの場合は質量中心から同じ番号の関節までの長さである。各要素の寸法、質量、質量中心は直接計測することにより求めた。慣性モーメントは、各関節で構成されているサーボ系のステップ応答波形から減衰率と固有振動数を求めることにより求めた。

表5.1 FFRの物理パラメータ

	Size a_i+b_i (cm)	Center of Mass a_i (cm)	Mass m_i (kg)	Moment of Inertia (kgcm^2)
Body	30.30	20.8	4.01	2691.9
Link1	25.6	12.4	1.33	1345.1
Link2	25.4	8.6	0.50	182.9

5.3.2 擬似無重力特性

本方式と同様の空気浮上式装置の例では、微小重力環境を乱す外乱加速度 α はエアパッドの気体摩擦に起因し、重力の加速度 G との比 α/G の大きさは気体摩擦係数と同程度である⁽³⁾⁽⁴⁶⁾。本テストベッドでは、FFRシステムを浮上させた状態で、床面（定盤）との摩擦係数を調べた結果、 10^{-4} 程度であった。従って、作用する摩擦に起因する加速度は $10^{-4}G$ 程度であると考えられる。なお、スペースシャトルの場合平均 $10^{-4}G$ （数日間）、航空機の弾道飛行では $10^{-2}G$ （数十秒間）、落下塔の場合は $10^{-6}G$ （数秒間）との報告結果⁽⁴⁷⁾と比べても十分な精度で、床面

との摩擦については十分な性能があると判断した。なお、供給空気圧 6.0 kg/cm^2 の圧縮空気をFFR側から噴出した場合、浮上するロボットの高さは、約 0.1 mm であった。

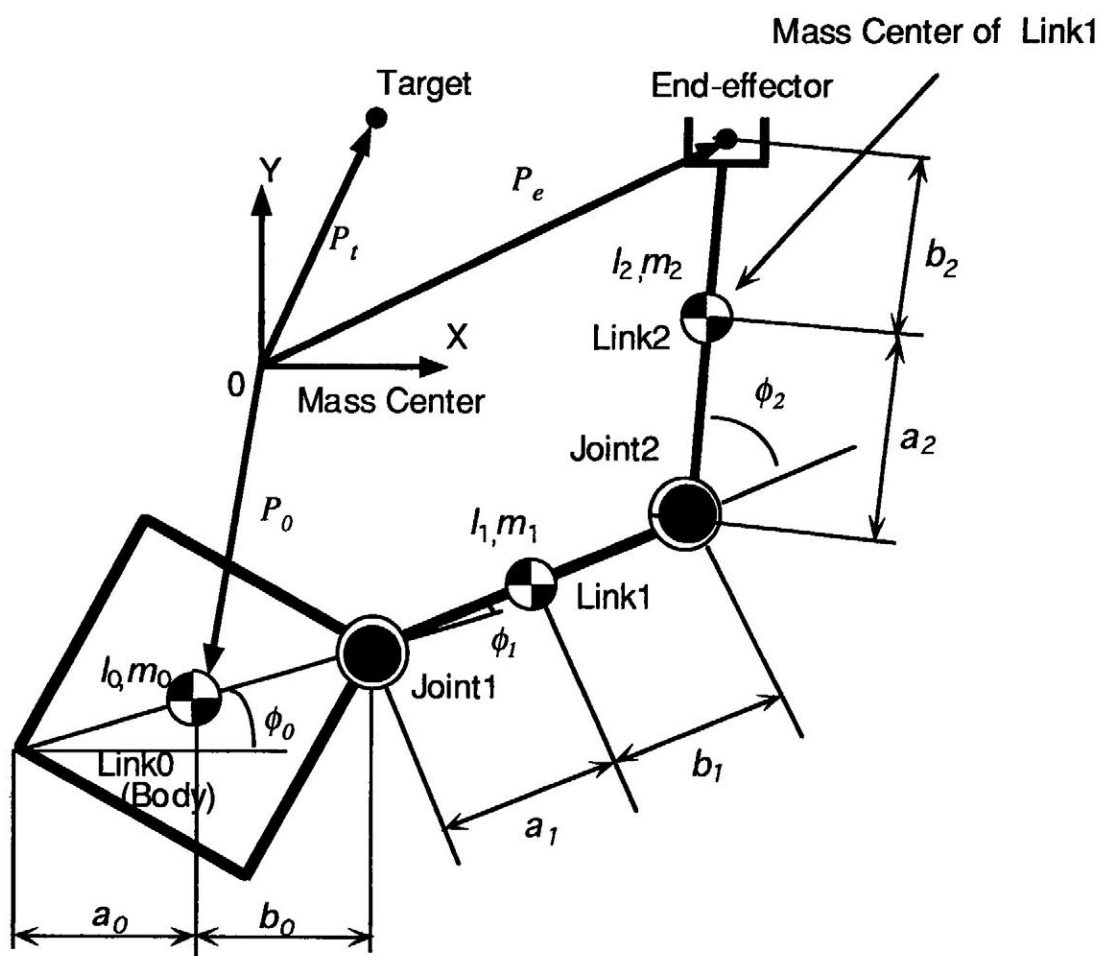


図 5.5 宇宙用マニピュレータの二次元モデル

5.3.3 サーボ特性

各関節で構成されているサーボ系はコントローラとしてP形を用い、その応答特性が臨界制動となるように設定した。また、静止摩擦によるモータの不感帯を補償するために、モータへの指令電圧を次のように補正した。

$$v^* = v + \Delta v$$

ここで、 v と v^* はそれぞれ補正前および補正後のモータへの指令電圧である。補正量 Δv は

$$\Delta v = \begin{cases} \alpha_p & \text{for } v_{ref} > 0 \text{ and } v = 0 \\ 0 & \text{for } v_{ref} = 0 \text{ and } v = 0 \\ -\alpha_n & \text{for } v_{ref} < 0 \text{ and } v = 0 \end{cases}$$

により決定することとし、パラメータ α_p と α_n の値は実験により求めた。本装置のリンク1の場合、 $\alpha_p = 1.15V$ 、 $\alpha_n = 1.15V$ である。

リンク1のステップ応答波形を図5.6に示す。この図よりリンクの慣性がかかなり影響していることがわかる。

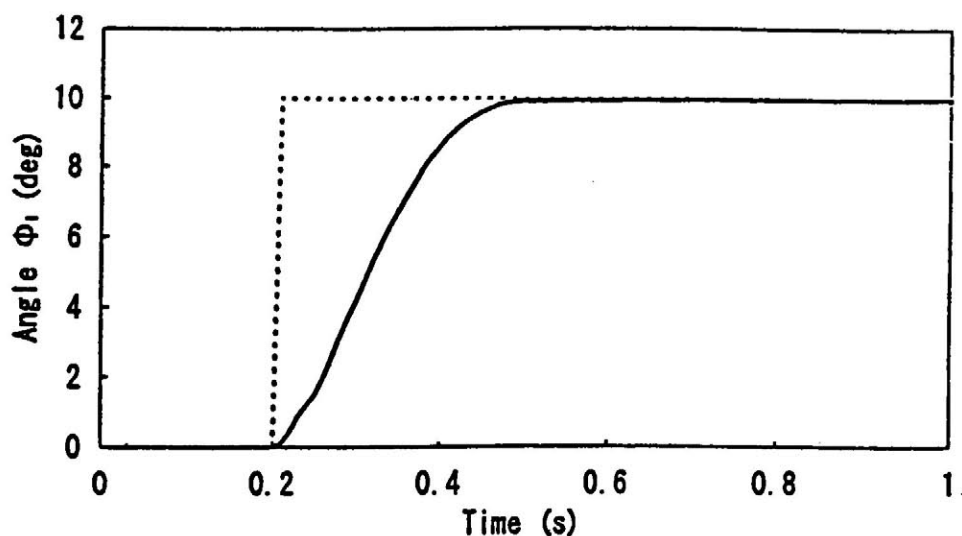


図5.6 ステップ応答例 (リンク1)

5.4 シミュレータによる実験結果

前章で示したシミュレータを用いて、手先位置制御実験を行った。適応制御則式(4.7)、分解速度制御則式(4.3)および位置誤差を導入した分解速度制御則式(4.4)を用いた場合の実験結果をそれぞれ図5.7、図5.8と図5.9に示す。ここでは、未知浮遊物体として0.5[kg]の重りをリンク2に載せた。なお、サンプリング周期は0.1秒、またゲイン Λ は全ての要素が-0.3である対角行列とした。

図5.7(a)と図5.9(a)より、手先軌道は目標軌道に良好に追従していることが読み取れる。しかし、図5.8(a)より、分解速度制御則のみを用いた場合、目標軌道から徐々に外れていることがわかる。また図5.8(a)と図5.9(a)より、分解速度制御則に位置誤差を導入すると、エンドエフェクタの追従性能が大幅に改善されることがわかる。

図5.7(b)は、スタート後2秒程度まではヤコビ行列が十分に同定されていないので、追従誤差が大きい。それ以降はヤコビ行列が同定され、追従誤差も小さくなっていることを示している。さらに、図5.7(b)と図5.9(b)より、適応制御を導入することで追従誤差が押さえられることが読み取れる。また、図5.8(b)では、分解速度制御法の欠点である位置誤差の累積が生じている。

図5.7(c)と(d)、図5.8(c)と(d)、図5.9(c)と(d)より、適応制御を導入した方法が他の2つの方法に比べ、目標関節角速度に良好に追従していることがわかる。

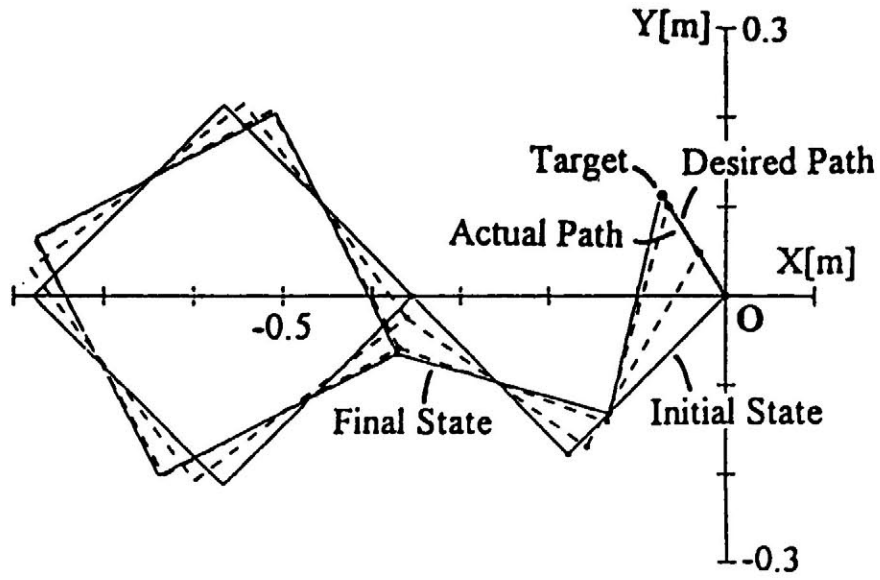


图 5.7 (a) 実験結果 (適応制御)

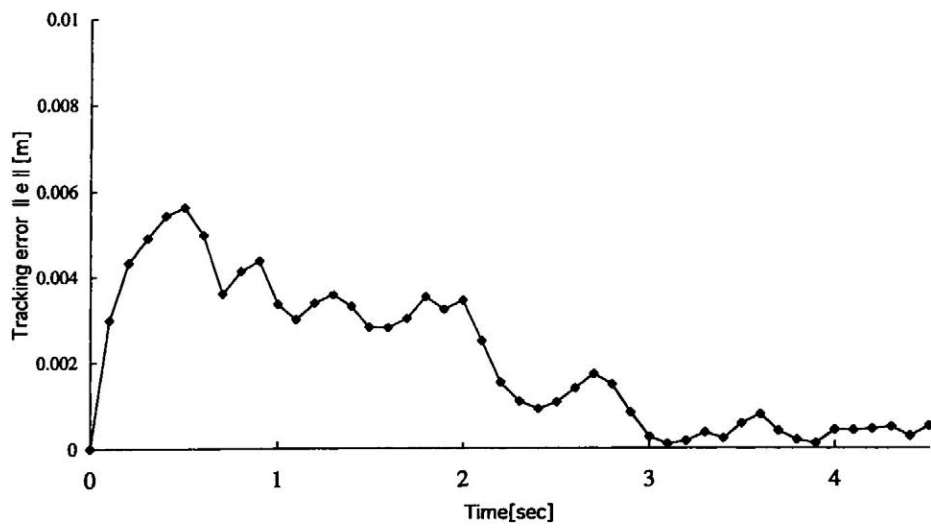


图 5.7 (b) 追従誤差 (適応制御)

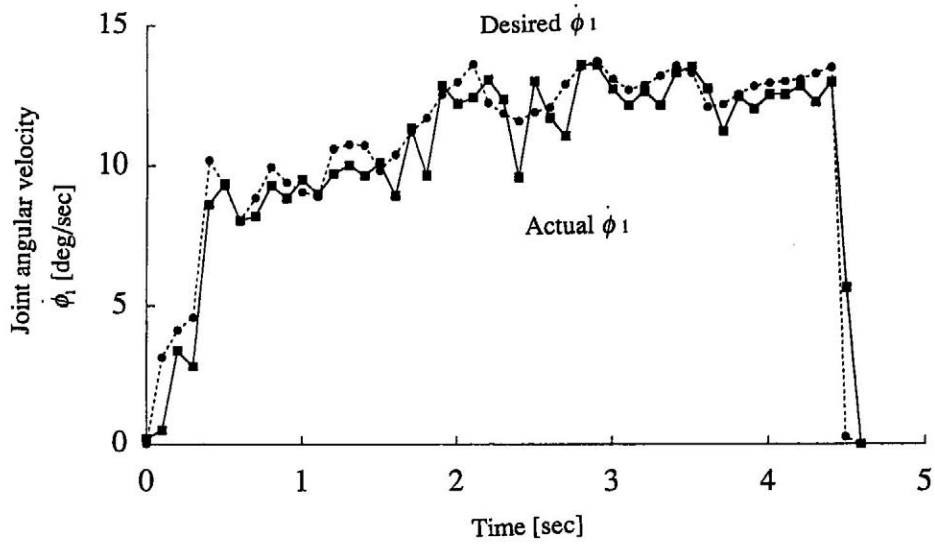


図 5.7 (c) 関節角速度の時間履歴 (適応制御)

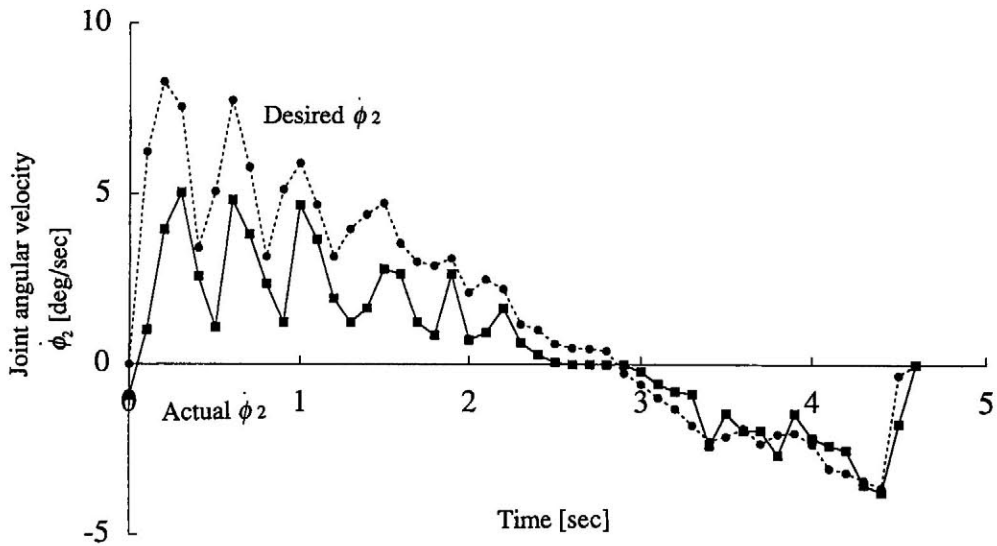


図 5.7 (d) 関節角速度の時間履歴 (適応制御)

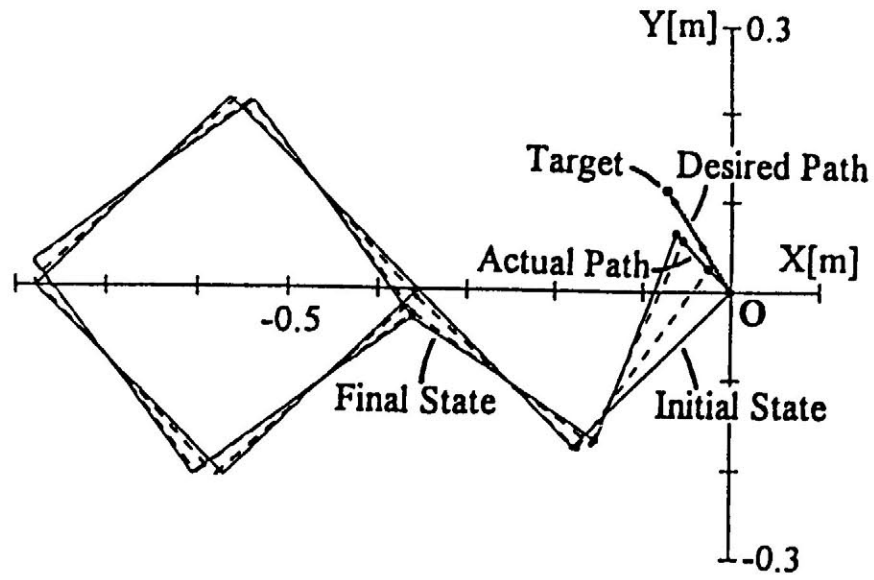


図 5.8 (a) 実験結果 (分解速度制御)

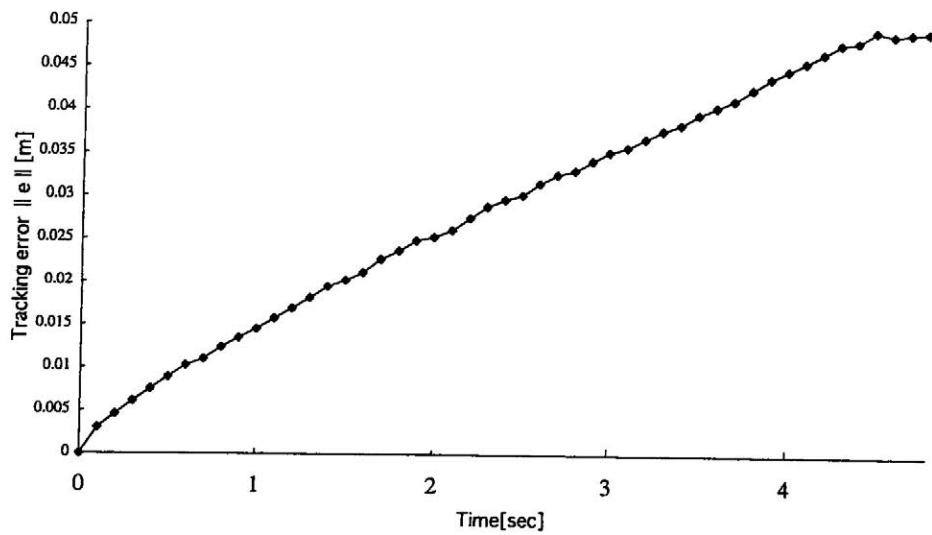


図 5.8 (b) 追従誤差 (分解速度制御)

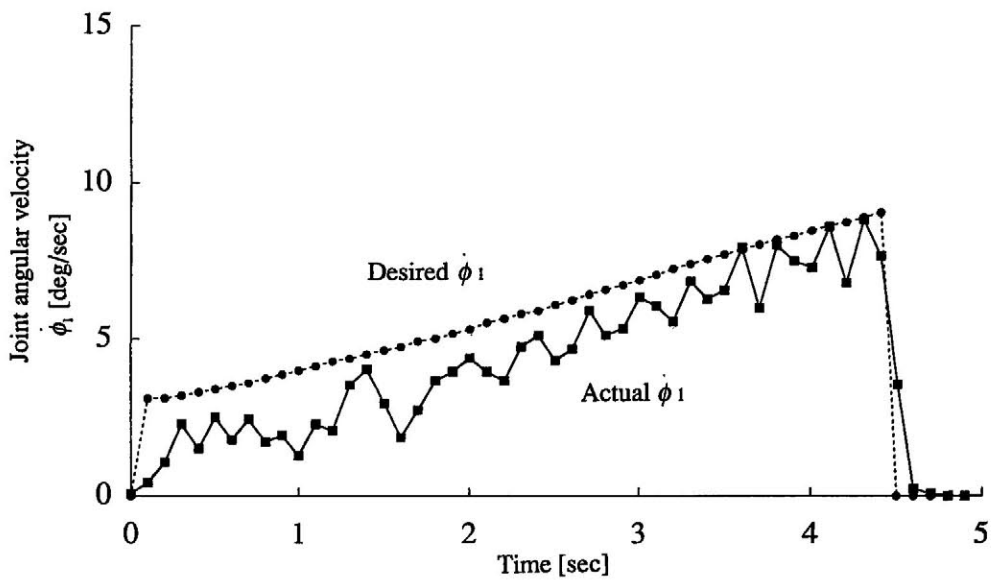


図 5.8 (c) 関節角速度の時間履歴 (分解速度制御)

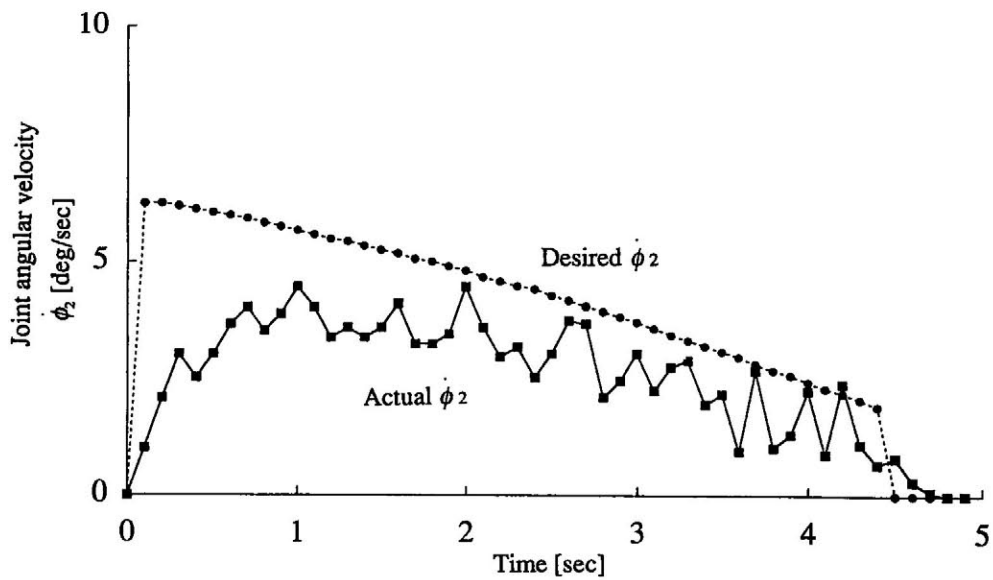


図 5.8 (d) 関節角速度の時間履歴 (分解速度制御)

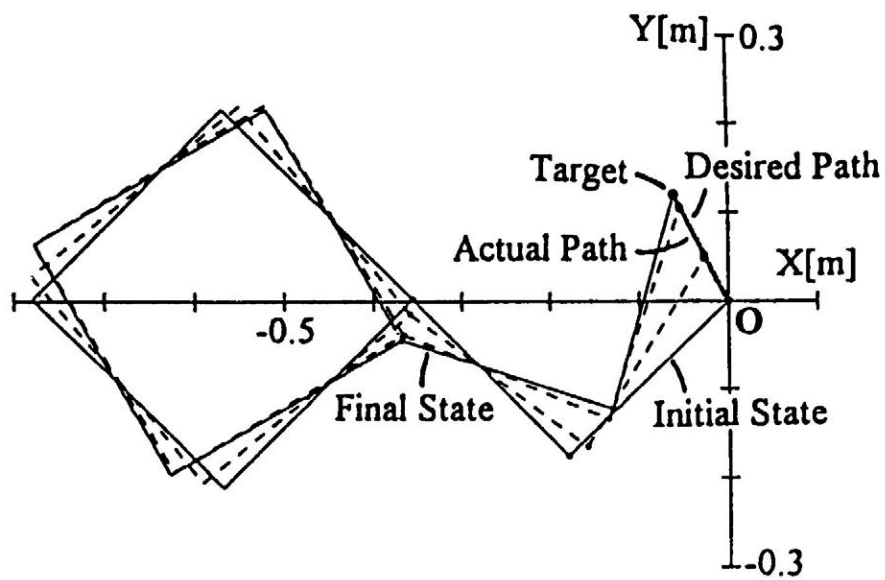


図 5.9 (a) 実験結果 (位置誤差付き分解速度制御)

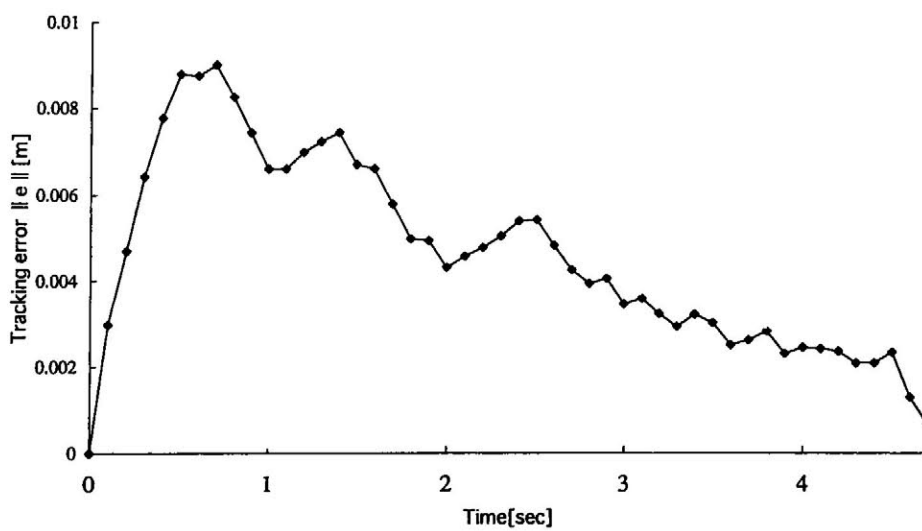


図 5.9 (b) 追従誤差 (位置誤差付き分解速度制御)

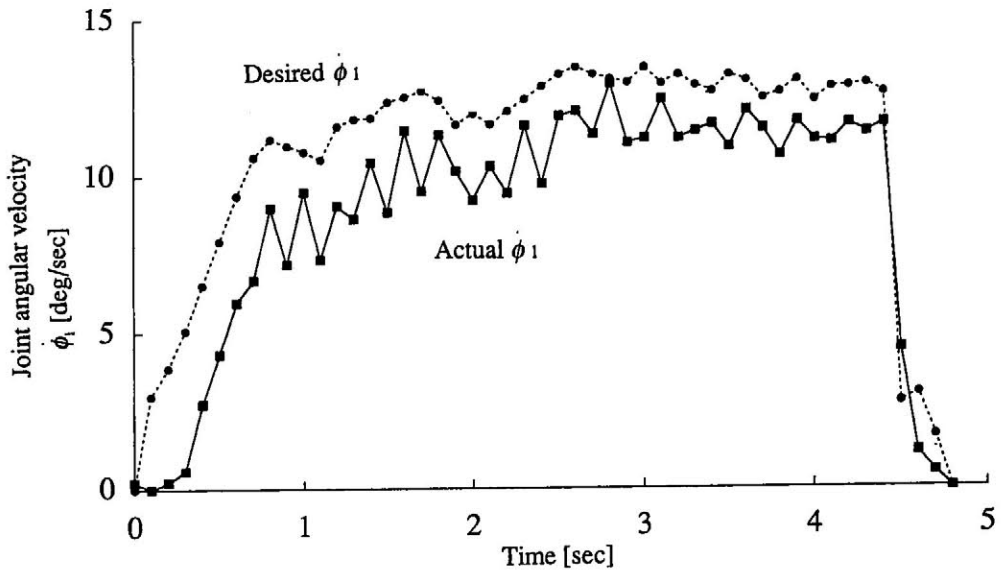


図 5.9 (c) 関節角速度の時間履歴 (位置誤差付き分解速度制御)

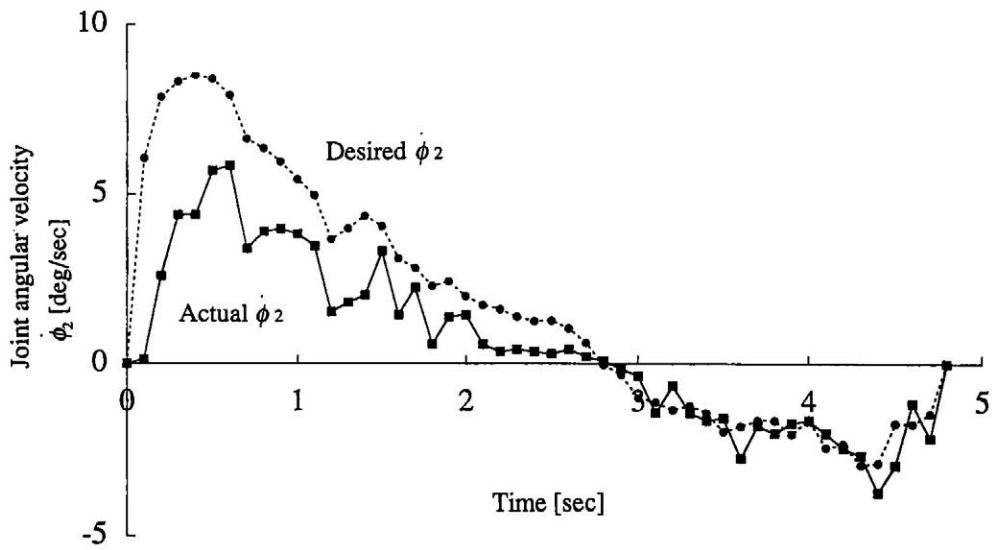


図 5.9 (d) 関節角速度の時間履歴 (位置誤差付き分解速度制御)

第6章

結論

将来、宇宙開発を推進するためには、人間に代わり、または人間を支援して作業を行うロボットが必要不可欠である。宇宙では、すべての物が浮遊し、マニピュレータを駆動すると本体の位置・姿勢が変化するため、地上とは異なった制御法を必要とする。本論文では、宇宙ロボットが母船などと通信を行いながら作業する場合に必要なアンテナとマニピュレータの同時制御法と、未知浮遊物体捕捉後の手先軌道制御に関する2つの制御法を提案した。

本論文の主要な結果を以下に述べる。

2章では、マニピュレータの移動時において通信アンテナの指向方向を確保するために、一般化ヤコビ行列を拡張した「拡張一般化ヤコビ行列」による制御法を提案した。さらに、この手法を用いれば、マニピュレータを駆動した場合でも、アンテナの指向方向の制御が可能であることを明らかにし、計算機シミュレーションでその有効性を確認した。

3章では、エンドエフェクタが未知物体を把持した後の手先軌道制御問題に対して、ヤコビ行列に含まれる物理パラメータに注目し、動力学および運動学方程式の2つのパラメータ推定法を用いることが必要であることを示した。また、この手法を用いることにより、未知浮遊物体を捕捉した場合でも良好な制御性能が得られることを明らかにし、計算機シミュレーションによりその有効性を裏づけた。

4章では、未知物体捕捉後の軌道制御問題において、離散化した運動学関係式に演算時間としてのむだ時間を考慮した離散時間モデルに対して、位置誤差を導入した分解速度制御則と適応制御則を組み合わせる適応制御系を提案した。この制御系によれば、エンドエフェクタの目標軌道への追従性が保証されることを明らかにした。また、従来の方法に比べ、比較的長いサンプリング周期の場合でも非常に良好な制御性能が得られることを、計算機シミュレーションにより裏づけた。

5章では、空気浮上式シミュレータを製作し、適応制御実験により4章で提案した手法の有効性を検証した。その結果、シミュレーションで得られた結果と同様な手先軌道制御性能が得られ、提案した手法の有用性が明らかとなった。

以上より、提案した手法が宇宙ロボットの手先軌道制御において有効な制御手法として期待できることを明らかにした。

謝 辞

本研究を行うにあたり，終始懇切丁寧なご指導とご鞭撻を賜りました九州工業大学情報工学部制御システム工学科 大川不二夫教授に厚く感謝の意を表します。

本論文をまとめるにあたり，有益なご助言，ご討論を賜りました九州工業大学情報工学部制御システム工学科 平城直治教授，安井湘三教授および機械システム工学科 安部憲広教授に厚くお礼申し上げます。

本研究をはじめのきっかけをいただき，また本研究の遂行およびまとめに際して，ご指導，ご助言を賜りました九州工業大学工学部設計生産工学科 加藤了三教授に心よりお礼申し上げます。

また，九州工業大学工学部設計生産工学科 山下忠教授には折りにふれ温かい激励をいただきました。そのご厚意に対し深謝いたします。

実験・データの整理などに関しては，九州工業大学工学部設計生産工学科 稲田智久技官，九州工業大学工学部研究科院生の中塚敬一君，九州工業大学情報工学部研究科院生の小林 順君の協力を得ました。記して感謝の意を表します。

このほか，研究を進めるにあたって，久留米工業大学の高田 勝前学長，電子情報工学科および機械工学科の諸先生をはじめとする多くの方々には，ご指導，ご助言，ときには温かい激励をいただくなど，様々な面で協力を得ることができました。ここに感謝の意を表すとともに，心からお礼申し上げます。

参考文献

- (1) 齊藤, 宇宙開発秘話, (1995), 三田出版会.
- (2) 宇宙におけるロボティクスおよびオートメーション研究フォーラム成果報告書, (1990), 宇宙環境利用推進センター.
- (3) 町田, 宇宙環境とロボット機器, 日本ロボット学会誌, 7-1 (1989), pp.87-92.
- (4) K.Yamada, K.Tsuchiya, S.Tadakawa, Modeling and Control of a Space Manipulator, *Proc. of 13th Int. Symp. on Space Technology and Science*, (1982), pp.993-998.
- (5) R.Longman, R.Lindberg, M.F.Zedd, Satellite-Mounted Robot Manipulators -New Kinematics and Reaction Moment Compensation, *Int. J. of Robotics Research*, 6-3, (1987), pp.87-103.
- (6) 梅谷, 吉田, 一般化ヤコビ行列を用いた宇宙ロボットマニピュレータの分解速度制御, 日本ロボット学会誌, 7-4, (1989), pp.63-73.
- (7) Z.Vafa, S.Dubowsky, Kinematic and Dynamic Models of Manipulators for Use in Space : The Concept of the Virtual Manipulator, *Proc. of 7th World Congress of IFToMM*, (1987), pp.1233-1236.
- (8) 鈴木, 中村, 非ホロノミック宇宙ロボットのスパイラルモーション, 日本ロボット学会誌, 13-7, (1995), pp.1020-1029.
- (9) 岡本, 山口, 木田, 狼, マニピュレータと姿勢の同時制御, 第8回日本ロボット学会学術講演予稿集, (1990), pp.409-412.
- (10) 吉田, 倉爪, 梅谷, 宇宙ロボットの多腕協調制御 (スタビライジング・アームの利用による制御トルクの最適化), 日本ロボット学会誌, 9-6, (1991), pp.718-726.
- (11) 岩田, 戸田, 町田, 双腕飛行ロボットによる浮遊物体捕捉法の検討, 第8回日本ロボット学会学術講演予稿集, (1990), pp.445-448.
- (12) 荒井, 谷江, 館, 宇宙ロボットの外乱補償制御, 日本ロボット学会誌, 10-4, (1991), pp.481-489.
- (13) Y.Murotsu, S.Tsuji, K.Senda, M.Ozaki, Parameter Identification of Unknown Object Handled by Free-Flying Space Robot, *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*, (1992), AUG 10-12.
- (14) 吉田, 湯口, 梅谷, 宇宙ロボットの慣性パラメータ同定実験, 第2回ロボットシンポジウム, (1992), pp.55-60.
- (15) 岩田, 戸田, 町田, 自由飛行型宇宙ロボットの適応制御, 第9回日本ロボッ

- ト学会学術講演会予稿集, (1991), pp.111-114.
- (16) Yangsheng Xu., Heung-Yeung Shum., Ju-Jang Lee., Takeo Kanade., Adaptive Control of Space Robot System with an Attitude Controlled Base, editors, Space Robotics : Dynamics and Control, (1993), pp.229-268, Kluwer Academic Publishers.
- (17) J.Luh, M.Walker, R.Paul, On-line Computational Scheme for Mechanical Manipulators, IEEE Trans. Automatic Control, 25 -3, (1980), pp.468-474.
- (18) Y. Miyazaki, R. Katoh, Simultaneous Control of Manipulator and Antenna Mounted on Free-Flying Robot in Space, *Proc. of IROS'91*, (1991), pp.1659-1662.
- (19) 加藤, 宮崎, 山本, フリーフライングロボットにおける搭載アンテナとマニピュレータの実用的同時制御法, 日本機械学会論文集, 59-565, C (1993), pp.2758-2764.
- (20) Whitney, D.E., The Mathematics of Coordinated Control of Prosthetic Arms and Manipulators, *J. of DSMS Trans.*, (1972), pp.303-309.
- (21) 加藤, 左近, 山本, 未知浮遊物体捕捉後における宇宙用マニピュレータの手先軌道制御に関する一考察, SICE九州支部第11回学術講演会, (1992), pp.207-208.
- (22) 加藤, 左近, 山本, パラメータ推定機能を用いた宇宙用マニピュレータの手先軌道制御, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'93, (1993), pp.831-836.
- (23) R.Katoh, H.Sakon, T.Yamamoto, A Control Method of Space Manipulator mounded on Free-Flying Robot by using Parameter Identification, *ASIA-PACIFIC VIBRATION CONFERENCE '93*, (1993), pp.1205-1209.
- (24) 加藤, 左近, 山本, 大川, 宇宙用マニピュレータのパラメータ同定と手先軌道制御, 日本機械学会論文集, 61-585, C (1995), pp.1974-1980.
- (25) 井上, 大友, 石飛, 岩井, マニピュレータ動特性パラメータの加速度信号を用いない一同定法, 第9回Dynamical System Theory シンポジウム予稿集, (1986), pp.47-50.
- (26) 中溝, 信号解析とシステム同定, (1988), コロナ社.
- (27) T.Yamamoto, J.Kobayashi, R.Katoh, F.Ohkawa, Digital Adaptive Control of a Manipulator mounted on Free-Flying Robot in Space, *IFTToMM'95*, (1995), pp.2151-2155.
- (28) 山本, 小林, 大川, 加藤, 宇宙用マニピュレータのデジタル適応制御, 日本機械学会論文集, 62-593, C (1996), pp.168-174.
- (29) 計測自動制御学会編, 自動制御ハンドブック (基礎編), (1983), pp.719-721, オーム社.
- (30) 加藤, 葉山, 中島, 稲田, 山本, 大川, フリーフライングロボットシミュ

- レータの開発, 日本機械学会九州支部鹿児島地方講演会, (1993), pp.183-184.
- (31) 稲田, 葉山, 加藤, 山本, 大川, 宇宙マニピュレータテストベッド SMART-I:システム構成と性能評価, 九州工業大学研究報告(工学) No.66, (1994), pp.59-65.
- (32) 中塚, 小林, 山本, 加藤, 大川:スペースマニピュレータに対するデジタル適応制御の設計, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '95, (1995), pp.967-970.
- (33) Y. Umetani, K. Yoshida, Experimental Study on Two Dimensional Free-Flying Robot Satellite model, *Proc. of NASA Conf. on Space Telerobotics*, Vol. 5, (1989), pp. 215-224 .
- (34) H. L. Alexandar, R. H. Cannon, Jr., Experiments on the Control of a Satellite Manipulator, *Proc. of 1987 IEEE American Control Conference*, (1987) .
- (35) Y. Murotsu, S.zTsuji, K.Senda, M.Ozaki, Parameter Identification of Unknown Object Handled by Free-Flying Space Robot, *Proc. of AIAA Guidance, Navigation & Control Conf. (AIAA 92-4307)*, (1992) .
- (36) 小松, 植之原, 飯倉, 三浦, 下山, 自立型宇宙ロボット地上実験装置 ASROTの開発, 日本ロボット学会誌, 8-6, (1990), pp.712-720.
- (37) 町田, 戸田, 岩田, 飛行テレロボットの研究-2次元近接オペレーションテストベッド-, 第33回宇宙科学技術連合講演会, (1989), pp.286-287.
- (38) 玉井, 坂本, 下山, 三浦, 浮遊マニピュレータの制御に関する研究, 第8回日本ロボット学会学術講演会, (1990), pp.431-432.
- (39) 小林, 斉藤, 野波, 藤社, 宇宙ロボットの姿勢制御(第2報, フィードフォワード・フィードバック協調制御), 日本機械学会論文集, 60-577, C (1994), pp.3138-3143.
- (40) 泉田, 室津, 三ツ矢, 布原, 山根, 柔軟マニピュレータを持つ宇宙作業ロボットの地上模擬制御実験, 日本ロボット学会誌, 12-6, (1994), pp.899-903.
- (41) 下地, 井上, 土屋, 二宮, 中谷, 川口, 6軸サーボ機構を用いた宇宙ロボット用シュミレータシステム, 日本ロボット学会誌, 8-2, (1990), pp.144-151.
- (42) 渡辺, 岡林, 江尻, 橋間, 永嶋, 立脇, 青木, 丸山, 内山, 宇宙ロボット用テストベッドシステム(ASTRA), 第3回ロボットシンポジウム予稿集, (1993) , pp.215-220.
- (43) 岩田, 村上, 樹神, 短時間微小重力を用いた3次元非ホロノーム運動の実験計画, 第12回ロボット学会学術講演会予稿集, (1994), pp.35-36.

- (44) 吉田, 宇宙ロボットのための研究開発プラットフォーム, 日本ロボット学会誌, 14-1, (1996), pp.18-21.
- (45) D.Akin , R.Howard,Neutral Buoyancy Simulation of Space Telerobotics Operations, SPIE Vol.1612 Cooperative Intelligent Robotics in Space II , (1991),pp414-420.
- (46) 梅谷, 吉田, 藤森, 岡村, 自由浮遊する宇宙用テレロボット・モデルによる対象物の捕捉制御実験, 日本ロボット学会誌, 7-6, (1989), pp.725-731.
- (47) 石田, 小型ロケットの微小重力実験計画について, 第6回宇宙ステーション利用計画ワークショップ予稿集, (1987), pp.195-205 .

付録A 式(2.10)の導出について

式(2.10)の導出を，マニピュレータのリンク数が3の場合について行う。
式(2.9)を時間微分すると次式が得られる。

$$\frac{1}{T} \begin{bmatrix} \dot{A}_X \\ \dot{A}_Y \\ \dot{A}_Z \end{bmatrix} + {}^1\dot{R}_0 {}^0R_A \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + {}^1R_0 {}^0\dot{R}_A \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + {}^1R_0 {}^0R_A \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{T}/T \end{bmatrix} = 0 \quad (A-1)$$

ここで， 1R_0 等の変換行列は以下のように表せる。

$$\begin{aligned} {}^1R_0 &= E^{iR} E^{jP} E^{k1} \\ {}^0R_A &= E^{k\phi_1} E^{j\phi_2} E^{i\phi_3} \\ {}^1R_0 {}^0R_A &= (D^i E^{iR} E^{jP} E^{kY} E^{k\phi} E^{j\phi_2} E^{i\phi_3}) \dot{R} + (E^{iR} D^j E^{jP} E^{kY} E^{k\phi} E^{j\phi_2} E^{i\phi_3}) \dot{P} \\ &\quad + (E^{iR} E^{jP} D^k E^{kY} E^{k\phi} E^{j\phi_2} E^{i\phi_3}) \dot{Y} \end{aligned} \quad (A-2)$$

$$\begin{aligned} {}^1R_0 {}^0\dot{R}_A &= (E^{iR} E^{jP} E^{kY} D^k E^{k\phi} E^{j\phi_2} E^{i\phi_3}) \dot{\phi}_1 + (E^{iR} E^{jP} E^{kY} E^{k\phi} D^j E^{j\phi_2} E^{i\phi_3}) \dot{\phi}_2 \\ &\quad + (E^{iR} E^{jP} E^{kY} E^{k\phi} E^{j\phi_2} D^i E^{i\phi_3}) \dot{\phi}_3 \end{aligned} \quad (A-3)$$

ただし， E^{ab} は a 軸回りに角度 b の回転をした場合の回転行列を表し，特に D^w は w 軸回りに 90° 回転した場合の回転行列（微分演算行列）を表す。

式(A-1)の左辺第2項から第4項のベクトルの x, y 要素は零のため，各項の第3列だけが演算に関与する。式(A-2)と(A-3)の第1項から第3項の () で囲まれた 3×3 行列の第3列を順に $k_1 \sim k_6$ ， ${}^1R_0 {}^0R_A$ の第3列を k_7 と定義すると式(A-1)は，

$$\frac{1}{T} \dot{A} + k_1 \dot{R} + k_2 \dot{P} + k_3 \dot{Y} + \begin{bmatrix} k_4 & k_5 & k_6 \end{bmatrix} \dot{\phi} + \frac{T}{T} k_7 = 0 \quad (A-4)$$

となる。また，式(A-3)の左辺第4項に含まれる \dot{T}/T は，

$$\dot{T}/T = S_1 \dot{A}_X + S_2 \dot{A}_Y + S_3 \dot{A}_Z \quad (A-5)$$

と表すことができる。ただし、

$$S_1 = -(T_X - I A_X) / T^2 \quad , \quad S_2 = -(T_Y - I A_Y) / T^2 \quad , \quad S_3 = -(T_Z - I A_Z) / T^2$$

である。さらに、式(2.3)よりアンテナの先端速度 ${}^i\dot{A}$ (${}^i\dot{A}_X, {}^i\dot{A}_Y, {}^i\dot{A}_Z$) ($= \dot{\mathbf{P}}^A$) は次のように表せる。

$${}^i\dot{A} = \mathbf{G}\dot{\phi}^M + \mathbf{H}\dot{\phi}^A \quad (\text{A-6})$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} \end{bmatrix} \quad , \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} \end{bmatrix}$$

ここで k_i ($i = 8, \dots, 13$) を

$$(S_1 G_{11} + S_2 G_{21} + S_3 G_{31}) k_7 = k_8$$

$$(S_1 G_{12} + S_2 G_{22} + S_3 G_{32}) k_7 = k_9$$

$$(S_1 G_{13} + S_2 G_{23} + S_3 G_{33}) k_7 = k_{10}$$

$$(S_1 H_{11} + S_2 H_{21} + S_3 H_{31}) k_7 = k_{11}$$

$$(S_1 H_{12} + S_2 H_{22} + S_3 H_{32}) k_7 = k_{12}$$

$$(S_1 H_{13} + S_2 H_{23} + S_3 H_{33}) k_7 = k_{13}$$

と定義すると、式(A-4)の第6項は次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \frac{\dot{T}}{T} k_7 &= S_1 k_7 \dot{A}_X + S_2 k_7 \dot{A}_Y + S_3 k_7 \dot{A}_Z \\ &= [k_8 \quad k_9 \quad k_{10}] \dot{\phi}^M + [k_{11} \quad k_{12} \quad k_{13}] \dot{\phi}^A \end{aligned} \quad (\text{A-7})$$

また、同様に式(A-4)の第1項は次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} {}^i\dot{A} &= \frac{1}{T} \mathbf{G} \dot{\phi}^M + \frac{1}{T} \mathbf{H} \dot{\phi}^A \\ &= [k_{14} \quad k_{15} \quad k_{16}] \dot{\phi}^M + [k_{17} \quad k_{18} \quad k_{19}] \dot{\phi}^A \end{aligned} \quad (\text{A-8})$$

式(A-7)と式(A-8)を式(A-4)に代入し，整理すると，

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} k_1 & k_2 & k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{R} \\ \dot{P} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_4+k_{11}+k_{17} & k_5+k_{12}+k_{18} & k_6+k_{13}+k_{19} \end{bmatrix} \dot{\phi}^A \\ & + \begin{bmatrix} k_8+k_{14} & k_9+k_{15} & k_{10}+k_{16} \end{bmatrix} \dot{\phi}^M = 0 \end{aligned}$$

となる．ここで，

$$A = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 & k_3 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} k_4+k_{11}+k_{17} & k_5+k_{12}+k_{18} & k_6+k_{13}+k_{19} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} k_8+k_{14} & k_9+k_{15} & k_{10}+k_{16} \end{bmatrix}$$

と定義すると，式(2.10)となる．

以上は，マニピュレータのリンクの数が3の場合について示したが，一般の場合も同様の演算により式(2.10)が得られる．

付録B パラメータ σ の誘導法について

図3.2の2次元平面モデルの場合，式(3.2)の $H(\phi)$ と $h(\phi, \dot{\phi})$ は以下のように表現される。

$$H(\phi) = \begin{bmatrix} J_0+J_1+J_2+2(C_{01}+C_{02}+C_{12}) & J_1+J_2+C_{01}+C_{02}+2C_{12} & J_2+C_{02}+C_{12} \\ J_1+J_2+C_{01}+C_{02}+2C_{12} & J_1+J_2+2C_{12} & J_2+C_{12} \\ J_2+C_{02}+C_{12} & J_2+C_{12} & J_2 \end{bmatrix}$$

$$h(\phi, \dot{\phi}) = \begin{bmatrix} (2\dot{\phi}_0\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_1^2)S_{01} + (\dot{\phi}_1^2 + \dot{\phi}_2^2 + 2\dot{\phi}_0\dot{\phi}_1 + 2\dot{\phi}_1\dot{\phi}_2 + 2\dot{\phi}_0\dot{\phi}_2)S_{02} + (\dot{\phi}_2^2 + 2\dot{\phi}_1\dot{\phi}_2 + 2\dot{\phi}_0\dot{\phi}_2)S_{12} \\ -\dot{\phi}_0^2S_{01} - \dot{\phi}_0^2S_{02} + (\dot{\phi}_2^2 + 2\dot{\phi}_1\dot{\phi}_2 + 2\dot{\phi}_0\dot{\phi}_2)S_{12} + D_1\dot{\phi}_1 \\ -\dot{\phi}_0^2S_{02} - (\dot{\phi}_0 + \dot{\phi}_1)^2S_{12} + D_2\dot{\phi}_2 \end{bmatrix}$$

ただし，

$$\begin{aligned} J_0 &= I_0 + M_0 b_0^2 \\ J_1 &= I_1 + M_0 a_1^2 + M_2 b_1^2 + 2M_1 a_1 b_1 \\ J_2 &= I_2 + M_2 a_2^2 \\ M_0 &= m_0(m_1 + m_2)/M \\ M_1 &= m_0 m_2 / M \\ M_2 &= (m_0 + m_1)m_2 / M \\ C_{01} &= (M_0 b_0 a_1 + M_1 b_0 b_1) \cos \phi_1 \\ C_{12} &= (M_1 a_1 a_2 + M_2 b_1 a_2) \cos \phi_2 \\ C_{02} &= M_1 b_0 a_2 \cos(\phi_1 + \phi_2) \\ S_{01} &= -(M_0 b_0 a_1 + M_1 b_0 b_1) \sin \phi_1 \\ S_{12} &= -(M_1 a_1 a_2 + M_2 b_1 a_2) \sin \phi_2 \\ S_{02} &= -M_1 b_0 a_2 \sin(\phi_1 + \phi_2) \end{aligned}$$

であり， D_1 と D_2 はそれぞれ関節1および2の粘性摩擦係数である。

未知パラメータ σ を

$$\begin{aligned}
 \sigma_1 &= J_0 + J_1 + J_2 \\
 \sigma_2 &= J_1 + J_2 \\
 \sigma_3 &= J_2 \\
 \sigma_4 &= M_0 b_0 a_1 + M_1 b_0 b_1 \\
 \sigma_5 &= M_1 a_1 a_2 + M_2 b_1 a_2 \\
 \sigma_6 &= M_1 b_0 a_2 \\
 \sigma_7 &= D_1 \\
 \sigma_8 &= D_2
 \end{aligned} \tag{B-1}$$

と選ぶと、 $H(\phi)$ と $h(\phi, \phi)$ はそれぞれ次式に書き換えることができる。

$H(\phi) =$

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} \sigma_1 + 2(\sigma_4 \cos \phi_1 + \sigma_5 \cos \phi_2 + \sigma_6 \cos(\phi_1 + \phi_2)) \\ \sigma_2 + \sigma_4 \cos \phi_1 + 2\sigma_5 \cos \phi_2 + \sigma_6 \cos(\phi_1 + \phi_2) \\ \sigma_3 + \sigma_5 \cos \phi_2 + \sigma_6 \cos(\phi_1 + \phi_2) \end{bmatrix} \\
 & \begin{bmatrix} \sigma_2 + \sigma_4 \cos \phi_1 + 2\sigma_5 \cos \phi_2 + \sigma_6 \cos(\phi_1 + \phi_2) \\ \sigma_2 + 2\sigma_5 \cos \phi_2 \\ \sigma_3 + \sigma_5 \cos \phi_2 \end{bmatrix} \\
 & \begin{bmatrix} \sigma_3 + \sigma_5 \cos \phi_2 + \sigma_6 \cos(\phi_1 + \phi_2) \\ \sigma_3 + \sigma_5 \cos \phi_2 \\ \sigma_3 \end{bmatrix} \\
 & = \sigma_1 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \sigma_2 \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \sigma_3 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\
 & + \sigma_4 \begin{bmatrix} 2\cos \phi_1 & \cos \phi_1 & 0 \\ \cos \phi_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \sigma_5 \begin{bmatrix} 2\cos \phi_2 & 2\cos \phi_2 & \cos \phi_2 \\ 2\cos \phi_1 & 2\cos \phi_2 & \cos \phi_2 \\ \cos \phi_2 & \cos \phi_2 & 0 \end{bmatrix} \\
 & \tag{B-2}
 \end{aligned}$$

$$+ \sigma_6 \begin{bmatrix} 2\cos(\phi_1+\phi_2) & \cos(\phi_1+\phi_2) & \cos(\phi_1+\phi_2) \\ \cos(\phi_1+\phi_2) & 0 & 0 \\ \cos(\phi_1+\phi_2) & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$+ \sigma_7 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \sigma_8 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$h(\phi, \dot{\phi}) =$$

$$\begin{bmatrix} -\sigma_4(2\dot{\phi}_0\dot{\phi}_1+\dot{\phi}_1^2)\sin\phi_1 - \sigma_5(\dot{\phi}_2^2+2\dot{\phi}_1\dot{\phi}_2+2\dot{\phi}_0\dot{\phi}_2)\sin\phi_2 - \sigma_6(\dot{\phi}_1^2+\dot{\phi}_2^2+2\dot{\phi}_0\dot{\phi}_1+2\dot{\phi}_1\dot{\phi}_2+2\dot{\phi}_0\dot{\phi}_2)\sin(\phi_1+\phi_2) \\ \sigma_4\dot{\phi}_0^2\sin\phi_1 - \sigma_5(\dot{\phi}_2^2+2\dot{\phi}_1\dot{\phi}_2+2\dot{\phi}_0\dot{\phi}_2)\sin\phi_2 + \sigma_6\dot{\phi}_0^2\sin(\phi_1+\phi_2) + \sigma_7\dot{\phi}_1 \\ \sigma_5(\dot{\phi}_0+\dot{\phi}_1)^2\sin\phi_2 + \sigma_6\dot{\phi}_0^2\sin(\phi_1+\phi_2) + \sigma_8\dot{\phi}_2 \end{bmatrix}$$

$$= \sigma_1 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \sigma_2 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \sigma_3 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \sigma_4 \begin{bmatrix} -(2\dot{\phi}_0\dot{\phi}_1+\dot{\phi}_1^2)\sin\phi_1 \\ \dot{\phi}_0^2\sin\phi_1 \\ 0 \end{bmatrix} + \sigma_5 \begin{bmatrix} -(\dot{\phi}_2^2+2\dot{\phi}_1\dot{\phi}_2+2\dot{\phi}_0\dot{\phi}_2)\sin\phi_2 \\ -(\dot{\phi}_2^2+2\dot{\phi}_1\dot{\phi}_2+2\dot{\phi}_0\dot{\phi}_2)\sin\phi_2 \\ (\dot{\phi}_0+\dot{\phi}_1)^2\sin\phi_2 \end{bmatrix}$$

$$+ \sigma_6 \begin{bmatrix} -(\dot{\phi}_1^2+\dot{\phi}_2^2+2\dot{\phi}_0\dot{\phi}_1+2\dot{\phi}_1\dot{\phi}_2+2\dot{\phi}_0\dot{\phi}_2)\sin(\phi_1+\phi_2) \\ \dot{\phi}_0^2\sin(\phi_1+\phi_2) \\ \dot{\phi}_0^2\sin(\phi_1+\phi_2) \end{bmatrix} + \sigma_7 \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\phi}_1 \\ 0 \end{bmatrix} + \sigma_8 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\phi}_2 \end{bmatrix} \quad (\text{B-3})$$

したがって、式(B-2)と式(B-3)は式(3.3)の表現となる。なお、n次元モデルに対しても同様な誘導が可能である。