世界知的所有権機関
国際事務局

PCT

特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(51) 国際特許分類 5 B25J 13/00	A1	(11) 国際公開番号	WO 93/25355
		(43) 国際公開日	1993年12月23日 (23.12.1993)

(21) 国際出願番号 PCT/JP93/00751
(22) 国際出願日 1993年6月3日(03. 06. 93)

(30) 優先権データ
特願平4/145981 1992年6月5日(05. 06. 92) JP
特願平4/145982 1992年6月5日(05. 06. 92) JP

(71) 出願人(米国を除くすべての指定国について)
富士通株式会社(FUJITSU LIMITED)〔JP/JP〕
〒211 神奈川県川崎市中原区上小田中1015番地 Kanagawa, (JP)
(72) 発明者；および
(75) 発明者/出願人(米国についてのみ)
佐藤裕一(SATO, Yuichi)〔JP/JP〕
平田光徳(HIRATA, Mitsunori)〔JP/JP〕
丸山次人(MARUYAMA, Tsugito)〔JP/JP〕
内山 隆(UCHIYAMA, Takashi)〔JP/JP〕
永嶋史朗(NAGASHIMA, Fumio)〔JP/JP〕
〒211 神奈川県川崎市中原区上小田中1015番地
富士通株式会社内 Kanagawa, (JP)
(74) 代理人
弁理士 真田 有(SANADA, Tamotsu)
〒180 東京都武蔵野市吉祥寺本町二丁目35番10号 清水ビル4階
Tokyo, (JP)

(81) 指定国
JP, US.

添付公開書類 国際調査報告書

(54) Title : SIMULATION METHOD FOR MANIPULATOR AND APPARATUS THEREFOR, SIMULATION AND CONTROL METHOD FOR MANIPULATOR AND APPARATUS THEREFOR, AND CONTROL METHOD FOR MANIPULATOR AND APPARATUS THEREFOR

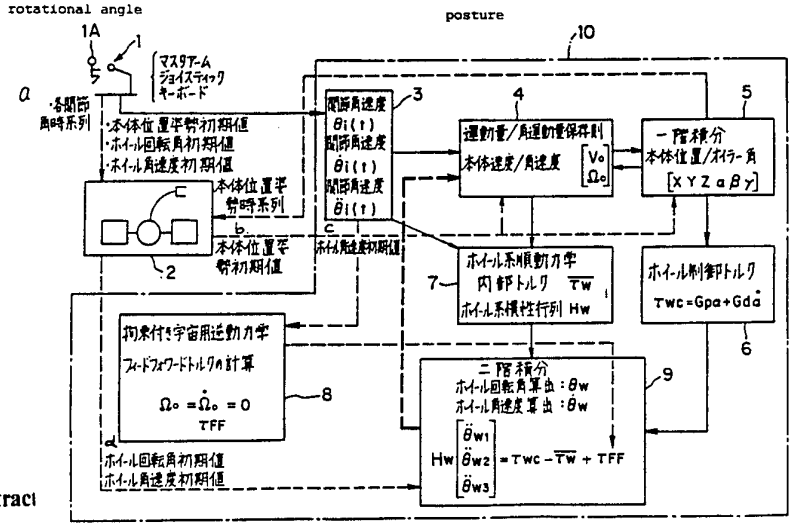
(54) 発明の名称 マニピュレータ装置のためのシミュレーション方法及びその装置，マニピュレータ装置のためのシミュレーション及び制御方法並びにその装置，マニピュレータ装置のための制御方法及びその装置

a: ... angular time series of each joint
• initial values of manipulator position and posture
• initial value of wheel angular rotational angle

b: ... initial values of manipulator position and posture
• initial value of wheel angular velocity
time series of manipulator position and posture

c: ... initial value of wheel angular velocity

1 ... master arm, joy stick, and keyboard
3 ... joint angular velocity
4 ... momentum/conservation of angular momentum
manipulator speed/angular velocity
5 ... integration of first order
manipulator position/oiler angle
6 ... wheel control torque
7 ... normal dynamics of wheel system
inner torque
wheel system inertial matrix
8 ... limited reverse dynamics for space
calculation of feed forward torque
9 ... integration of second order
calculation of wheel rotational angle
calculation of wheel angular velocity
d ... initial value of wheel rotational angle
initial value of wheel angular velocity



(57) Abstract

By the application of the total system momentum/conservation of angular momentum, reverse dynamics, and wheel system forward dynamics, the three-dimensional dynamics for the entire manipulator are calculated in real-time. The simulated movement of the manipulator is displayed on a display (2) to make it controllable.

(57) 要約

マニピュレータ装置のためのシミュレーションあるいは制御方法及びその装置に関し、マニピュレータ装置全体に対する3次元ダイナミクスを、全系運動量／角運動量保存則，逆動力学，ホイール系順動力学を用いて、リアルタイムに演算することにより、マニピュレータ装置の動きをディスプレイ（2）にてシミュレート表示し、制御できるようにする。

情報としての用途のみ
PCTに基づいて公開される国際出願のパンフレット第1頁にPCT加盟国を同定するために使用されるコード

AT オーストリア
AU オーストラリア
BB バルバードス
BE ベルギー
BF ブルキナ・ファソ
BG ブルガリア
BJ ベナン
BR ブラジル
BY ベラルーシ
CA カナダ
CF 中央アフリカ共和国
CG コンゴー
CH スイス
CI コート・ジボアール
CM カメルーン
CS チェッコスロヴァキア
CZ チェッコ共和国
DE ドイツ
DK デンマーク
FI フィンランド
ES スペイン
FR フランス
GA ガボン
GB イギリス
GN ギニア
GR ギリシャ
HU ハンガリー
IE アイルランド
IT イタリー
JP 日本
KP 朝鮮民主主義人民共和国
KR 大韓民国
KZ カザフスタン
LI リヒテンシュタイン
LK スリランカ
LU ルクセンブルグ
MC モナコ
MG マダガスカル
ML マリ
MN モンゴル
MR モーリタニア
MW マラウイ
NE ニジェール
NL オランダ
NO ノルウェー
NZ ニュー・ジーランド
PL ポーランド
PT ポルトガル
RO ルーマニア
RU ロシア連邦
SD スーダン
SE スウェーデン
SK スロヴァキア共和国
SN セネガル
SU ソヴィエト連邦
TD チャード
TG トーゴ
UA ウクライナ
US 米国
VN ヴェトナム

明 細 書

マニピュレータ装置のためのシミュレーション方法及びその装置，マニピュレータ装置のためのシミュレーション及び制御方法並びにその装置，マニピュレータ装置のための制御方法及びその装置

技術分野

本発明は、地球周回軌道上や宇宙空間で作業するためのマニピュレータを有する人工衛星や宇宙ロボット等の宇宙機あるいは海底，地下道，トンネル内で作業するためのマニピュレータを有する極限ロボット等のマニピュレータ装置について、そのシミュレーションを行なうための方法及び装置，あるいはそのシミュレーション及び制御を行なうための方法並びに装置、更にその制御を行なうための方法及び装置に関する。

宇宙ステーションやプラットフォームなど宇宙インフラストラクチャの構築・運用で予想される様々な軌道上作業を安全かつ効率よく行なう目的で、宇宙飛行士による船外活動をマニピュレータを有する宇宙機（宇宙ロボット，人工衛星等）に代行させる研究が活発に進められている。

この場合、オンボードソフトウェア（ＯＢＳ）の開発過程におけるエミュレーション装置や宇宙機の運用過程におけるオペレータ支援装置なるものがあれば、好都合である。

また、海底，地下道，トンネル内のようにオペレータとマニピュレータ間に力学的隔たりのあるマニピュレータをプログラム操作、遠隔操作する場合においても同様である。

背景技術

従来、例えば、人工衛星の姿勢制御系に関する設計解析やシミュレーションを行なう最も一般的な手法としては、コンピュータ上に人工衛星の力学モデルを構築し、オフライン的に計算する方法がある。かかるオフラインシミュレーションでは、入力データの用意，ダイナミクス計算，出力データの表示（描画表示、時系列グラフ表示）という過程を踏んでシミュレーションが進む。そして、この場合、このオフラインシミュレーションでは、上記過程を一つ一つ区切って行なっている。

さらに、従来の宇宙ロボット，人工衛星等では、マニピュレータのような大きな姿勢外乱源がなかったため、当然ながら、姿勢制御系とマニピュレータ制御系との協調制御系といったものも開発されていなかった。そのため、宇宙ロボット，人工衛星等の本体の姿勢制御系では、ロール、ピッチ、ヨーの各軸毎に分離された制御系のみが設計され、適用されていた。

例えば、スペースシャトルにマニピュレータを搭載した場合、マニピュレータからスペースシャトルの姿勢制御系にもたらされる外乱を抑えるような特別な方式は採用されておらず、マニピュレータの駆動に伴う宇宙機の姿勢変動は無視されていた。

しかしながら、このような従来のマニピュレータを有する宇宙機では、マニピュレータによる外乱を制御する手段を有しない宇宙機で、マニピュレータを操作した場合は、マニピュレータが駆動する度に発生する姿勢外乱の制御を考慮することができず、宇宙機本体の姿勢変動を調整できないという課題がある。

さらに、宇宙機を開発し、運用していく上では、開発過程におけるエミュレーション装置（宇宙機のダイナミクスを模擬する）および運用過程におけるオペレータ支援装置（宇宙機のマニピュレータを安全かつ効率よく駆動させるためのもの）が必要不可欠であるが、従来のオフライ

ンシミュレータをエミュレーション装置やオペレータ支援装置に適用するには、以下の点で課題がある。

まず、オフラインシミュレータには、エミュレーション装置やオペレータ支援装置で必要となるリアルタイム性がない。即ち、ステップＣＡ１で、入力データの用意を行ない、ステップＣＡ２で、ダイナミクス計算を行ない、ステップＣＡ３で、出力データの表示（描画表示、時系列グラフ表示）を行なうという３つの過程（ＦＩＧ．５６参照）を逐次的に繰り返すことが出来ない。

また、オフラインシミュレータでは、計算結果をグラフィックスや時系列グラフにリアルタイムに表示させることができず、開発過程の効率化やオペレータの支援能力を大きく損ねるという課題もある。

また、上記のような、オペレータとマニピュレータ間に空間的隔たりのあるようなシステム中においては、オペレータはマニピュレータを直接、間近に見ながら作業することは困難である。そのため、オペレータはマニピュレータに対して、過大な位置動作指令や力指令を発する場合があり、マニピュレータやマニピュレータを取りつけている本体に損傷をもたらすおそれがある。

さらに、例えば極限ロボットのように、オペレータとマニピュレータ間に力学的隔たりのあるようなシステム中においては、オペレータは、オペレータ自身が持つ生体的感覚のみに基づいて作業していると、過大な位置動作指令や力指令を発する場合があり、マニピュレータやマニピュレータを取りつけている本体に損傷をもたらすおそれがある。

従来は、このようなマニピュレータやマニピュレータを取りつけている本体に損傷をもたらすおそれに対しては、もっぱらオペレータの操作要領に関する学習効果や慣れに基づいたオペレータ側の微妙操作技術に頼っていた。

したがって、オペレータによるマニピュレータの操作性を向上させて、マニピュレータを取りつけている本体を損傷させるおそれをなくすという課題がある。

本発明は、上述の課題に鑑み創案されたもので、マニピュレータ付き宇宙機や極限ロボット等のマニピュレータ装置に対する3次元ダイナミクスをリアルタイムに計算し、その計算結果をディスプレイ上にリアルタイムに出力できるようにした、マニピュレータ装置のためのシミュレーション方法及びその装置を提供することを第1の目的とする。

さらに、本発明は、マニピュレータの駆動により、マニピュレータからマニピュレータを支持するマニピュレータ本体の制御系にもたらされる外乱を押さえ込むことができ、マニピュレータ装置の制御性能を高度に保つことが可能なマニピュレータ装置のための制御方法及びその装置を提供する一方で、マニピュレータ装置に対する3次元ダイナミクスをリアルタイムに計算し、その計算結果をディスプレイ上にリアルタイムに出力できるようにし、且つ、マニピュレータの駆動により、マニピュレータからマニピュレータを支持するマニピュレータ本体の制御系にもたらされる外乱を押さえ込むことができ、マニピュレータ装置の制御性能を高度に保つことが可能なマニピュレータ装置のためのシミュレーション及び制御装置を提供することを第2の目的とする。

また、本発明は、オペレータとマニピュレータ間の空間的隔たりや力学的隔たりのあるマニピュレータをプログラム操作、遠隔操作する場合に、作業を安全且つ効率良く行なうことができるマニピュレータ装置のためのシミュレーション方法及びその装置，マニピュレータ装置のためのシミュレーション及び制御方法並びにその装置，マニピュレータ装置のための制御方法及びその装置を提供することを第3の目的とする。

発明の開示

このため、請求の範囲第１項記載の本発明のマニピュレータ装置のためのシミュレーション方法は、上記の第１の目的を達成するため、マニピュレータと該マニピュレータを支持するマニピュレータ本体とをそなえるとともにホイールの回転によって姿勢制御が可能なマニピュレータ装置について、該マニピュレータの関節角度，関節角速度，関節角加速度の情報を入力し、これらの情報に基づいて、姿勢制御系を包含したマニピュレータ装置全体に対する３次元ダイナミクスを、全系運動量／角運動量保存則，逆動力学，ホイール系順動力学を用いて、リアルタイムに演算することにより、ディスプレイにて該マニピュレータ装置の動きをシミュレート表示することを特徴としている。

従って、マニピュレータ付きマニピュレータ装置に対する３次元ダイナミクスをリアルタイムに計算し、その計算結果をグラフィックディスプレイ上にリアルタイムに出力できる利点がある。

さらに、請求の範囲第２項記載の本発明のマニピュレータ装置のためのシミュレーション装置は、上述の第１の目的を達成するため、マニピュレータと該マニピュレータを支持するマニピュレータ本体とをそなえるとともにホイールの回転によって姿勢制御が可能なマニピュレータ装置について、該マニピュレータの関節角度，関節角速度，関節角加速度の情報を入力するマニピュレータ関節情報入力部と、該マニピュレータ装置の動きをシミュレート表示するディスプレイとをそなえるとともに、該マニピュレータ関節情報入力部からの情報を受けて、姿勢制御系を包含したマニピュレータ装置全体に対する３次元ダイナミクスを、全系運動量／角運動量保存則，逆動力学，ホイール系順動力学を用いて、リアルタイムに演算することにより、該ディスプレイにて該マニピュレータ装置の動きをシミュレート表示させるための３次元ダイナミクスリアル

タイムシミュレート部をそなえて構成されたことを特徴としている。

また、請求の範囲第3項記載の本発明は、該3次元ダイナミクスリアルタイムシミュレート部が、該マニピュレータ装置の位置姿勢情報，ホイール角速度情報，該マニピュレータ関節情報入力部からのマニピュレータ関節角，関節角速度情報を入力として、全系運動量／角運動量保存則を用いることにより、該マニピュレータ装置の速度，角速度情報を演算するマニピュレータ装置速度・角速度演算部と、ある2時刻における該マニピュレータ装置の位置情報と該マニピュレータ装置速度・角速度演算部で得られた速度，角速度情報とを入力として、一階積分を施すことにより、次の時刻における該マニピュレータ装置の位置情報を該ディスプレイへ出力するマニピュレータ装置位置情報演算部と、該マニピュレータ装置位置情報演算部からのマニピュレータ装置位置情報を受けてホイールフィードバック制御トルクを演算するホイールフィードバック制御トルク演算部と、該マニピュレータ関節角，関節角速度情報を入力とし、ホイール系順動力学を用いて、内部トルク，ホイール系慣性情報を演算する内部トルク・ホイール系慣性情報演算部と、該マニピュレータ関節角，関節角速度情報を入力とし、拘束付き逆動力学を用いて、ホイールフィードフォワードトルクを演算するホイールフィードフォワードトルク演算部と、2時刻におけるホイール回転角，ホイール角速度情報，フィードバック制御トルク情報，内部トルク情報，ホイール系慣性情報，フィードフォワードトルク情報を入力とし、次の時刻におけるホイール回転角，ホイール角速度情報を出力するホイールダイナミクス積分部とをそなえて構成されたことを特徴としている。

また、請求の範囲第4項記載の本発明は、請求の範囲第3項記載の本発明において、該ホイールダイナミクス積分部が、一階積分部として構成されることにより、系全体の運動方程式を数値的に解くに際し、ホイ

ールの回転対称性から、該ホイールに対して、一階の数値積分で済ませ、該ホイールの回転角情報を陽に求めないことを特徴としている。

さらに、請求の範囲第５項記載の本発明は、該ホイールダイナミクス積分部が、二階積分部として構成されることにより、一階積分演算によってホイール角速度情報を求め、更に二階積分演算によってホイール回転角情報を求めることを特徴としている。

また、請求の範囲第６項記載の本発明は、請求の範囲第５項記載の本発明において、系全体の運動方程式を数値的に解くに際し、ホイールの回転対称性から、該ホイールに対する一階の数値積分と二階の数値積分の刻み幅を変え、二階数値積分を一階数値積分より粗計算で処理することを特徴としている。

さらに、請求の範囲第７項記載の本発明は、請求の範囲第５項記載の本発明において、系全体の運動方程式を数値的に解くに際し、ホイールの回転対称性から、該ホイールに対する一階の数値積分と二階の数値積分の積分次数を変え、二階数値積分を一階数値積分より粗計算で処理することを特徴としている。

また、請求の範囲第８項記載の本発明は、請求の範囲第５項記載の本発明において、系全体の運動方程式を数値的に解くに際し、ホイールの回転対称性から、該ホイールに対する一階の数値積分と二階の数値積分の刻み幅および積分次数を変え、二階数値積分を一階数値積分より粗計算で処理することを特徴としている。

さらに、請求の範囲第９項記載の本発明は、請求の範囲第３項記載の本発明において、該ホイールの回転角を高速・高精度に求めるべく、すべてのホイールの慣性モーメントを比例倍することを特徴としている。

また、請求の範囲第１０項記載の本発明は、ホイールの回転を該ディスプレイに表示するに際して、表示する直前でホイールの角速度を比例

倍した形で表示することを特徴としている。

従って、マニピュレータと該マニピュレータを支持するマニピュレータ本体とをそなえるとともにホイールの回転によって姿勢制御が可能なマニピュレータ装置について、該マニピュレータの関節角度，関節角速度，関節角加速度の情報を入力し、これらの情報に基づいて、姿勢制御系を包含したマニピュレータ装置全体に対する3次元ダイナミクスを、全系運動量／角運動量保存則，逆動力学，ホイール系順動力学を用いて、リアルタイムに演算することにより、ディスプレイにて該マニピュレータ装置の動きをシミュレート表示することができ、これにより、制御系を包含したマニピュレータ装置全体に対する3次元ダイナミクスをリアルタイムに計算し、その計算結果をディスプレイ上にリアルタイムに出力できる利点がある。

また、系全体の運動方程式を高速・高精度に解くことができ、これによりマニピュレータ装置全体に対する3次元ダイナミクスのリアルタイム計算を容易に実現できる利点もある。

また、請求の範囲第11項記載の本発明のマニピュレータ装置のためのシミュレーション及び制御方法は、上述の第2の目的を達成するため、マニピュレータと該マニピュレータを支持するマニピュレータ本体とをそなえるとともにホイールの回転によって姿勢制御が可能なマニピュレータ装置について、該マニピュレータの関節角度，関節角速度，関節角加速度の情報を入力し、これらの情報に基づいて、姿勢制御系を包含したマニピュレータ装置全体に対する3次元ダイナミクスを、全系運動量／角運動量保存則，逆動力学，ホイール系順動力学を用いて、リアルタイムに演算することにより、ディスプレイにて該マニピュレータ装置の動きをシミュレート表示するとともに、該マニピュレータ装置の姿勢を該ホイールを用いて制御するための姿勢制御系と、該マニピュレータの

関節角度，関節角速度，関節角加速度の情報を入力して、該マニピュレータを制御するマニピュレータ制御系と、該マニピュレータ制御系からの情報に基づき該マニピュレータからもたらされる外乱を所要のアルゴリズムを用いることにより算出して該姿勢制御系へフィードフォーワード信号として供給する協調制御系とをそなえることにより、該協調制御系で、該マニピュレータからもたらされる外乱を補償するために、該姿勢制御系のホイール制御系に渡すフィードフォワード量として、角運動量若しくはそれをホイールの質量で割ったホイール角速度又はトルクを取り、その値をホイールの目標角運動量若しくは目標角速度を運動量／角運動量保存則又は宇宙用逆動力学から求めて、該ホイールを制御することを特徴としている。

さらに、請求の範囲第１２項記載の本発明は、請求の範囲第１１項記載の本発明において、該運動量／角運動量保存則の適用に当たって、該マニピュレータ本体の角速度に対し、該マニピュレータ本体の角速度が０という制約条件を課すことを特徴としている。

また、請求の範囲第１３項記載の本発明は、請求の範囲第１１項記載の本発明において、該運動量／角運動量保存則の適用に当たって、該マニピュレータ本体の角速度に対し、該マニピュレータ本体の角速度が定数という制約条件を課すことを特徴としている。

さらに、請求の範囲第１４項記載の本発明は、請求の範囲第１１項記載の本発明において、該運動量／角運動量保存則の適用に当たって、該マニピュレータ本体の角速度に対し、該マニピュレータ本体の角速度が時間の任意関数という制約条件を課すことを特徴としている。

また、請求の範囲第１５項記載の本発明は、請求の範囲第１１項記載の本発明において、該宇宙用逆動力学の適用に当たって、該マニピュレータ本体の角加速度に対し、該マニピュレータ本体の角加速度が０とい

う制約条件を課すことを特徴としている。

さらに、請求の範囲第１６項記載の本発明は、請求の範囲第１１項記載の本発明において、該宇宙用逆動力学の適用に当たって、該マニピュレータ本体の角速度、角加速度に対し、該マニピュレータ本体の角速度、角加速度がそれぞれ０という制約条件を課すことを特徴としている。

また、請求の範囲第１７項記載の本発明は、該宇宙用逆動力学の適用に当たって、該マニピュレータ本体の角速度、角加速度に対し、該マニピュレータ本体の角速度が定数で、該マニピュレータ本体の角加速度が０という制約条件を課すことを特徴としている。

さらに、請求の範囲第１８項記載の本発明は、請求の範囲第１１項記載の本発明において、該宇宙用逆動力学の適用に当たって、該マニピュレータ本体の角加速度に対し、該マニピュレータ本体の角加速度が時間の任意関数という制約条件を課すことを特徴としている。

また、請求の範囲第１９項記載の本発明は、該宇宙用逆動力学の適用に当たって、該マニピュレータ本体の角速度、角加速度に対し、該マニピュレータ本体の角速度、角加速度がそれぞれ時間の任意関数という制約条件を課すことを特徴としている。

さらに、請求の範囲第２０項記載の本発明は、請求の範囲第１１項記載の本発明において、系全体の自由度を該マニピュレータの関節数Ｌと該マニピュレータ本体の位置・姿勢６自由度の合計Ｌ＋６自由度にしたことを特徴としている。

また、請求の範囲第２１項記載の本発明は、請求の範囲第１１項記載の本発明において、該姿勢制御系が、該マニピュレータからもたらされる外乱を補償するために、該マニピュレータ装置の姿勢角およびその微分によるＰＤフィードバック制御を行なうことを特徴としている。

さらに、請求の範囲第２２項記載の本発明は、該姿勢制御系が、該マ

ニピュレータからもたらされる外乱を補償するために、該マニピュレータ装置の姿勢角、その積分、および姿勢角の微分によるＰＩＤフィードバック制御を行なうことを特徴としている。

従って、マニピュレータ装置全体に対する３次元ダイナミクスをリアルタイムに計算し、その計算結果をグラフィックディスプレイ上にリアルタイムに出力できる一方で、マニピュレータの駆動によるマニピュレータ本体の制御系にもたらす外乱を抑制し、マニピュレータ装置の制御性能を高度に保つことができる利点がある。

また、請求の範囲第２３項記載のマニピュータ装置のためのシミュレーション及び制御装置は、上述の第２の目的を達成するため、マニピュレータとマニピュレータを支持するマニピュレータ本体とをそなえるとともにホイールの回転によって姿勢制御が可能なマニピュレータ装置について、マニピュレータの関節角度，関節角速度，関節角加速度の情報を入力するマニピュレータ関節情報入力部と、マニピュレータ装置の動きをシミュレート表示するディスプレイと、マニピュレータ関節情報入力部からの情報を受けて、姿勢制御系を包含したマニピュレータ装置全体に対する３次元ダイナミクスを、全系運動量／角運動量保存則，逆動力学，ホイール系順動力学を用いて、リアルタイムに演算することにより、ディスプレイにてマニピュレータ装置の動きをシミュレート表示させるための３次元ダイナミクスリアルタイムシミュレート部とをそなえるとともに、マニピュレータ装置の姿勢をホイールを用いて制御するための姿勢制御系と、マニピュレータの関節角度，関節角速度，関節角加速度の情報を入力して、マニピュレータを制御するマニピュレータ制御系と、マニピュレータ制御系からの情報に基づきマニピュレータからもたらされる外乱を所要のアルゴリズムを用いることにより算出して姿勢制御系へフィードフォーワード信号として供給する協調制御系をそなえ、

協調制御系が、マニピュレータからもたらされる外乱を補償するために、姿勢制御系のホイール制御系に渡すフィードフォワード量として、角運動量若しくはそれをホイールの質量で割ったホイール角速度又はトルクを取り、その値をホイールの目標角運動量若しくは目標角速度を運動量／角運動量保存則又は宇宙用逆動力学から求めて、ホイールを制御するように構成されたことを特徴としている。

さらに、請求の範囲第２４項記載の本発明は、請求の範囲第２３項記載の本発明において、該３次元ダイナミクスリアルタイムシミュレート部が、該マニピュレータ装置の位置姿勢情報，ホイール角速度情報，該マニピュレータ関節情報入力部からのマニピュレータ関節角，関節角速度情報を入力として、全系運動量／角運動量保存則を用いることにより、該マニピュレータ装置の速度，角速度情報を演算するマニピュレータ装置速度・角速度演算部と、ある２時刻における該マニピュレータ装置の位置情報と該マニピュレータ装置速度・角速度演算部で得られた速度，角速度情報とを入力として、一階積分を施すことにより、次の時刻における該マニピュレータ装置の位置情報を該ディスプレイへ出力するマニピュレータ装置位置情報演算部と、該マニピュレータ装置位置情報演算部からのマニピュレータ装置位置情報を受けてホイールフィードバック制御トルクを演算するホイールフィードバック制御トルク演算部と、該マニピュレータ関節角，関節角速度情報を入力とし、ホイール系順動力学を用いて、内部トルク，ホイール系慣性情報を演算する内部トルク・ホイール系慣性情報演算部と、該マニピュレータ関節角，関節角速度情報を入力とし、拘束付き宇宙用逆動力学を用いて、ホイールフィードフォワードトルクを演算するホイールフィードフォワードトルク演算部と、２時刻におけるホイール回転角，ホイール角速度情報，フィードバック制御トルク情報，内部トルク情報，ホイール系慣性情報，フィードフォ

ワードトルク情報を入力とし、次の時刻におけるホイール回転角，ホイール角速度情報を出力するホイールダイナミクス積分部とをそなえて構成されたことを特徴としている。

従って、姿勢制御系を包含した宇宙機全体に対する３次元ダイナミクスをリアルタイムに計算し、その計算結果をグラフィックディスプレイ上にリアルタイムに出力できる一方で、マニピュレータの駆動による宇宙機本体の姿勢制御系にもたらす外乱を抑制し、宇宙機の姿勢制御性能を高度に保つことができる利点がある。

また、請求の範囲第２５項記載の本発明のマニピュレータ装置のための制御方法は、上述の第２の目的を達成するため、マニピュレータと該マニピュレータを支持するマニピュレータ本体とをそなえるとともにホイールの回転によって姿勢制御が可能なマニピュレータ装置において、該マニピュレータ装置の姿勢を該ホイールを用いて制御するための姿勢制御系と、該マニピュレータ装置付きの該マニピュレータを制御するマニピュレータ制御系とをそなえるとともに、該マニピュレータ制御系からの情報に基づき該マニピュレータからもたらされる外乱を所要のアルゴリズムを用いることにより算出して該姿勢制御系へフィードフォーワード信号として供給する協調制御系をそなえることにより、該協調制御系で、該マニピュレータからもたらされる外乱を補償するために、該姿勢制御系のホイール制御系に渡すフィードフォワード量として、角運動量、またはそれをホイールの質量で割ったホイール角速度を取り、ホイールの目標角運動量または目標角速度を運動量／角運動量保存則から求めて、該ホイールを制御することを特徴としている。

さらに、請求の範囲第２６項記載の本発明のマニピュレータ装置のための制御方法は、上述の第２の目的を達成するため、マニピュレータと該マニピュレータを支持するマニピュレータ本体とをそなえるとともに

ホイールの回転によって姿勢制御が可能なマニピュレータ装置において、該マニピュレータ装置の姿勢をホイールを用いて制御するための姿勢制御系と、該マニピュレータ装置付きの該マニピュレータを制御するマニピュレータ制御系とをそなえるとともに、該マニピュレータ制御系からの情報に基づき該マニピュレータからもたらされる外乱を所要のアルゴリズムを用いることにより算出して該姿勢制御系へフィードフォーワード信号として供給する協調制御系をそなえることにより、該協調制御系で、該マニピュレータからもたらされる外乱を補償するために、該姿勢制御系のホイール制御系に渡すフィードフォワード量として、トルクを取り、その値を宇宙用逆動力学により求めて、該ホイールを制御することを特徴としている。

従って、マニピュレータの駆動による宇宙機本体の姿勢制御系にもたらす外乱を抑制し、宇宙機の姿勢制御性能を高度に保つことができる利点がある。

また、請求の範囲第２７項記載のマニピュレータ装置のための制御装置は、上述の第２の目的を達成するために、マニピュレータと該マニピュレータを支持するマニピュレータ本体とをそなえるとともにホイールの回転によって姿勢制御が可能なマニピュレータ装置において、該マニピュレータ装置の姿勢を該ホイールを用いて制御するための姿勢制御系と、該マニピュレータ装置付きの該マニピュレータを制御するマニピュレータ制御系とをそなえるとともに、該マニピュレータ制御系からの情報に基づき該マニピュレータからもたらされる外乱を所要のアルゴリズムを用いることにより算出して該姿勢制御系へフィードフォーワード信号として供給する協調制御系をそなえ、該協調制御系が、該マニピュレータからもたらされる外乱を補償するために、該姿勢制御系のホイール制御系に渡すフィードフォワード量として、角運動量若しくはそれをホ

イールの質量で割ったホイール角速度又はトルクを取り、その値をホイールの目標角運動量若しくは目標角速度を運動量／角運動量保存則又は宇宙用逆動力学から求めて、該ホイールを制御するように構成されていることを特徴としている。

従って、マニピュレータの駆動によるマニピュレータ本体の制御系にもたらす外乱を抑制し、マニピュレータ装置の制御性能を高度に保つことができる利点がある。

さらに、請求の範囲第２８項記載の本発明のマニピュレータ装置のためのシミュレーション方法は、上述の第３の目的を達成するために、マニピュレータと該マニピュレータを支持するマニピュレータ本体とをそなえてなるマニピュレータ装置について、該マニピュレータの経路指令値情報を初期指令値として入力して、該マニピュレータに関する力学モデルに基づき、該マニピュレータが該初期指令値通りに動作した場合に生ずる外乱情報を過大指令値抑制指標としてリアルタイムで予測し、該過大指令値抑制指標に基づき、該初期指令値に対しスケール変換を施して中間指令値を得たあと、このスケール変換された中間指令値に従って、該マニピュレータの動きをシミュレート表示することを特徴としている。

また、請求の範囲第２９項記載の本発明は、該過大指令値抑制指標として、運動量／角運動量保存則を用いて、運動量／角運動量をリアルタイムで予測することを特徴としている。

さらに、請求の範囲第３０項記載の本発明は、請求の範囲第２８項記載の本発明において、該過大指令値抑制指標として、逆動力学を用いて、トルク／力をリアルタイムで予測することを特徴としている。

また、請求の範囲第３１項記載の本発明は、請求の範囲第２８項記載の本発明において、該過大指令値抑制指標として、運動量／角運動量保存則，逆動力学を用いて、運動量／角運動量，トルク／力をリアルタイ

ムで予測することを特徴としている。

さらに、請求の範囲第３２項記載の本発明は、請求の範囲第２８項記載の本発明において、該過大指令値抑制指標を求める際に使用する該初期指令値の微分情報として、該初期指令値の微分値について平均化処理を施したものが使用されることを特徴としている。

また、請求の範囲第３３項記載の本発明は、スケール変換を施す際に指数変換演算を施すことを特徴としている。

さらに、請求の範囲第３４項記載の本発明は、該スケール変換処理とスプライン補間計算処理とを組み合わせて、該マニピュレータの目標経路を生成することを特徴としている。

また、請求の範囲第３５項記載の本発明は、請求の範囲第３４項記載の本発明において、該スプライン補間計算処理として、一階微分まで連続なスプライン補間計算処理を使用することを特徴としている。

さらに、請求の範囲第３６項記載の本発明は、請求の範囲第３４項記載の本発明において、該スプライン補間計算処理として、二階微分まで連続なスプライン補間計算処理を使用することを特徴としている。

従って、オペレータとマニピュレータ間の空間的隔たりや力学的隔たりのあるマニピュレータをプログラム操作、遠隔操作する場合に、作業を安全且つ効率良く行なうことができるようにするためのオペレータの操作トレーニングに資することができる利点がある。

また、請求の範囲第３７項記載の本発明のマニピュレータ装置のためのシミュレーション装置は、上述の第３の目的を達成するために、マニピュレータと該マニピュレータを支持するマニピュレータ本体とをそなえてなるマニピュレータ装置について、該マニピュレータの経路指令値情報を初期指令値として入力する初期指令値入力手段と、該初期指令値入力手段からの該初期指令値を受け、該マニピュレータに関する力学モ

デルに基づき、該マニピュレータが該初期指令値通りに動作した場合に生ずる外乱情報を過大指令値抑制指標としてリアルタイムで予測する過大指令値抑制指標予測手段と、該過大指令値抑制指標予測手段で予測された該過大指令値抑制指標に基づき、該初期指令値に対しスケール変換を施して中間指令値を得るスケール変換手段と、該スケール変換手段で変換された中間指令値に従って、該マニピュレータの動きをシミュレート表示する表示手段とをそなえて構成されたことを特徴としている。

従って、オペレータとマニピュレータ間の空間的隔たりや力学的隔たりのあるマニピュレータをプログラム操作、遠隔操作する場合に、作業を安全且つ効率良く行なうことができるようにするための、オペレータの操作トレーニングに資することができる利点がある。

さらに、請求の範囲第３８項記載のマニピュレータ装置のためのシミュレーション及び制御方法は、上述の第３の目的を達成するために、マニピュレータと該マニピュレータを支持するマニピュレータ本体とをそなえてなるマニピュレータ装置について、該マニピュレータの経路指令値情報を初期指令値として入力して、該マニピュレータに関する力学モデルに基づき、該マニピュレータが該初期指令値通りに動作した場合に生ずる外乱情報を過大指令値抑制指標としてリアルタイムで予測し、該過大指令値抑制指標に基づき、該初期指令値に対しスケール変換を施して中間指令値を得たあと、このスケール変換された中間指令値に従って、該マニピュレータの動きをシミュレート表示するとともに、該マニピュレータを制御することを特徴としている。

また、請求の範囲第３９項記載の本発明は、請求の範囲第３８項記載の本発明において、該マニピュレータを制御するに際しては、該初期指令値に対しスケール変換を施した第１中間指令値について、更にマニピュレータ系の実外乱に基づいて抑制処理を施すことにより、第２中間指

令値を得たあと、この第２段中間指令値に従って、該マニピュレータを制御することを特徴としている。

さらに、請求の範囲第４０項記載の本発明は、請求の範囲第３８項記載の本発明において、該中間指令値に基づく該マニピュレータの動きに加えて、該初期指令値及び現在のマニピュレータ位置を表す到達値に基づく該マニピュレータの動きをそれぞれシミュレート表示することをことを特徴としている。

また、請求の範囲第４１項記載の本発明は、請求の範囲第４０項記載の本発明において、該初期指令値，該中間指令値及び該到達値の間に、所定値以上の偏差が生じると、現在のマニピュレータ到達点以降の初期指令値，中間指令値をリセットし、該マニピュレータの初期値を現在の到達点に設定し直すことをことを特徴としている。

従って、オペレータとマニピュレータ間の空間的隔たりや力学的隔たりのあるマニピュレータをプログラム操作、遠隔操作する場合に、作業を安全且つ効率良く行なうことができるとともに、マニピュレータの駆動によるマニピュレータ本体の制御系にもたらす外乱を抑制し、マニピュレータ装置の制御性能を高度に保つことができる利点がある。

さらに、請求の範囲第４２項記載の本発明のマニピュレータ装置のためのシミュレーション及び制御装置は、上記の第３の目的を達成するために、マニピュレータと該マニピュレータを支持するマニピュレータ本体とをそなえてなるマニピュレータ装置について、該マニピュレータの経路指令値情報を初期指令値として入力する初期指令値入力手段と、該初期指令値入力手段からの該初期指令値を受け、該マニピュレータに関する力学モデルに基づき、該マニピュレータが該初期指令値通りに動作した場合に生ずる外乱情報を過大指令値抑制指標としてリアルタイムで予測する過大指令値抑制指標予測手段と、該過大指令値抑制指標予測手

段で予測された該過大指令値抑制指標に基づき、該経路指令値情報に対しスケール変換を施して中間指令値を得るスケール変換手段と、該スケール変換手段で変換された中間指令値に従って、該マニピュレータの動きをシミュレート表示する表示手段と、該スケール変換手段で変換された中間指令値に従って、該マニピュレータを制御する制御手段とをそなえて構成されたことを特徴としている。

従って、オペレータとマニピュレータ間の空間的隔たりや力学的隔たりのあるマニピュレータをプログラム操作、遠隔操作する場合に、作業を安全且つ効率良く行なうことができるとともに、マニピュレータの駆動によるマニピュレータ本体の制御系にもたらす外乱を抑制し、マニピュレータ装置の制御性能を高度に保つことができる利点がある。

また、請求の範囲第４３項記載の本発明のマニピュレータ装置のためのシミュレーション及び制御方法は、上記の第３の目的を達成するために、マニピュレータと該マニピュレータを支持するマニピュレータ本体とをそなえてなるマニピュレータ装置について、該マニピュレータの経路指令値情報を初期指令値として入力して、該マニピュレータに関する力学モデルに基づき、該マニピュレータが該初期指令値通りに動作した場合に生ずる外乱情報を過大指令値抑制指標としてリアルタイムで予測し、該過大指令値抑制指標に基づき、該初期指令値に対しスケール変換を施して中間指令値を得たあと、このスケール変換された中間指令値に従って、該マニピュレータを制御することを特徴としている。

従って、オペレータとマニピュレータ間の空間的隔たりや力学的隔たりのあるマニピュレータをプログラム操作、遠隔操作する場合に、作業を安全且つ効率良く行なうことができる利点がある。

さらに、請求の範囲第４４項記載の本発明のマニピュレータ装置のためのシミュレーション及び制御方法は、上記の第３の目的を達成するた

めに、マニピュレータと該マニピュレータを支持するマニピュレータ本体とをそなえてなるマニピュレータ装置について、該マニピュレータの経路指令値情報を初期指令値として入力する初期指令値入力手段と、該初期指令値入力手段からの該初期指令値を受け、該マニピュレータに関する力学モデルに基づき、該マニピュレータが該初期指令値通りに動作した場合に生ずる外乱情報を過大指令値抑制指標としてリアルタイムで予測する過大指令値抑制指標予測手段と、該過大指令値抑制指標予測手段で予測された該過大指令値抑制指標に基づき、該経路指令値情報に対しスケール変換を施して中間指令値を得るスケール変換手段と、該スケール変換手段で変換された中間指令値に従って、該マニピュレータを制御する制御手段とをそなえて構成されたことを特徴としている。

従って、オペレータとマニピュレータ間の空間的隔たりや力学的隔たりのあるマニピュレータをプログラム操作、遠隔操作する場合に、作業を安全且つ効率良く行なうことができる利点がある。

図面の簡単な説明

ＦＩＧ．１は本発明の第１実施例を示すブロック図、ＦＩＧ．２はマニピュレータを有する宇宙機を示す斜視図、ＦＩＧ．３はマニピュレータを有する宇宙機の座標系を説明する図、ＦＩＧ．４はマニピュレータを有する宇宙機の座標系を説明する図、ＦＩＧ．５はマニピュレータを有する宇宙機の座標系を説明する図、ＦＩＧ．６は宇宙機速度・角速度演算部で衛星本体の速度，角速度を求めるフローチャート、ＦＩＧ．７は宇宙機位置情報演算部での処理手順を説明するフローチャート、ＦＩＧ．８は宇宙用逆動力学による手法を説明するフローチャート、ＦＩＧ．９はフィードフォワードトルクの演算手法を説明するフローチャート、ＦＩＧ．１０（ａ），（ｂ）はホィールが衛星本体からの分岐的リンク

として扱われることを説明する図、ＦＩＧ．１１は本発明の他の実施例を示すブロック図、ＦＩＧ．１２はリアルタイムデータモニタリング方式を説明する図、ＦＩＧ．１３はリアルタイムデータモニタリング方式を説明する図、ＦＩＧ．１４はΘ_wの補間手法を説明する図、ＦＩＧ．１５は慣性モーメント比例倍法による効率化を説明するフローチャート、ＦＩＧ．１６は慣性モーメント比例倍法による効率化を説明するフローチャート、ＦＩＧ．１７は慣性モーメント比例倍法による効率化を説明するフローチャート、ＦＩＧ．１８は慣性モーメント比例倍法による効率化を説明するフローチャートである。

ＦＩＧ．１９はマニピュレータを有する宇宙機を示す斜視図、ＦＩＧ．２０は本発明の第２実施例を示すブロック図、ＦＩＧ．２１は本発明の第２実施例における宇宙機の各制御系を示すブロック図、ＦＩＧ．２２は本発明の第２実施例をにおける３軸モーメンタムホイールの構成を示す模式図、ＦＩＧ．２３は本発明の第２実施例におけるベースにかかる外乱を説明するための図、ＦＩＧ．２４は本発明の第２実施例におけるブロックダイヤグラムを示す図、ＦＩＧ．２５は本発明の第２実施例におけるブロックダイヤグラムを示す図、ＦＩＧ．２６は本発明の第２実施例におけるブロックダイヤグラムを示す図、ＦＩＧ．２７は本発明の第２実施例におけるブロックダイヤグラムを示す図、ＦＩＧ．２８はマニピュレータを有する宇宙機の座標系を説明する図、ＦＩＧ．２９はマニピュレータを有する宇宙機の座標系を説明する図、ＦＩＧ．３０はマニピュレータを有する宇宙機の座標系を説明する図、ＦＩＧ．３１は本発明の第２実施例におけるアルゴリズムＡＡを示す図、ＦＩＧ．３２は本発明の第２実施例におけるアルゴリズムＡＢを示す図、ＦＩＧ．３３は本発明の第２実施例におけるアルゴリズムＡＣを示す図、ＦＩＧ．３４は本発明の第２実施例の汎用型宇宙用逆動力学を説明するための図、

ＦＩＧ．３５は本発明の第２実施例の拘束型宇宙用逆動力学を説明するための図、ＦＩＧ．３６は本発明の第２実施例の拘束型宇宙用逆動力学を説明するための図、ＦＩＧ．３７は本発明の第２実施例の拘束型宇宙用逆動力学を説明するための図、ＦＩＧ．３８は本発明の第２実施例の拘束型宇宙用逆動力学を説明するための図、ＦＩＧ．３９は本発明の第２実施例の拘束型宇宙用逆動力学を説明するための図である。

ＦＩＧ．４０は本発明の第３実施例としてのマニピュレータ装置のためのシミュレーション及び制御装置を示すブロック図、ＦＩＧ．４１はマニピュレータを有する宇宙機を示す斜視図、ＦＩＧ．４２はマニピュレータを有する宇宙機の座標系を説明する図、ＦＩＧ．４３はマニピュレータを有する宇宙機の座標系を説明する図、ＦＩＧ．４４はマニピュレータを有する宇宙機の座標系を説明する図、ＦＩＧ．４５は本発明の第３実施例におけるアルゴリズムＢＡを示す図、ＦＩＧ．４６は本発明の第３実施例におけるアルゴリズムＢＢを示す図、ＦＩＧ．４７はマニピュレータ関節角の微分項の算出法を説明するフローチャート、ＦＩＧ．４８は地上系／軌道上系速度スケール変換の例を説明する図、ＦＩＧ．４９は地上系／軌道上系速度スケール変換の他の例を説明する図、ＦＩＧ．５０は本発明の第３実施例における宇宙機の各制御系を示すブロック図、ＦＩＧ．５１はスプライン補間計算を説明するための図、ＦＩＧ．５２はグラフィックディスプレイの表示態様を説明する図、ＦＩＧ．５３はグラフィックディスプレイの表示態様を説明する図、ＦＩＧ．５４は本発明の第４実施例としてのマニピュレータ装置のためのシミュレーション及び制御装置を示すブロック図、ＦＩＧ．５５は本発明の第５実施例としてのマニピュレータ装置のためのシミュレーション装置を示すブロック図、ＦＩＧ．５６は従来のオフラインシミュレータでの処理手順を説明するフローチャートである。

発明を実施するための最良の形態

以下、図面を参照して本発明の実施例を説明する。

（ａ）第１実施例の説明

さて、本実施例は、ＦＩＧ．２に示すようなマニピュレータ１１を有する宇宙ロボットや人工衛星のごとき宇宙機１２の姿勢制御系に対する３次元ダイナミクスリアルタイムシミュレーションシステムについてのものである。なお、ＦＩＧ．２において、１３はパドルである。

ところで、ＦＩＧ．１は本実施例を示すブロック図であるが、このＦＩＧ．１に示すｌ（このｌは小文字のエルである）自由度シリアルリンクマニピュレータを有する衛星のための３次元ダイナミクスリアルタイムシミュレーションシステムは、マニピュレータ関節情報入力部１，グラフィックスディスプレイ２，３次元ダイナミクスリアルタイムシミュレート部１０をそなえて構成されている。

まず、マニピュレータ関節情報入力部１では、オペレータ１Ａがグラフィックスディスプレイ２を見ながらマスターアーム，ジョイスティック，キーボード等を通じてマニピュレータ１１（ＦＩＧ．２参照）の各関節角度，関節角速度，関節角加速度，衛星（宇宙機）本体位置姿勢の初期値，ホイール角速度初期値を入力するするようになっている。

なお、グラフィックスディスプレイ２には、マニピュレータ１１（ＦＩＧ．２参照）の各関節角度θ_i（ｔ）（ｉ＝１～ｎ）のみが渡される。

また、グラフィックスディスプレイ２はオペレータ１Ａの操作性を支援するもので、このグラフィックスディスプレイ２では、グラフィックス中の衛星が、オペレータ１Ａが指定した衛星本体位置姿勢の初期値，ホイール角速度初期値を始点として動き始めるようになっている。すなわち、このグラフィックスディスプレイ２では、宇宙機の動きをシミュ

レート表示することができるのである。

3次元ダイナミクスリアルタイムシミュレート部10は、マニピュレータ関節情報入力部1からの情報を受けて、姿勢制御系を包含した宇宙機全体に対する3次元ダイナミクスを、全系運動量／角運動量保存則，宇宙用逆動力学，ホイール系順動力学を用いて、リアルタイムに演算することにより、グラフィックスディスプレイ2にて宇宙機の動きをシミュレート表示させるためのものであるが、このために、この3次元ダイナミクスリアルタイムシミュレート部10は、マニピュレータ関節情報受信部3，宇宙機速度・角速度演算部4，宇宙機位置情報演算部5，ホイールフィードバック制御トルク演算部6，内部トルク・ホイール系慣性情報演算部7，ホイールフィードフォワードトルク演算部8，ホイールダイナミクス積分部9をそなえて構成されている。

ここで、マニピュレータ関節情報受信部3は、ダイナミクス計算の各ステップ毎の入力となるマニピュレータ11の各関節角度（θ_i（t）），関節角速度（関節角度を一階微分したもの），関節角加速度（関節角度を二階微分したもの）を受けるものである。

宇宙機速度・角速度演算部4は、全系運動量／角運動量保存則を用いて演算を施すものであるが、この宇宙機速度・角速度演算部4でのルーチンは、時刻tにおける本体位置姿勢値（X（t），Y（t），Z（t），α（t），β（t），γ（t））ホイール回転角（θ_{wj}（t）：j＝1～m），ホイール角速度（ホイール回転角を一階微分したもの），マニピュレータ関節角（θ_i（t）：i＝1～n），関節角速度（マニピュレータ関節角を一階微分したもの）を入力とし、時刻tにおける衛星本体の速度，角速度（V_0（t），Ω_0（t））を出力とするものである。

宇宙機位置情報演算部5は、一階積分を施すところであるが、詳細に

は、時刻ｔ，ｔ－Δｔにおける衛星本体の位置，変換行列（R_0（ｔ），${}^A A_0$（ｔ）），（R_0（ｔ－Δｔ），${}^A A_0$（ｔ－Δｔ））、速度，角速度（V_0（ｔ），Ω_0（ｔ）），（V_0（ｔ－Δｔ），Ω_0（ｔ－Δｔ））を入力とし、時刻ｔ＋Δｔにおける衛星本体の位置・変換行列（R_0（ｔ＋Δｔ），${}^A A_0$（ｔ＋Δｔ））を出力とするものである。なお、姿勢変化に関しては、変換行列の代わりに、オイラーアングル（α（ｔ），β（ｔ），γ（ｔ））でもよい。

ホイールフィードバック制御トルク演算部６は、時刻ｔ＋Δｔにおける衛星本体のオイラーアングル（α（ｔ＋Δｔ），β（ｔ＋Δｔ），γ（ｔ＋Δｔ）），角速度Ω_0（ｔ＋Δｔ）を入力とし、時刻ｔ＋Δｔにおけるホイールフィードバック制御トルク（ホイール制御トルク）τ_{wc}（ｔ＋Δｔ）を計算するものである。

内部トルク・ホイール系慣性情報演算部７は、ホイール系順動力学を用い、時刻ｔ＋Δｔにおけるマニピュレータ関節角〔θ_i（ｔ＋Δｔ）〕，マニピュレータ関節角速度〔θ_i（ｔ＋Δｔ）を一階微分したもの〕を入力とし、時刻ｔ＋Δｔにおける内部トルク〔τ_w（ｔ＋Δｔ）〕，ホイール系慣性行列〔H_w（ｔ＋Δｔ）〕を計算するものである。

ホイールフィードフォワードトルク演算部８は、拘束付き宇宙用逆動力学を用いて、時刻ｔ＋Δｔにおけるマニピュレータ関節角〔θ_i（ｔ＋Δｔ）〕，マニピュレータ関節角速度〔θ_i（ｔ＋Δｔ）を一階微分したもの〕を入力とし、時刻ｔ＋Δｔにおけるホイールフィードフォワードトルク〔τ_{FF}（ｔ＋Δｔ）〕を計算するものである。

ホイールダイナミクス積分部９は、時刻ｔ，ｔ＋Δｔにおけるホイール回転角〔θ_{wj}（ｔ）：ｊ＝１～ｍ〕，ホイール角速度〔θ_{wj}（ｔ）を一階微分したもの〕，フィードバック制御トルクτ_{wc}，内部トルクτ_w，ホイール系慣性行列H_w，フィードフォワードトルクτ_{FF}を入力とし、

時刻ｔ＋２Δｔにおけるホイール回転角〔θ_{wj}（ｔ＋２Δｔ）：ｊ＝１～ｍ〕，ホイール角速度〔θ_{wj}（ｔ＋２Δｔ）を一階微分したもの〕を出力とするものである。したがって、このホイールダイナミクス積分部９は、一階積分演算によってホイール角速度情報を求め、更に二階積分演算によってホイール回転角情報を求めるようになっている。

さらに、上記の各ブロック（ＦＩＧ．１の符号４～９の部分参照）の詳細は以下の通りであるが、そのまえに、以後のノーテーションを以下のように取る。なお、大文字は慣性座標系Σ_Aから見たベクトルを示し、小文字はベース固定座標系Σ_0から見たベクトルを示している。

$\mathbb{V}_i$ ；慣性座標系Σ_Aに対する座標系Σ_iの原点の速度

$\dot{\mathbb{V}}_i$ ；慣性座標系Σ_Aに対する座標系Σ_iの原点の加速度

$\hat{\mathbb{V}}_i$ ；慣性座標系Σ_Aに対するリンクｉの重心速度

$\dot{\hat{\mathbb{V}}}_i$ ；慣性座標系Σ_Aに対するリンクｉの重心加速度

Ω_i ；慣性座標系Σ_Aに対するリンクｉの角速度

$\dot{\Omega}_i$ ；慣性座標系Σ_Aに対するリンクｉの角加速度

$\mathbf{v}_i$ ；ベース固定座標系Σ_0に対するベクトル$\mathbb{p}_i$の時間微分

$$\mathbf{v}_i \equiv d_0\, \mathbb{p}_i / dt = \mathbb{p}_i'$$

$\mathbf{v}_i'$ ；ベース固定座標系Σ_0に対するベクトル$\mathbf{v}_i$の時間微分

$$\mathbf{v}_i' \equiv d_0\, \mathbf{v}_i / dt = \mathbb{p}_i''$$

$\hat{\mathbf{v}}_i$ ；ベース固定座標系Σ_0に対するベクトル$\hat{\mathbb{r}}_i$の時間微分

$$\hat{\mathbf{v}}_i \equiv d_0\, \hat{\mathbb{r}}_i / dt = \hat{\mathbb{r}}_i''$$

$\hat{\mathbf{v}}_i'$ ；ベース固定座標系Σ_0に対するベクトル$\hat{\mathbf{v}}_i$の時間微分

$$\hat{\mathbf{v}}_i' \equiv d_0\, \hat{\mathbf{v}}_i / dt = \hat{\mathbb{r}}_i''$$

ω_i ；ベース固定座標系Σ_0に対するリンクｉの角速度

ω_i' ；ベース固定座標系Σ_0に対するω_iの時間微分

$$\omega_i' \equiv d_0\, \omega_i / dt$$

注１）慣性座標系Σ_Aに対する時間微分とベース固定座標系Σ_0に対する時間微分とは明確に区別される。

ベクトル$\mathbb{X}$に対し、

Σ_Aに対する時間微分；　$\dot{\mathbb{X}} = d\mathbb{X}/dt$

Σ_0に対する時間微分；　$\mathbb{X}' = d_0\mathbb{X}/dt$

$\dot{\mathbb{X}}$と$\mathbb{X}'$の関係は次式の通り

$$\dot{\mathbb{X}} = \mathbb{X}' + \Omega_0 \times \mathbb{X}$$

また、全系に対する座標系は、ＦＩＧ．３に示すようなＤｅｎａｖｉｔ－Ｈａｒｔｅｎｂｅｒｇ座標系を採用する。

ここで、ＦＩＧ．３の座標系Σ_i，Σ_{i-1}で表示されたベクトルをそれぞれ${}^{i}a$，${}^{i-1}a$（実際は、これらの${}^{i}a$，${}^{i-1}a$についてはベクトル表記をすべきであるが、表記の都合上、スカラ表記されている。以下においても、このようにベクトル表記をすべきであるが、表記の都合上、スカラ表記する場合がある。）と定義する時、${}^{i}a$，${}^{i-1}a$は次式で関係づけられる（ＦＩＧ．４参照）。（数式中の１は筆記体を使用している場合がある。）

$$ {}^{i-1}a = {}^{i-1}A_i \, {}^{i}a + {}^{i-1}\ell_i $$

ここで、${}^{i-1}A_i$は座標系間の回転を表す直交行列であり、${}^{i-1}l_i$（ベクトル）は、座標原点O_{i-1}からO_iへ至るベクトルをΣ_{i-1}系で表示したものである。

なお、${}^{i-1}A_i$，${}^{i-1}l_i$（ベクトル）はＤｅｎａｖｉｔ－Ｈａｒｔｅｎｂｅｒｇ座標系表示として標準的パラメータを取るとき、以下のように表現される。

$$ {}^{i-1}A_i \equiv \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i \end{bmatrix} \qquad (i = 1 \sim \ell) $$

$$ {}^{i-1}\ell_i \equiv \begin{bmatrix} b_i \cos\theta_i \\ b_i \sin\theta_i \\ d_i \end{bmatrix} \qquad (i = 1 \sim \ell) $$

また、Ｄｅｎａｖｉｔ－Ｈａｒｔｅｎｂｅｒｇ座標系におけるパラメータの定義はＦＩＧ．５に示す通りであるが、この座標系は、次のような基準に従って設定される。

z_i 軸；関節ｉ＋１軸
x_i 軸：z_{i-1} からz_i に向けての共通垂線
y_i 軸；右手座標系となるように構成

b_i ；z_i，z_{i-1} 間の共通垂線の長さ
d_i ；x_i，x_{i-1} 間の長さ（z_{i-1} 座標値）
α_i ；z_i，z_{i-1} 間の角度（x_i 軸まわりにα_i 回転するとz_{i-1} 方向がz_i 方向と一致する。）
θ_i ；x_i，x_{i-1} 間の角度（z_{i-1} 軸回りにθ_i 回転するとx_{i-1} 方向がx_i 方向と一致する。）

さらに、${}^i a$ において、ｉ＝－１の時は、慣性系表示を表す。従って、以下のようになる。

$$ {}^i a \Big|_{i=-1} = {}^{\wedge} a \quad , \quad {}^i \mathbb{A} \Big|_{i=-1} = {}^{\wedge} \mathbb{A} $$

この場合、左肩添字Λは、Ａｂｓｏｌｕｔｅ　ｃｏｏｒｄｉｎａｔｅの頭文字を意味し、特に以下の式は、慣性系とベース基準座標系間の変換行列を表す。

$$ {}^{i-1}\Lambda_i \Big|_{i=0} = {}^{\wedge}\Lambda_0 $$

さて、全系運動量／角運動量保存則を用いて演算を施す宇宙機速度・角速度演算部４について更に説明する。

この場合、全系の運動量／角運動量保存則は下式のようになる。

$$ \begin{cases} \sum_{i=0}^{\ell} m_i \hat{V}_i = Q \quad (\mathrm{constant}) \text{；運動量保存則} \quad (1) \\ \sum_{i=0}^{\ell} (m_i \hat{R}_i \times \hat{V}_i + I_i \Omega_i) = L \quad (\mathrm{constant}) \\ \qquad \text{；角運動量保存則} \quad (2) \end{cases} $$

ここで、添字ｉは、すべてのリンク（ホイール、本体もリンクと見なす）について走る。

そして、慣性座標系Σ_Aに対するリンクｉの重心速度，慣性座標系Σ_Aに対するリンクｉの角速度は、次のようになる。

$$ \begin{cases} \hat{V}_i = V_0 + \hat{v}_i + \Omega_0 \times \hat{r}_i & (3) \\ \Omega_i = \Omega_0 + \omega_i & (4) \end{cases} $$

従って、（１），（２）式は、衛星本体の速度、角速度（V_0，Ω_0）について以下のようにまとめることができる。

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ \Omega_0 \end{bmatrix} = \mathbb{S}^{-1}\mathbb{H} \qquad (5)$$

$$\mathbb{S} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad ; 6 \times 6 \text{行列} \qquad (6)$$

$$S_{11} = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & M \end{bmatrix}, \quad M = \sum_{i=0}^{\ell} m_i \quad (\text{全質量}) \qquad (7)$$

$$S_{12} = \sum_{i=0}^{\ell} m_i \begin{bmatrix} 0 & \hat{r}_{zi} & -\hat{r}_{yi} \\ -\hat{r}_{zi} & 0 & \hat{r}_{xi} \\ \hat{r}_{yi} & -\hat{r}_{xi} & 0 \end{bmatrix} \qquad (8)$$

$$S_{21} = -\sum_{i=0}^{\ell} m_i \begin{bmatrix} 0 & \hat{R}_{zi} & -\hat{R}_{yi} \\ -\hat{R}_{zi} & 0 & \hat{R}_{xi} \\ \hat{R}_{yi} & -\hat{R}_{xi} & 0 \end{bmatrix} \qquad (9)$$

$$S_{22} = \sum_{i=0}^{\ell} \left\{ \mathbb{I}_i + m_i \begin{bmatrix} \hat{R}_{zi}\hat{r}_{zi} + \hat{R}_{yi}\hat{r}_{yi} & -\hat{R}_{yi}\hat{r}_{xi} & -\hat{R}_{zi}\hat{r}_{xi} \\ -\hat{R}_{xi}\hat{r}_{yi} & \hat{R}_{zi}\hat{r}_{zi} + \hat{R}_{xi}\hat{r}_{xi} & -\hat{R}_{zi}\hat{r}_{yi} \\ -\hat{R}_{xi}\hat{r}_{zi} & -\hat{R}_{yi}\hat{r}_{zi} & \hat{R}_{yi}\hat{r}_{yi} + \hat{R}_{xi}\hat{r}_{xi} \end{bmatrix} \right\}$$

$$= \sum_{i=0}^{\ell} \left\{ \mathbb{I}_i - m_i \underline{\mathbb{R}}_i \hat{\mathbb{r}}_i \right\} \qquad (10)$$

$$\vec{a} \times \vec{b} = \underline{\mathbb{b}} \times \vec{a} \rightarrow \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_y b_z - a_z b_y \\ a_z b_x - a_x b_z \\ a_x b_y - a_y b_z \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & b_z & -b_y \\ -b_z & 0 & b_x \\ b_y & -b_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}$$

$$H=\begin{bmatrix} h_v \\ \\ h_\omega \end{bmatrix} \quad ; 6\times 1 \text{行列} \qquad (11)$$

$$h_v = (Q - \sum_{i=0}^{t} m_i \hat{v}_i \qquad (12)$$

$$h_\omega = L - \sum_{i=0}^{t} (m_i \hat{R}_i \times \hat{v}_i + I_i \omega_i) \qquad (13)$$

$$\hat{v}_i = v_i + \omega_i \times \hat{r}_i' \qquad (14)$$

そして、（５）式より、衛星本体の速度、角速度（V_0，Ω_0）を求めることが出来る。

なお、具体的フローはＦＩＧ．６の通りである。すなわち、ステップＡ１で、初期値設定処理を施し、ステップＡ２で、正順繰り返し計算処理を施し、ステップＡ３て、ベース速度，角速度処理を施すのである。

ここで、このＦＩＧ．６のステップＡ１の処理（初期値設定処理）の手順は次の通りである。

$$\hat{R}_0 \Big|_{t=0} = \text{const}$$

$$\theta_i \Big|_{t=0} = \text{const} \quad (i=1\sim\ell)$$

$$\omega_0 = \omega_0' = 0,\ \hat{v}_0 = \hat{v}_0' = 0,\ v_0 = v_0' = 0$$

$${}^{i-1}Z_{i-1} = (0,\ 0,\ 1)^T$$

$$\hat{I}_0 \ ; \text{const}$$

また、ＦＩＧ．６のステップＡ２の処理（正順繰り返し計算処理）の手順は次の通りである。

$$①\ {}^{i}\omega_i = \begin{cases} {}^{i}\Lambda_{i-1}\,({}^{i-1}\omega_{i-1} + \dot{\theta}_i\,{}^{i-1}Z_{i-1}) & \text{for R} \\ {}^{i}\Lambda_{i-1}\,{}^{i-1}\omega_{i-1} & \text{for T} \end{cases}$$

$$②\ {}^{i}\omega_i' = \begin{cases} {}^{i}\Lambda_{i-1}\,({}^{i-1}\omega_{i-1}' + \ddot{\theta}_i\,{}^{i-1}Z_{i-1} \\ \qquad + \dot{\theta}_i\,{}^{i-1}\omega_{i-1} \times {}^{i-1}Z_{i-1}) & \text{for R} \\ {}^{i}\Lambda_{i-1}\,{}^{i-1}\omega_{i-1}' & \text{for T} \end{cases}$$

$$③\ {}^{i}v_i = \begin{cases} {}^{i}\omega_i \times {}^{i}\ell_i + {}^{i}\Lambda_{i-1}\,{}^{i-1}v_{i-1} & \text{for R} \\ {}^{i}\omega_i \times {}^{i}\ell_i + {}^{i}\Lambda_{i-1}\,(\dot{d}_i\,{}^{i-1}Z_{i-1} + {}^{i-1}v_{i-1}) & \text{for T} \end{cases}$$

$$④\ {}^{i}v_i = {}^{i}v_i + {}^{i}\omega_i \times {}^{i}\hat{r}_i$$

$$⑤\ {}^{i}v_i' = \begin{cases} {}^{i}\omega_i' \times {}^{i}\ell_i + {}^{i}\omega_i \times ({}^{i}\omega_i \times {}^{i}\ell_i) \\ \qquad + {}^{i}\Lambda_{i-1}\,{}^{i-1}v_{i-1}' & \text{for R} \\ {}^{i}\Lambda_{i-1}\,(\ddot{d}_i\,{}^{i-1}Z_{i-1} + {}^{i-1}v_{i-1}') \\ \quad + {}^{i}\omega_i' \times {}^{i}\ell_i + 2\dot{d}_i\,{}^{i}\omega_i \\ \qquad \times ({}^{i}\Lambda_{i-1}\,{}^{i-1}Z_{i-1}) \\ \qquad + {}^{i}\omega_i \times ({}^{i}\omega_i \times {}^{i}\ell_i) & \text{for T} \end{cases}$$

⑥ ${}^{1}\hat{v}_{i}' = {}^{1}v_{i}' + {}^{1}\omega_{i}' \times {}^{1}\hat{r}_{i}^{*} + {}^{1}\omega_{i} \times ({}^{1}\omega_{i} \times {}^{1}\hat{r}_{i}^{*})$

⑦ ${}^{1}\hat{r}_{i} = {}^{1}\hat{r}_{i}^{*} + {}^{1}\ell_{i} - {}^{1}A_{i-1}\ {}^{i-1}\hat{r}_{i-1}^{*} + {}^{1}A_{i-1}\ {}^{i-1}\hat{r}_{i-1}$

⑧ ${}^{A}\hat{r}_{i} = {}^{A}A_{i}\ {}^{i}\hat{r}_{i}$

⑨ ${}^{A}\hat{R}_{i} = {}^{A}\hat{r}_{i} + ({}^{A}\hat{R}_{0} - {}^{A}\hat{r}_{0})$

⑩ ${}^{A}\hat{v}_{i} = {}^{A}A_{i}\ {}^{i}\hat{v}_{i}$

⑪ ${}^{1}A_{A} = {}^{1}A_{i-1}\ {}^{i-1}A_{A}$ (⑦の次に計算)

ここで、i = 1, 2, …, ℓ, w_1, w_2, w_3 である。

さらに、ＦＩＧ．６のステップＡ３の処理（ベース速度，角速度処理）の手順は次の通りである。

①${}^{A}S_{12}$； 慣性系

②${}^{A}S_{21}$； 慣性系

③${}^{A}I_{i} = {}^{A}A_{i}\ {}^{i}I_{i}\ {}^{i}A_{A}$

④${}^{A}S_{22}$； 慣性系

$$⑤\ {}^{\wedge}\mathbb{h}_{v} = {}^{\wedge}Q - \sum_{i=0}^{\ell} m_i\ {}^{\wedge}\hat{v}_i$$

$$⑥\ {}^{\wedge}\mathbb{h}_{\omega} = {}^{\wedge}\mathbb{L} - \sum_{i=0}^{\ell} (m_i\ {}^{\wedge}\hat{\mathbb{R}}_i \times {}^{\wedge}\hat{v}_i + {}^{\wedge}\Lambda_i\ {}^{i}\mathbb{I}_i\ {}^{i}\omega_i)$$

$$⑦\quad \begin{bmatrix} {}^{\wedge}V_0 \\ {}^{\wedge}\Omega_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & {}^{\wedge}S_{12} \\ {}^{\wedge}S_{21} & {}^{\wedge}S_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} {}^{\wedge}\mathbb{h}_{v} \\ {}^{\wedge}\mathbb{h}_{\omega} \end{bmatrix}$$

$${}^{\wedge}S_{22} = \sum_{i=0}^{\ell} \left\{ {}^{\wedge}\Lambda_i\ {}^{i}\mathbb{I}_i\ {}^{i}\Lambda_{\wedge} - m_i\ \underline{{}^{\wedge}\hat{R}_i}\ \underline{{}^{\wedge}\hat{r}_i} \right\}$$

また、全系運動量／角運動量保存則一階積分演算を施す宇宙機位置情報演算部５について更に詳述すると、次のようになる。

すなわち、この場合は、前述の（５）式を一階積分して衛星本体の位置と姿勢を求めるが、かかる積分法は、原則的には何でもよく、Ｅｕｌｅｒ法，Ａｄａｍｓ－Ｂａｓｈｆｏｒｔｈ法，Ｒｕｎｇｅ－Ｋｕｔｔａ法等が使用される。

ここでは、２次のＡｄａｍｓ－Ｂａｓｈｆｏｒｔｈ法を例として取り上げるが、この時、積分の基本となる式は以下の通りである。

$$f(t+\delta t) = f(t) + \left\{ 3\dot{f}(t) - \dot{f}(t-\delta t) \right\} \delta t / 2 + O(\delta t^3) \qquad (15)$$

そして、この場合の計算フローはＦＩＧ．７の通りである。すなわち、ステップＢ１で、Σ_0 の原点位置の計算処理を施し、ステップＢ２で、$\Sigma_0 - \Sigma_A$ 変換行列の計算処理を施すのである。

ここで、ＦＩＧ．７のステップＢ１の処理（Σ_0 の原点位置の計算処理）は次の通りである。

$$ {}^{A}\mathbb{R}_0\ (t+\delta t) = {}^{A}\mathbb{R}_0\ (t) + \left\{ 3\ {}^{A}\mathbf{V}_0\ (t) - {}^{A}\mathbf{V}_0\ (t-\delta t) \right\} \delta t / 2 $$

また、ＦＩＧ．７のステップＢ２の処理（$\Sigma_0 - \Sigma_A$ 変換行列の計算処理）の手順は次の通りである。

$$ {}^{A}\mathbb{A}_0 = [\,{}^{A}\mathbf{e}_{0x} \quad {}^{A}\mathbf{e}_{0y} \quad {}^{A}\mathbf{e}_{0z}\,] $$

$$ {}^{A}\dot{\mathbf{e}}_{0x} = {}^{A}\Omega_0 \times {}^{A}\mathbf{e}_{0x} \qquad (16) $$

$$ {}^{A}\dot{\mathbf{e}}_{0y} = {}^{A}\Omega_0 \times {}^{A}\mathbf{e}_{0y} $$

$$ {}^{A}\dot{\mathbf{e}}_{0z} = {}^{A}\Omega_0 \times {}^{A}\mathbf{e}_{0z} $$

$$ {}^{A}\mathbf{e}_{0x}\ (t+\delta t) = {}^{A}\mathbf{e}_{0x}\ (t) + \left\{ 3\ {}^{A}\dot{\mathbf{e}}_{0x}\ (t) - {}^{A}\dot{\mathbf{e}}_{0x}\ (t-\delta t) \right\} \times \delta t / 2 $$

$$^{A}c_{0y}(t+\delta t) = {}^{A}c_{0y}(t) + \left\{3\,{}^{A}\dot{c}_{0y}(t) - {}^{A}\dot{c}_{0y}(t-\delta t)\right\} \times \delta t/2$$

(17)

$$^{A}c_{0z}(t+\delta t) = {}^{A}c_{0z}(t) + \left\{3\,{}^{A}\dot{c}_{0z}(t) - {}^{A}\dot{c}_{0z}(t-\delta t)\right\} \times \delta t/2$$

$$^{A}\Lambda_{0}\ (t+\delta t) = \left[{}^{A}c_{0x}(t+\delta t)\quad {}^{A}c_{0y}(t+\delta t)\quad {}^{A}c_{0z}(t+\delta t)\right]$$

さらに、ホイール制御トルクの計算について詳述すると次のようになる。

まず、（17）式より、次式で表される変換行列が計算される。

$$^{A}\Lambda_{0}\ (t+\delta t) = \left[{}^{A}c_{0x}(t+\delta t)\quad {}^{A}c_{0y}(t+\delta t)\quad {}^{A}c_{0z}(t+\delta t)\right]$$

そして、この値からX－Y－Z（または、X，Y，Zの任意の順列）のオイラー角を算出するのである。

例えば、オイラー角の定義として、E_x（α）E_y（β）E_z（γ）（x軸回りにαまわし、y軸回りにβ回し，z軸回りにγ回す）を取ると、次式のようになる。

$$ {}^{A}A_{0} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = E_X(\alpha)\, E_Y(\beta)\, E_Z(\gamma) $$

$$ \begin{bmatrix} \cos\beta\cos\gamma & -\cos\beta\sin\gamma & \sin\beta \\ \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma+\cos\alpha\sin\gamma & -\sin\alpha\sin\beta\sin\gamma+\cos\alpha\cos\gamma & -\sin\alpha\cos\beta \\ -\cos\alpha\sin\beta\cos\gamma+\sin\alpha\sin\gamma & \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma & \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix} $$

従って、オイラー角は、今の場合、下式のように求められる。

$$ \beta = A\tan 2\left(a_{13}, \sqrt{a_{23}^2 + a_{33}^2}\right) $$

$$ \alpha = A\tan 2\left(-a_{23}/\cos\beta,\ a_{33}/\cos\beta\right) \qquad (18) $$

$$ \gamma = A\tan 2\left(-a_{12}/\cos\beta,\ a_{11}/\cos\beta\right) $$

$$ {}^{A}\Omega_{0}\ (t+\delta t) = \begin{bmatrix} \Omega_{0x}(t+\delta t) \\ \Omega_{0y}(t+\delta t) \\ \Omega_{0z}(t+\delta t) \end{bmatrix} \qquad (19) $$

オイラー角を上記のようにする時、各軸を保つためのフィードバック制御トルクは以下のようになる。

$$ \tau_{wcx}(t+\delta t) = G_{px}\cdot\alpha(t+\delta t) + G_{Dx}\cdot\Omega_{0x}(t+\delta t) $$
$$ \tau_{wcy}(t+\delta t) = G_{py}\cdot\beta(t+\delta t) + G_{Dy}\cdot\Omega_{0y}(t+\delta t) $$
$$ \tau_{wcz}(t+\delta t) = G_{pz}\cdot\gamma(t+\delta t) + G_{Dz}\cdot\Omega_{0z}(t+\delta t) \qquad (20) $$

さらに、ホイール系順動力学を用いた内部トルク・ホイール系慣性情報演算部７について詳述すると、次のようになる。

（ａ）ホイール系の運動方程式について

ここでは、簡単のため、ホイールの数を３として、次式のように定義する。

$$q=\begin{bmatrix}\Theta_m\\ \\ \Theta_w\end{bmatrix},\quad \begin{cases}\Theta_m=[\theta_1,\ \theta_2,\ \cdots,\ \theta_L]^T\\ \\ \Theta_w=[\theta_{w1},\ \theta_{w2},\ \theta_{w3}]^T\end{cases}$$

このように定義すると、全系を記述する運動方程式は以下のようになる。

$$H(q)\ddot{q}+C(q,\dot{q})\dot{q}=\tau_q \qquad (21)$$

ここで、上記のＨ，Ｃ（共にベクトル）は、それぞれ慣性行列、遠心力＋コリオリ力行列と呼ばれる（１＋３）×（１＋３）の行列である。

$$H(q)=\begin{bmatrix}H_\theta(q) & H_{\theta w}(q)\\ \\ H_{w\theta}(q) & H_w(q)\end{bmatrix},$$

$$C(q,\dot{q})=\begin{bmatrix}C_\theta(q,\dot{q}) & C_{\theta w}(q,\dot{q})\\ \\ C_{w\theta}(q,\dot{q}) & C_w(q,\dot{q})\end{bmatrix} \qquad (22)$$

このようにすると、（２１）式から次のようなホイール系に対する運動方程式が得られる。

$$H_{w\theta}(q)\ddot{\Theta}_m + H_w(q)\ddot{\Theta}_w + C_{w\theta}(q, \dot{q})\dot{\Theta}_m + C_w(q, \dot{q})\dot{\Theta}_w = \tau_w \quad (23)$$

今、次式のように定義する。

$$\overline{\tau_w} \equiv H_{w\theta}(q)\ddot{\Theta}_m C_{w\theta}(q, \dot{q})\dot{\Theta}_m + C_w(q, q)\dot{\Theta}_w$$

すると、次式のようになる。

$$H_w(q)\ddot{\Theta}_w = \tau_w - \overline{\tau_w} \quad (24)$$

そして、（２４）式におけるτ_w，H_w（q）の各成分の値が、以下に示す宇宙用逆動力学により求められるのである。

（b）宇宙用逆動力学について

（b－１）本体加速度，角加速度の計算について

上記の（２４）式におけるτ_w，H_w（q）の各成分を求めるには、q（t），q（t）の一階微分，q（t）の二階微分を入力とし、τ_q（t）を出力とする逆動力学の方式が必要である。

ここで、基本となる方程式は、運動量／角運動量保存則〔（１），（２）式〕を時間微分した内力，内部トルクの総和を表す次の式である。

$$\sum_{i=0}^{l} m_i \dot{\hat{V}}_i = 0 \quad \text{（内力の総和ゼロ）} \quad (25)$$

$$\sum_{i=0}^{l} (m_i \hat{R}_i \times \dot{\hat{V}}_i + d\mathbb{I}_i \Omega_i / dt) = 0 \quad \text{（内部トルクの総和ゼロ）} \quad (26)$$

$$\dot{\hat{V}}_i = \dot{\hat{V}}_0 + \dot{\Omega}_0 \times \hat{r}_i + 2\Omega_0 \times \hat{v}_i + \Omega_0 \times (\Omega_0 \times \hat{r}_i) + \hat{v}_i' \quad (27)$$

$$\dot{\Omega}_i = \dot{\Omega}_0 + \dot{\omega}_i = \dot{\Omega}_0 + \omega_i' + \Omega_0 \times \omega_i \quad (28)$$

そして、上記の式を使って、（２５），（２６）式を整理すると、次式のようになる。

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{\Omega}_0 \end{bmatrix} = \mathbb{S}^{-1}\mathbb{G} \quad (29)$$

$$\mathbb{G} = \begin{bmatrix} \mathbb{g}_t \\ \mathbb{g}_r \end{bmatrix} \quad ; 6 \times 1 \text{ 行列} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \mathbb{g}_t &= -\sum_{i=0}^{\ell} \mathcal{F}_i \\ \mathbb{g}_r &= -\sum_{i=0}^{\ell} (\hat{R}_i \times \mathcal{F}_i + \mathcal{N}_i) \end{aligned} \quad (31)$$

$$\left.\begin{aligned} \mathcal{F}_i &= m_i (2\Omega_0 \times \hat{v}_i + \Omega_0 \times (\Omega_0 \times \hat{r}_i) + \hat{v}_i') \\ \mathcal{N}_i &= \mathbb{I}_i \omega_i' + \mathbb{I}_i \Omega_0 \times \omega_i + \Omega_i \times (\mathbb{I}_i \Omega_i) \end{aligned}\right\} (32)$$

$$\left.\begin{aligned} F_i &= m_i (\dot{V}_0 + \dot{\Omega}_0 \times \hat{r}_i) + \mathcal{F}_i \\ N_i &= \mathbb{I}_i \dot{\Omega}_0 + \mathcal{N}_i \end{aligned}\right\} \quad (33)$$

（ｂ－２）トルク計算について

まず、本体加速度，角加速度の計算アルゴリズムはＦＩＧ．８に示す通りであるが、この場合は、運動量／角運動量保存則のステップＡ３から引き続いた計算となる。すなわち、上記のステップＡ３のあと、ステップＡ４で、更にベース加速度，角加速度の計算処理を施し、ステップＡ５で、逆順繰り返し計算処理が施される。

ここで、上記ＦＩＧ．８のステップＡ４の処理（ベース加速度，角加速度の計算処理）は次の通りである。

$$\text{①}\ {}^{A}\hat{\mathbf{v}}_i' = {}^{A}\Lambda_i\ {}^{i}\hat{\mathbf{v}}_i'$$

$$\text{②}\ {}^{A}\mathcal{F}_i = m_i\ (2\ {}^{A}\Omega_0 \times {}^{A}\hat{\mathbf{v}}_i + {}^{A}\Omega_0 \times ({}^{A}\Omega_0 \times {}^{A}\hat{\mathbf{r}}_i) + {}^{A}\hat{\mathbf{v}}_i')$$

$$\text{③}\ {}^{i}\Omega_0 = {}^{i}\Lambda_A\ {}^{A}\Omega_0$$

$$\text{④}\ {}^{i}\Omega_i = {}^{i}\Omega_0 + {}^{i}\omega_i$$

$$\text{⑤}\ {}^{A}\mathcal{N}_i = {}^{A}\Lambda_i\ {}^{i}\mathbb{I}_i\ {}^{i}\omega_i' + {}^{A}\Lambda_i\ {}^{i}\mathbb{I}_i\ {}^{i}\Omega_0 \times {}^{i}\omega_i + {}^{A}\Lambda_i\ {}^{i}\Omega_i \times ({}^{i}\mathbb{I}_i\ {}^{i}\Omega_i)$$

$$\text{⑥}\ -\sum_{i=0}^{n} {}^{A}\mathcal{F}_i \equiv {}^{A}g_i$$

$$\text{⑦}\ -\sum_{i=0}^{n} ({}^{A}\hat{\mathbf{R}}_i \times {}^{A}\mathcal{F}_i + {}^{A}\mathcal{N}_i) \equiv {}^{A}g_\tau$$

$$⑧\begin{bmatrix} {}^{A}\dot{V}_0 \\ {}^{A}\dot{\Omega}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{A}S_{11} & {}^{A}S_{12} \\ {}^{A}S_{21} & {}^{A}S_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} {}^{A}\varepsilon_7 \\ {}^{A}\varepsilon_8 \end{bmatrix}$$

また、このＦＩＧ．８のステップＡ５の処理（逆順繰り返し計算処理）は次の通りである。

① ${}^{i+1}f_{i+1}$＝手先に加えられる外力，　${}^{i+1}f_{i+1}=0$
（外力＝０の場合）

② ${}^{i+1}n_{i+1}$＝手先にくわえられる外部トルク，　${}^{i+1}n_{i+1}=0$
（外部トルク＝０の場合）

③ ${}^{i}F_i = m_i ({}^{i}\Lambda_A \, {}^{A}\dot{V}_0 + {}^{i}\Lambda_A \, {}^{A}\dot{\Omega}_0 \times {}^{i}\hat{r}_i) + {}^{i}\Lambda_A \, {}^{A}\mathcal{F}_i$

④ ${}^{i}N_i = {}^{i}I_i \, {}^{i}\Lambda_A \, {}^{A}\dot{\Omega}_0 + {}^{i}\Lambda_A \, {}^{A}\mathcal{N}_i$

⑤ ${}^{i}f_i = {}^{i}\Lambda_{i+1} \, {}^{i+1}f_{i+1} + {}^{i}F_i$

⑥ ${}^{i}n_i = {}^{i}\Lambda_{i+1} \, {}^{i+1}n_{i+1} + {}^{i}\ell_i \times ({}^{i}\Lambda_{i+1} \, {}^{i+1}f_{i+1}) + ({}^{i}\ell_i + {}^{i}\hat{r}_i) \times {}^{i}F_i + {}^{i}N_i$

$$⑦\tau_i = \begin{cases} ({}^{i}\Lambda_{i-1}\ {}^{i-1}\mathbb{Z}_{i-1})^{T} \cdot {}^{i}\mathbb{M}_i + \gamma_i \dot{\Theta}_i & \text{for R} \\ ({}^{i}\Lambda_{i-1}\ {}^{i-1}\mathbb{Z}_{i-1})^{T} \cdot {}^{i}\mathbb{F}_i + \gamma_i \dot{\Theta}_i & \text{for T} \end{cases}$$

$$(i = \ell,\ \ell-1,\ \cdots,\ 1,\ w_1,\ w_2,\ w_3)$$

（c） $\overline{\tau_w}$，H_w の成分計算

逆動力学のアルゴリズムを使って、上記の $\overline{\tau_w}$，H_w の成分を計算するアルゴリズムは以下の通りである。

すなわち、上記の（b）項でのアルゴリズムに基づいて、τ_q を計算するルーチンを次式とする。

$$SUB1\ (\Theta_m,\ \Theta_w,\ \dot{\Theta}_m,\ \dot{\Theta}_w,\ \ddot{\Theta}_m,\ \ddot{\Theta}_w,\ \tau_q) \qquad (34)$$

また、（b）のアルゴリズムにおいて、速度（Θ_m の時間微分，Θ_w の時間微分）及び加速度（Θ_m の二階時間微分）に比例する項をはじめから省略したルーチンを次式とする。

$$SUB2\ (\Theta_m,\ \Theta_w,\ \ddot{\Theta}_w,\ \tau_q) \qquad (35)$$

（c－1） $\overline{\tau_w}$ の計算について

上記の（34）式において、Θ_m，Θ_m の一階微分，Θ_m の二階微分，Θ_w，Θ_w の一階微分をその時の値とし、次式とする。

$$\ddot{\Theta}_w \equiv 0$$

（c－2） H_w の計算について

上記の（３５）式において、Θ_m，Θ_w をその時の値とし、次式とする。

$$\ddot{\Theta}_w = \mathfrak{e}_i \quad (i = 1 \sim 3, \quad \mathfrak{e}_i \text{は単位ベクトル})$$

なお、τ_w はフィードバックトルク τ_{wc} とフィードフォワードトルク τ_{FF} の和となる。すなわち、次式となる。

$$\tau_w = \tau_{wc} + \tau_{FF} \qquad (36)$$

次に、拘束付き宇宙用逆動力学を用いたホイールフィードフォワードトルク演算部８について詳述する。

まず、ここで求めるフィードフォワードトルク τ_{FF} は、衛星本体の姿勢を常に一定に保つ為のもので、このフィードフォワードトルク τ_{FF} は、宇宙用逆動力学を使って以下のように求められる。

今の場合、拘束条件として、下式を採用する。

$$\Omega_0 = \dot{\Omega}_0 = 0 \qquad (37)$$

この時、本体の加速度は、内力の総和＝０の式より、

$$\left.\begin{aligned} \dot{V}_0 &= (-1/M) \times \sum_{i=0}^{i} \mathscr{F}_i \\ \mathscr{F}_i &= m_i \hat{v}_i' \end{aligned}\right\} \qquad (38)$$

また、内力，内部トルク F_i，N_i は、次式となる。

$$\left.\begin{aligned} \mathbb{F}_i &= \mathscr{F}_i \\ \mathbb{N}_i &= \mathbb{I}_i \omega_i' + \Omega_i \times (\mathbb{I}_i \Omega_i) \end{aligned}\right\} \qquad (39)$$

従って、（３７）式の拘束付きにおけるフィードフォワードトルクはＦＩＧ．９に示すようなアルゴリズムにまとめられる。即ち、ステップＣ１で、初期値の設定を行ない、ステップＣ２で、正順繰り返し計算を行ない、ステップＣ３で、逆順繰り返し計算を行なう。

そして、このＦＩＧ．９におけるステップＣ１の処理（初期値の設定処理）は次のようにして行なわれる。

$$\left.{}^{A}\widehat{\mathbb{R}}\right|_{t=0} = 0 \quad v_0 = v_0' = 0,\ \omega_0 = \omega_0' = 0,\ \hat{v}_0 = \hat{v}_0' = 0$$

$${}^{i-1}\mathbb{Z}_{i-1} = (0,\ 0,\ 1)^T,$$

$${}^{i}\Lambda_{i-1} \quad (i = w_1,\ w_2,\ w_3,\ 0,\ 1,\ \cdots,\ \ell)$$

また、ＦＩＧ．９におけるステップＣ２の処理（正順繰り返し計算処理）は次のようにして行なわれる。

$$\text{①}\ {}^{i}\omega_i = \begin{cases} {}^{i}\Lambda_{i-1}\ ({}^{i-1}\omega_{i-1} + \dot{\theta}_i\ {}^{i-1}\mathbb{Z}_{i-1}) & \text{for R} \\ {}^{i}\Lambda_{i-1}\ {}^{i-1}\omega_{i-1} & \text{for T} \end{cases}$$

$$\text{②}\ {}^{i}\omega_i' = \begin{cases} {}^{i}\Lambda_{i-1}\ [{}^{i-1}\omega_{i-1}' + \ddot{\theta}_i\ {}^{i-1}\mathbb{Z}_{i-1} \\ \qquad + \dot{\theta}_i\ {}^{i-1}\omega_{i-1} \times {}^{i-1}\mathbb{Z}_{i-1}] & \text{for R} \\ {}^{i}\Lambda_{i-1}\ {}^{i-1}\omega_{i-1}' & \text{for T} \end{cases}$$

$$③\ {}^{i}v_i = \begin{cases} {}^{i}\omega_i \times {}^{i}\ell_i + {}^{i}A_{i-1}\ {}^{i-1}v_{i-1} & for\ R \\ {}^{i}\omega_i \times {}^{i}\ell_i + {}^{i}A_{i-1}\ (\dot{d}_i\ {}^{i-1}Z_{i-1} + {}^{i-1}v_{i-1}) & for\ T \end{cases}$$

$$④\ {}^{i}\hat{v}_i = {}^{i}v_i + {}^{i}\omega_i \times {}^{i}\hat{r}_i^{*}$$

$$⑤\ {}^{i}v_i' = \begin{cases} {}^{i}\omega_i' \times {}^{i}\ell_i + {}^{i}\omega_i \times ({}^{i}\omega_i \times {}^{i}\ell_i) + {}^{i}A_{i-1}\ {}^{i-1}v_{i-1}' & for\ R \\ {}^{i}A_{i-1}\ (\ddot{d}_i\ {}^{i-1}Z_{i-1} + {}^{i-1}v_{i-1}') + {}^{i}\omega_i' \times {}^{i}\ell_i + 2\dot{d}_i\ {}^{i}\omega_i \times ({}^{i}A_{i-1}\ {}^{i-1}Z_{i-1}) + {}^{i}\omega_i \times ({}^{i}\omega_i \times {}^{i}\ell_i) & for\ T \end{cases}$$

$$⑥\ {}^{i}\hat{v}_i' = {}^{i}v_i' + {}^{i}\omega_i' \times {}^{i}\hat{r}_i^{*} + {}^{i}\omega_i \times ({}^{i}\omega_i \times {}^{i}\hat{r}_i^{*})$$

$$⑦\ {}^{i}\mathbb{A}_A = {}^{i}A_{i-1} \cdot {}^{i-1}A_A$$

$$⑧\ {}^{A}\hat{v}_i' = {}^{A}\Lambda_i\ {}^{i}\hat{v}_i'$$

ここで、$i = 1, 2, \cdots, \ell, w_1, w_2, w_3$である。

さらに、ＦＩＧ．９におけるステップＣ３の処理（逆順繰り返し計算処理）は次のようにして行なわれる。

(1) ${}^{\ell+1}\mathbf{f}_{\ell+1}$ =手先に加えられる外力
(${}^{\ell+1}f_{\ell+1}=0$，外力＝0の場合)

② ${}^{\ell+1}\mathbf{n}_{\ell+1}$ =手先に加えられる外部トルク
(${}^{\ell+1}\mathbf{n}_{\ell+1}=0$，外部トルク＝0の場合)

③ $${}^{A}\dot{\mathbf{V}}_0 = (-1/M) \times \sum_{i=0}^{\ell} m_i \; {}^{A}\hat{\mathbf{v}}_i'$$

④ $${}^{i}\mathbf{F}_i = m_i \; {}^{i}\Lambda_A \; {}^{A}\dot{\mathbf{V}}_0 + m_i \; {}^{i}\hat{\mathbf{v}}_i'$$

⑤ $${}^{i}\mathbf{N}_i = {}^{i}\mathbf{I}_i \; {}^{i}\omega_i' + {}^{i}\Omega_i \times ({}^{i}\mathbf{I}_i \; {}^{i}\Omega_i)$$

⑥ $${}^{i}\mathbf{f}_i = {}^{i}\Lambda_{i+1} \; {}^{i+1}\mathbf{f}_{i+1} + {}^{i}\mathbf{F}_i$$

⑦ $$\begin{aligned}{}^{i}\mathbf{n}_i = {}^{i}\Lambda_{i+1} \; {}^{i+1}\mathbf{n}_{i+1} + {}^{i}\ell_i \times ({}^{i}\Lambda_{i+1} \; {}^{i+1}\mathbf{f}_{i+1}) \\ + ({}^{i}\ell_i + {}^{i}\hat{\mathbf{r}}_i^{*}) \times {}^{i}\mathbf{F}_i + {}^{i}\mathbf{N}_i\end{aligned}$$

⑧ $$\tau_i = \begin{cases} ({}^{i}\Lambda_{i-1} \; {}^{i-1}\mathbf{Z}_{i-1})^{T} \cdot {}^{i}\mathbf{n}_i + \gamma_i \dot{\Theta}_i & \text{for R} \\ ({}^{i}\Lambda_{i-1} \; {}^{i-1}\mathbf{Z}_{i-1})^{T} \cdot {}^{i}\mathbf{f}_i + \gamma_i \dot{\Theta}_i & \text{for T} \end{cases}$$

ここで、$i=\ell, \ell-1, \cdots, 0$，$w=w_1 \sim w_3$である。

次に、ホイールダイナミクスの二階積分を施すホイールダイナミクス積分部9について詳述する。

まず、ホイールダイナミクスを記述する方程式は、(24)，(36)式より、次式のようになる。

$$H_w \ddot{\Theta}_w = \tau_{wc} - \overline{\tau_w} + \tau_{FF} \quad (40)$$

従って、次式のようになる。

$$\ddot{\Theta}_w = H_w^{-1} (\tau_{wc} - \overline{\tau_w} + \tau_{FF}) \quad (41)$$

今、積分法として、２次のＡｄａｍｓ－Ｂａｓｈｆｏｒｔｈ法を採用すると、（４０）式の一階積分は、次式のようになる。

$$\dot{\Theta}_w (t+2\delta t) = \dot{\Theta}_w (t+\delta t) + \{ 3\ddot{\Theta}_w (t+\delta t) - \ddot{\Theta} (t) \} \delta t / 2 \quad (42)$$

従って、（４０）式の二階積分は、次式のようになる。

$$\Theta_w (t+2\delta t) = \Theta_w (t+\delta t) + \{ 3\dot{\Theta}_w (t+\delta t) - \dot{\Theta}_w (t) \} \delta t / 2 \quad (43)$$

従って、（４２），（４３）式により、ホイール角速度，ホイール回転角が求まるのである。

なお、ホイールは、ＦＩＧ．１０（ａ），（ｂ）に示すように、衛星１２の本体からの分岐的リンクとして取り扱われる。従って、逆動力学，順動力学に現れるレカーシヴなフォーミュレーションにおいて、ホイール系は、本体に隣接する形で計算が進む。

また、本プログラムでは、（マニピュレータのリンク数＋ホイール数）の自由度からなる宇宙用逆動力学と（ホイール数）の自由度からなる順動力学によって、全系の方程式が記述されている。従って、論文「宇宙用マニピュレータの運動学・動力学の効率的計算法」（第８回日

本ロボット学会学術講演会　講演番号２１０４）からわかるように、本プログラムの積・和数は（マニピュレータのリンク数）に比例する。

次に、ホイール順動力学における一階積分による方式、即ち既に詳述した方式に基づいて、系全体の運動方程式を数値的に解くに際し、ホイールの回転対称性に着目し、ホイールに対して、一階の数値積分で済ませ、ホイールの回転角を陽に求めない方式について説明する。

ホイールは、回転軸に対して対称であるため、慣性行列Ｈ（ｑ），遠心力＋コリオリ力行列Ｃは、ホイールの回転角に対する依存性を持たない。

従って、ホイールダイナミクス積分部９は、ＦＩＧ．１１に示すように、Θ_w の２階微分に対する一階積分でよい。

具体的には、まず次式を考える。

$$\ddot{\Theta}_w = H^{-1}(\tau_{wc} - \overline{\tau_w} + \tau_{FF}) \qquad (44)$$

そして、この（４４）式において、積分法として２次のＡｄａｍｓ－Ｂａｓｈｆｏｒｔｈ法を採用するとΘ_w の一階微分は下式から求められる。

$$\dot{\Theta}_w(t+2\delta t) = \dot{\Theta}_w(t+\delta t) + \{3\ddot{\Theta}_w(t+\delta t) - \ddot{\Theta}(t)\}\,\delta t/2 \qquad (45)$$

なお、ＦＩＧ．１１において、その他の部分はＦＩＧ．１のものとほぼ同じである。

次に、宇宙機のダイナミクスの計算結果をグラフィックスおよび時系列グラフにリアルタイムに表示する方式について説明する。

まず、その目的は次の通りである。衛星ホイールの角速度ω（ｉ＝１

～３）、衛星本体オイラー角α，β，γ，衛星本体に作用する外乱トルクτi（ｉ＝１～３）等をリアルタイムにモニタリングすることである。

そして、この場合のシステム構成としては、ＦＩＧ．１２に示すように、ＣＰＵ－１，ＣＰＵ－２間をＥＴＨＥＲ　ＮＥＴ等を介して行なう方式や、ＦＩＧ．１３に示すように、ＣＰＵ－１，ＣＰＵ－２間でのデータを共通のメモリ１４１を介して受け渡す方式などが考えられる。

次に、ホイールの回転をグラフィックスに表示するために、ホイール順動力学における二階積分を非常に簡便な数値積分で行なう方式について説明する。

まず、既に詳述した方式に基づいて、系全体の運動方程式を数値的に解くに際し、ホイールの回転対称性に着目し、ホイールに対する一階の数値積分と二階の数値積分の刻み幅を変え、二階数値積分を一階数値積分より粗計算で処理する方式から説明する。

この場合、ホイールは回転軸に対して対称であるため、慣性行列Ｈ（ｑ），遠心力＋コリオリ力行列Ｃは、ホイールの回転角に対する依存性を持たない。

従って、力学的には、ホイール系に対して回転角まで求める必要性は薄い。

但し、リアルタイムシミュレータの操作者にとって、ホイールの回転をグラフィカルに表示して見せることは、制御系の働き具合を判断するうえで、非常に有効である。

この時、必要となるのは、ホイールが回転している（制御ＯＮ）状態か、止まっている（制御ＯＦＦ）状態かをヴィジュアルに判断できることであって、回転角に対し、力学的に厳密な精度は要求されない。

以上の考察に基づき、本方式では、ホイールの二階数値積分の積分刻み幅を一階数値積分より粗く取り、二階数値積分を一階数値積分より粗

計算で処理する。

以下、Ａｄａｍｓ－Ｂａｓｈｆｏｒｔｈ法を例にとって示す。

このとき、ベースとなる常微分方程式は、次式のようになる。

$$\ddot{\Theta}_w = H_w^{-1}(\tau_{wc} - \overline{\tau}_w + \tau_{PF}) \qquad (46)$$

また、２次のＡｄａｍｓ－Ｂａｓｈｆｏｒｔｈ法を採用して上式を一階積分すると、次式のようになる。

$$\dot{\Theta}_w(t+2\delta t) = \dot{\Theta}_w(t+\delta t) + \left\{3\ddot{\Theta}_w(t+\delta t) - \ddot{\Theta}(t)\right\}\delta t/2 \qquad (47)$$

そして、この（４７）式に基づいて、ホイールの回転角Θ_wを求める場合には、この（４７）式より積分刻み幅を粗くする。即ち、次式のようになる。

$$\Theta_w(t+2S\delta t) = \Theta_w(t+S\delta t) + \left\{3\dot{\Theta}_w(t+S\delta t) - \dot{\Theta}_w(t)\right\}S\delta t/2 \qquad (48)$$

ここで、ｓは２以上の任意の整数である。

また、（ｔ＋ｓδｔ，ｔ＋２ｓδｔ）間のｔ＋（ｓ＋１）δｔ，ｔ＋（ｓ＋２）δｔ，・・，ｔ＋（２ｓ－１）δｔに対しては、ＦＩＧ．１４に示すように、Θ_w（ｔ＋ｓδｔ）の値をそのまま使用する。

つぎに、同様にホイールの回転をグラフィックスに表示するために、ホイール順動力学における二階積分を非常に簡便な数値積分で行なう別の方式として、既に詳述した方式に基づいて、系全体の運動方程式を数

値的に解くに際し、ホイールの回転対称性に着目し、ホイールに対する一階の数値積分と二階の数値積分の積分次数を変え、二階数値積分を一階数値積分より粗計算で処理する方式を説明する。

この場合も、上記の場合と同様の理由により、ホイールの二階数値積分を一階数値積分より粗計算で処理する。

但し、粗計算の方法としては、二階数値積分の積分次数を一階数値積分より下げる方式を取る。

今、Ａｄａｍｓ－Ｂａｓｈｆｏｒｔｈ法を例にとって示す。

この場合、ベースとなる常微分方程式は、次式のようになる。

$$\ddot{\theta}_w = H_w^{-1}(\tau_{wc} - \overline{\tau_w} + \tau_{FF}) \qquad (49-1)$$

さらに、二階積分を２次のＡｄａｍｓ－Ｂａｓｈｆｏｒｔｈ法で行なうと、次式のようになる。

$$\dot{\theta}_w(t+2\delta t) = \dot{\theta}_w(t+\delta t) + \{3\ddot{\theta}_w(t+\delta t) - \ddot{\theta}_w(t)\}\,\delta t/2 \qquad (49-2)$$

また、一階積分は一次のＡｄａｍｓ－Ｂａｓｈｆｏｒｔｈ法（Ｅｕｌｅｒ法と同じ）で行なう。

$$\theta_w(t+3\delta t) = \theta_w(t+2\delta t) + \dot{\theta}_w(t+2\delta t)\cdot\delta t \qquad (50)$$

一般に、二階積分をｓ次のＡｄａｍｓ－Ｂａｓｈｆｏｒｔｈ法で行なう場合、一階積分は（ｓ－１）次以下のＡｄａｍｓ－Ｂａｓｈｆｏｒｔｈ法でよい。

なお、積分法は、Ａｄａｍｓ－Ｂａｓｈｆｏｒｔｈ法に限らず、Ｒｕｎｇｅ－Ｋｕｔｔａ法等任意の方法でもよい。但し、一階積分は、二階積分より高速なものを採用するものとする。

さらに、ホイールの回転をグラフィックスに表示するために、ホイール順動力学における二階積分を非常に簡便な数値積分で行なう方式として、ホイールに対する一階の数値積分と二階の数値積分の刻み幅および積分次数を変え、二階数値積分を一階数値積分より粗計算で処理する方式について説明する。

この場合も、上記の理由と同様の理由により、ホイールの二階数値積分を一階数値積分より粗計算で処理する。

但し、粗計算の方法としては、二階数値積分の積分刻み幅を一階数値積分より粗く取り、二階数値積分の積分次数を一階数値積分より下げる方式を取る。

今、Ａｄａｍｓ－Ｂａｓｈｆｏｒｔｈ法を例にとって示すと、ベースとなる常微分方程式は、次のようになる。

$$\ddot{\Theta}_w = H_w^{-1}(\tau_{wc} - \overline{\tau_w} + \tau_{FF}) \qquad (51)$$

また、２次のＡｄａｍｓ－Ｂａｓｈｆｏｒｔｈ法を採用して上式を一階積分すると、次のようになる。

$$\dot{\Theta}_w(t+2\delta t) = \dot{\Theta}_w(t+\delta t) + \{3\ddot{\Theta}_w(t+\delta t) - \ddot{\Theta}_w(t)\}\,\delta t/2 \qquad (52)$$

そして、この（５２）式に基づいて、ホイールの回転角Θ_wを求める

場合には、この（５２）式の場合より、積分刻み幅を粗く取り、且つ、積分次数を下げる。即ち、次式のようにする。

$$\Theta_w(t+2S\delta t)=\Theta_w(t+S\delta t)+\dot{\Theta}_w(t+S\delta t)\delta t \quad (53)$$

ここで、ｓは２以上の任意の整数である。

また、（ｔ＋ｓδｔ，ｔ＋２ｓδｔ）間のｔ＋（ｓ＋１）δｔ，ｔ＋（ｓ＋２）δｔ，・・，ｔ＋（２ｓ－１）δｔに対しては、Θ_w（ｔ＋ｓδｔ）の値をそのまま使用する（ＦＩＧ．１４参照）。

つぎに、ホイールの回転角を出来るだけ高速・高精度に求めるために、すべてのホイールの慣性モーメントを比例倍する方式について説明する。

一般に、力学系の運動方程式を数値積分する場合、その精度は、積分の刻み幅に大きく依存する。

そして、精度を上げるためには、積分の刻み幅を細かくする必要があるが、細かくしすぎると計算時間が長くなる。

本方式では、計算精度と計算速度の両方を適性値に保つために、系全体の中で、非常に速く回転する部分に着目し、その部分の慣性モーメントをすべて比例倍（例えば１０００倍）することによって、その部分の回転速度を他の部分の速度のオーダに落とすことによって、積分の刻み幅を短くすることなく計算精度を上げようというものである。

なお、積分の刻み幅は、系全体の中で最も速く動いている部分を標準として設定される。従って、衛星のダイナミクスの場合、通常の数値積分法では積分の刻み幅はホイールに準拠して決定される。

また、本方式が適用できるのは、ホイールのように回転軸まわりに軸対称であるコンポーネントに限られる。

例として、ホイールを有する衛星のダイナミクスを取り上げると、こ

の場合には、系全体の中で最も速く回転する部分はホイールであるため、ホイールの慣性モーメントをすべてｓ倍する（例えばｓ＝１０００．０）。この時、ホイールの角速度は１／ｓになるが、他の部分にはほとんど影響を及ぼさず、ダイナミクスとしては変化がない。

以下、これについての証明を行なう。

まず、マニピュレータを止めて考える。そして、衛星本体部（衛星本体＋パドル＋マニピュレータ）とホイールに着目し、衛星本体部がホイールから受ける反作用を取り入れた型で、衛星本体部のオイラー方程式を立てると、次式のようになる。

$$\mathbb{I}\dot{\Omega}_B + \Omega_B \times \mathbb{I}\Omega_B = \mathbb{T}_{外部トルク} - \sum_{i=1}^{m} (\tau_{wi} Z_{wi} - I_{wi}\dot{\Omega}_B \cdot Z_{wi} Z_{wi} + I_{wi}\dot{\theta}_{wi}\Omega_B \times Z_{wi}) \quad (54)$$

ここで、

$\mathbb{I} \equiv \mathbb{I}_B + \sum_{i=1}^{m} \mathbb{I}_{wi}$

$\mathbb{I}_B$： 衛星本体部　慣性行列

$\mathbb{I}_{wi}$： ホイール慣性行列，ホイール座標で（j_{wi}，j_{wi}，I_{wi}）

Ω_B： 本体部角速度

Z_{wi}： ホイール回転軸方向単位ベクトル
ホイール座標で（0，0，1）^{T}

I_{wi}： ホイール回転軸まわり慣性モーメント

τ_{wi}： ホイール駆動トルク

従って、衛星本体部の慣性質量がホイールのそれに比べて十分大きく、衛星本体部の角加速度Ω_Bが運動全体を通じて十分小さい場合には、（５４）式は以下のような形になる。

$$I\dot{\Omega}_B + \Omega_B \times I\Omega_B = T_{外部トルク} - \sum_{i=1}^{m} (\tau_{wi}Z_{wi} + L_{wi}\Omega_B \times Z_{wi}) \quad (55)$$

ここで、

$$L_{wi} \equiv I_{wi}\dot{\theta}_{wi} \quad (56)$$

そして、この（５５）式により、衛星本体部を記述するダイナミクスには、ホイールの角運動量L_{wi}のみが依存し、ホイールの慣性モーメントの値は直接には依存してこないことがわかる。従って、（５５）式において、ホイールの慣性モーメントの値をｓ倍すれば、角速度は１／ｓ倍になり、ｓの値を適当に選ぶことによりホイールの角速度を適性値（他のリンクと同程度の角速度）に落とすことが可能となるのである。

また、グラフィックス表示について説明すると、次のようになる。

すなわち、角速度が１／ｓ倍になったホイールの動きをそのままグラフィックスに表示すると動きが遅いため、回転の度合いの識別が難しくなる。そこで、ホイール系の運動方程式において、その二階積分を行なう場合にホイールの角速度をｓ倍する。これにより、ホイールは衛星の他の部分に比べ相対的に動きが速くなり、グラフィックス上の表示効果を損なうことはなくなる。

具体的には、前述の（４３）式において、次式のようにする。

$$\Theta_w(t+2\delta t) = \Theta_w(t+\delta t) + \{3S\dot{\Theta}_w(t+\delta t) - S\dot{\Theta}_w(t)\}\delta t/2 \quad (57)$$

以上、本項の処理の流れを図示すると、ＦＩＧ．１５のようになる。すなわち、ステップＤ１で、初期設定をしたあと、ステップＤ２で、ダイナミックス計算をし、更にステップＤ３で、グラフィックス表示を行なうのである。

次に、ホイールの回転をグラフィックスに表示するために、ホイール順動力学における二階積分を非常に簡便な数値積分で行なう方式として、ホイールに対する一階の数値積分と二階の数値積分の刻み幅を変え、二階数値積分を一階数値積分より粗計算で処理する方式において、ホイールの回転角を出来るだけ高速・高精度に求めるために、すべてのホイールの慣性モーメントを比例倍する方式について説明する。

この場合、上記と同様に、ホイールに対する一階の数値積分と二階の数値積分の刻み幅を変え、二階数値積分を一階数値積分より粗計算で処理する方式についてのアルゴリズムに対し、ＦＩＧ．１６に示すような処理を行なう。すなわち、ステップＥ１で、初期設定をしたあと、ステップＥ２で、ダイナミックス計算をし、更にステップＥ３で、ホィール系二階積分処理を行なうのである。なお、このステップＥ３では、前記（４８）式を次式として計算する。

$$\Theta_w(t+2S\delta t)=\Theta_w(t+S\delta t)+\left\{3U\dot{\Theta}_w(t+S\delta t)-U\dot{\Theta}_w(t)\right\}\times S\delta t/2 \qquad (58)$$

また、ホイールの回転をグラフィックスに表示するために、ホイール順動力学における二階積分を非常に簡便な数値積分で行なう方式として、ホイールに対する一階の数値積分と二階の数値積分の積分次数を変え、二階数値積分を一階数値積分より粗計算で処理する方式において、ホイールの回転角を出来るだけ高速・高精度に求めるために、すべてのホイ

ールの慣性モーメントを比例倍する方式について説明する。

この場合、上記と同様に、ホイールに対する一階の数値積分と二階の数値積分の積分次数を変え、二階数値積分を一階数値積分より粗計算で処理する方式についてのアルゴリズムに対し、ＦＩＧ．１７に示すような処理を行なう。すなわち、ステップＦ１で、初期設定をしたあと、ステップＦ２で、ダイナミックス計算をし、更にステップＦ３で、ホイール系二階積分処理を行なうのである。なお、このステップＦ３では、次式を計算する。

$$\Theta_w(t+3\delta t)=\Theta_w(t+2\delta t)+S\dot{\Theta}_w(t+2\delta t)\delta t \qquad (59)$$

さらに、ホイールの回転をグラフィックスに表示するために、ホイール順動力学における二階積分を非常に簡便な数値積分で行なう方式として、ホイールに対する一階の数値積分と二階の数値積分の刻み幅および積分次数を変え、二階数値積分を一階数値積分より粗計算で処理する方式において、ホイールの回転角を出来るだけ高速・高精度に求めるために、すべてのホイールの慣性モーメントを比例倍する方式について説明する。

この場合、上記と同様に、ホイールに対する一階の数値積分と二階の数値積分の刻み幅および積分次数を変え、二階数値積分を一階数値積分より粗計算で処理する方式についてのアルゴリズムに対し、ＦＩＧ．１８に示すような処理を行なう。すなわち、ステップＧ１で、初期設定をしたあと、ステップＧ２で、ダイナミックス計算をし、更にステップＧ３で、ホィール系二階積分処理を行なうのである。なお、このステップＧ３では、次式を計算する。

$$\Theta_w(t+2S\delta t)=\Theta_w(t+S\delta t)+U\dot{\Theta}_w(t+S\delta t)\delta t \qquad (60)$$

このようにして本実施例では、マニピュレータを有する衛星・宇宙ロボットにおいて姿勢制御系を包含したダイナミクスを高速に、即ち姿勢制御系を包含した宇宙機全体に対する3次元ダイナミクスをリアルタイムに計算し、その計算結果をディスプレイ上にリアルタイムに出力できるのである。

また、系全体の運動方程式を高速・高精度に解くことができ、これにより宇宙機全体に対する3次元ダイナミクスのリアルタイム計算を容易に実現できる。

（b）第2実施例の説明

次に、本発明の第2実施例について説明する。本実施例は、ＦＩＧ．１９に示すようなマニピュレータ１１を有する宇宙ロボットや人工衛星のごとき宇宙機１２の姿勢制御系に対する3次元ダイナミクスリアルタイムシミュレーションやホイールによる姿勢制御を行なうものである。尚、ＦＩＧ．１９において、１３はパドルである。

本装置は、ＦＩＧ．２０，ＦＩＧ．２１に示すように、l（このlは小文字のエルである）自由度シリアルリンクマニピュレータを有する衛星のための3次元ダイナミクスリアルタイムシミュレーションシステムをそなえるとともに、その動作のために必要な制御系２１０をそなえている。

なお、ＦＩＧ．２０に示す3次元ダイナミクスリアルタイムシミュレーションシステムは、前述の第1実施例と同様の、マニピュレータ関節情報入力部1，グラフィックスディスプレイ2及び3次元ダイナミクス

リアルタイムシミュレート部１０をそなえており、従って、第１実施例と同様のシミュレーションが行なえるようになっている。

また、ＦＩＧ．２１における制御系２１０は、大きく分けて姿勢制御系２４，マニピュレータ制御系２５，協調制御系２６の三つのパートからなる。

ここで、マニピュレータ制御系２５は、マニピュレータ関節情報入力部１（ＦＩＧ．２０参照）からの関節角時系列データを貰い（図３の①）、その経路に沿うように、宇宙機１２付きのマニピュレータ１１をサーボ制御する部分である。

このため、マニピュレータ制御系２５は、マニピュレータ駆動アクチュエータ２５・１をそなえるとともに、さらに、マニピュレータ駆動論理演算部２５・２を協調制御系２６と共用している。

このマニピュレータ駆動論理演算部２５・２は、マニピュレータ関節情報入力部１（図３の①）からの関節角時系列データおよび、姿勢制御系２４から協調制御系２６を介して来る姿勢角，姿勢角速度に基づいて、マニピュレータ１を駆動させるために必要なマニピュレータの関節角，角速度，角加速度を求め、これを電圧信号に変換して出力するものである。

マニピュレータ駆動アクチュエータ２５・１は、マニピュレータ駆動論理演算部２５・２よりの電圧信号の示す、目標経路（マニピュレータの関節角，角速度，角加速度）に沿うように駆動するものである。

そして、ここで、協調制御系２６，姿勢制御系２４の説明を行なう前に、これらの各装置の構成を説明するために使用される各式に用いられる記号、および、座標系の説明を行なう。

即ち、以後、ノーテーションを以下のように取るものとする。

$\mathbb{V}_i$ ；慣性座標系Σ_Aに対する座標系Σ_iの原点の速度

$\dot{\mathbb{V}}_i$ ；慣性座標系Σ_Aに対する座標系Σ_iの原点の加速度

$\hat{\mathbb{V}}_i$ ；慣性座標系Σ_Aに対するリンクｉの重心速度

$\dot{\hat{\mathbb{V}}}_i$ ；慣性座標系Σ_Aに対するリンクｉの重心加速度

Ω_i ；慣性座標系Σ_Aに対するリンクｉの角速度

$\dot{\Omega}_i$ ；慣性座標系Σ_Aに対するリンクｉの角加速度

v_i ；ベース固定座標系Σ_0に対するベクトルp_iの時間微分

$$v_i \equiv d_0 p_i / dt = p_i'$$

v_i' ；ベース固定座標系Σ_0に対するベクトルv_iの時間微分

$$v_i' \equiv d_0 v_i / dt = p_i''$$

$\hat{v}_i$ ；ベース固定座標系Σ_0に対するベクトル$\hat{r}_i$の時間微分

$$\hat{v}_i \equiv d_0 \hat{r}_i / dt = \hat{r}_i'$$

$\hat{v}_i'$ ；ベース固定座標系Σ_0に対するベクトル$\hat{v}_i$の時間微分

$$\hat{v}_i' \equiv d_0 \hat{v}_i / dt = \hat{r}_i''$$

ω_i ；ベース固定座標系Σ_0に対するリンクｉの角速度

ω_i' ；ベース固定座標系Σ_0に対するω_iの時間微分

$$\omega_i' \equiv d_0 \omega_i / dt$$

大文字；慣性座標系Σ_Aから見たベクトル

小文字；ベース固定座標系Σ_0から見たベクトル

注１）慣性座標系Σ_Aに対する時間微分とベース固定座標系Σ_0に対する時間微分とは明確に区別される。

ベクトル$\mathbb{X}$に対し、

Σ_Aに対する時間微分；　$\dot{\mathbb{X}} \equiv d\mathbb{X}/dt$

Σ_0に対する時間微分；　$\mathbb{X}' \equiv d_0 \mathbb{X}/dt$

$\dot{\mathbb{X}}$と$\mathbb{X}'$の関係は次式の通り

$$\dot{\mathbb{X}} = \mathbb{X}' + \Omega_0 \times \mathbb{X}$$

また、ＦＩＧ．２８は、Ｄｅｎａｖｉｔ－Ｈａｒｔｅｎｂｅｒｇ座標系を示したものである。そして、ＦＩＧ．２９から理解てきるように、このＦＩＧ．２８の座標系Σ_i，Σ_{i-1}で表示されたベクトルをそれぞれ${}^{i}a$，${}^{i-1}a$（このａは、表示上の都合でスカラ表示してあるだけで、実際はベクトルである。以後において、このような場合、スカラ表示であってもベクトルである場合がある。）と定義する時、${}^{i}a$，${}^{i-1}a$は、次式（Ａ１）で関係づけられる。（数式中の１は筆記体を使用する。）

$$ {}^{i-1}a = {}^{i-1}A_i \, {}^{i}a + {}^{i-1}\ell_i \qquad (A1) $$

ここで、式（Ａ１）の${}^{i-1}A_i$は、座標系間の回転を表す直交行列であり、${}^{i-1}l_i$（この１も表示上の都合でスカラ表示してあるだけで、先のａの場合と同様の扱いとする。）は、座標原点O_{i-1}からO_iへ至るベクトルをΣ_{i-1}系で表示したものである。

この${}^{i-1}A_i$，${}^{i-1}l_i$は、Ｄｅｎａｖｉｔ－Ｈａｒｔｅｎｂｅｒｇ座標系として、標準的パラメータを取る時、以下の式（Ａ２），（Ａ３）のように表現される。

$$ {}^{i-1}A_i \equiv \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i \end{bmatrix} \qquad (i = 1 \sim \ell) \qquad (A2) $$

$$ {}^{i-1}\ell_i \equiv \begin{bmatrix} b_i \cos\theta_i \\ b_i \sin\theta_i \\ d_i \end{bmatrix} \qquad (i = 1 \sim \ell) \qquad (A3) $$

そして、ＦＩＧ．３０により、ＦＩＧ．２９のＤｅｎａｖｉｔ－Ｈａ

ｒｔｅｎｂｅｒｇ座標系におけるパラメータの定義を示す。

この座標系は、次のような基準に従って設定される。

z_i 軸；関節ｉ＋１軸

x_i 軸；z_{i-1} からz_i に向けての共通垂線

y_i 軸；右手座標系となるように構成

b_i ；z_i，z_{i-1} 間の共通垂線の長さ

d_i ；x_i，x_{i-1} 間の長さ（z_{i-1} 座標値）

α_i ；z_i，z_{i-1} 間の角度（x_i 軸まわりにα_i 回転するとz_{i-1} 方向がz_i 方向と一致する。）

θ_i ；x_i，x_{i-1} 間の角度（z_{i-1} 軸回りにθ_i 回転するとx_{i-1} 方向がx_i 方向と一致する。）

但し、${}^{i}a$ においてｉ＝－１の時は、慣性系表示を表す。従って、以下の式（Ａ４），（Ａ５）が得られる。

$$ {}^{i}a\Big|_{i=-1} = {}^{A}a \qquad (A4) $$

$$ {}^{i}A\Big|_{i=-1} = {}^{A}A \qquad (A5) $$

この左肩添字Ａは、Ａｂｓｏｌｕｔｅ　ｃｏｏｒｄｉｎａｔｅの頭文字を意味する。特に、式（Ａ５）は、慣性系とベース基準座標系間の変換行列を表す。

尚、本実施例における数式、図以外において、時間の１回，２回微分を示す時は、ｄ／ｄｔ，d^2／dt^2 を用いる。

さて、ここで、協調制御系２６および姿勢制御系２４の説明に入るとする。

協調制御系２６は、マニピュレータ制御系２５と姿勢制御系２４とを

協調させ、衛星の姿勢制御性能を良好に保つものであり、マニピュレータ制御系２５と先に説明したマニピュレータ駆動論理演算部２５・２を共有するとともに、フィードフォーワード量演算部２６・１をそなえて構成されたものである。

このフィードフォーワード量演算部２６・１は、先述のマニピュレータ駆動論理演算部２５・２よりの出力を元にして、マニピュレータ１１からもたらされる外乱を補償するために、姿勢制御系２４のホイール制御系２７に渡す、フィードフォワード量を求め、これを出力するものである。

すなわち、フィードフォーワード量演算部２６・１は、マニピュレータ１１からもたらされる外乱を、それぞれの場合における特定の算出アルゴリズム（このアルゴリズムについては、後に詳述する）によって求めて、その値を姿勢制御系２４にフィードフォワード項として受け渡すものである。

そして、フィードフォーワード量演算部２６・１は、このフィードフォーワード量として、角運動量、または、それをモーメンタムホイール２３・１～２３・３（ホイール３）の質量で割ったホイール角速度を取り、モーメンタムホイール２３・１～２３・３の目標角運動量または目標角速度を、運動量／角運動量保存則から求めるようになっている。

さらに、フィードフォーワード量演算部２６・１は、上記の運動量／角運動量保存則の適用に当たって、宇宙機１２本体の角速度に対し、宇宙機１２本体の角速度が０という制約条件か、または、宇宙機１２本体の角速度が定数という制約条件、または、宇宙機１２本体の角速度が時間の任意関数という制約条件の中の何れか１つのものを課すようになっている。尚、これらの各制約条件は、全てベクトルである。

そして、この運動量／角運動量保存則、即ち、２つの方程式は、以下

の式（Ａ６），（Ａ７）に示される。

$$\sum_{i=0}^{k} m_i \hat{V}_i = Q \text{ (given constant)} \quad \text{；運動量保存則} \qquad (A6)$$

$$\sum_{i=0}^{k} (m_i \hat{R}_i \times \hat{V}_i + I_i \Omega_i) = L \text{ (given constant)} \quad \text{；角運動量保存則} \qquad (A7)$$

であるから、マニピュレータ関節角とホイール関節角とについて、以下のような、定義を行なう（本実施例では、説明を簡単にするため、モーメンタムホイール２３・１～２３・３の数を３つとしているのである）。

$$q = \begin{bmatrix} \Theta_m \\ \Theta_w \end{bmatrix},$$

$$\begin{cases} \Theta_m = [\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_k]^T & \text{；マニピュレータ関節角} \\ \Theta_w = [\theta_{w1}, \theta_{w2}, \theta_{w3}]^T & \text{；ホイール関節角} \end{cases}$$

この時、式（Ａ６），（Ａ７）は、以下の式（Ａ７－１）のように置き換えることができる。

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ \Omega_0 \end{bmatrix} = \$^{-1} \begin{bmatrix} h_v \\ h_\omega \end{bmatrix}, \quad \begin{cases} h_v = Q - \sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)}^{k} m_i \hat{v}_i \\ h_\omega = L - \sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)}^{k} (m_i \hat{R}_i \times \hat{v}_i + I_i \omega_i) \end{cases} \qquad (A7-1)$$

V_0 ：衛星本体の速度

Ω_0 ：衛星本体の角速度

尚、この式のＳ（このＳも表示上の都合でスカラ表示してあるだけで、先のａの場合と同様の扱いとする。）の定義は、以下に示す通りである。

$$\$ = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}$$

$$\$_{11} = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & M \end{bmatrix}, \quad M = \sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)}^{\ell} m_i \quad (\text{全質量})$$

注）$i=(0, w_1, w_2, w_3)$は、$i=0$の場合に、衛星本体，ホイール１，ホイール２，ホイール３についてｓｕｍｍａｔｉｏｎを行なうことを意味する。

$$S_{12} = \sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)}^{\ell} m_i \begin{bmatrix} 0 & \hat{r}_{zi} & -\hat{r}_{yi} \\ -\hat{r}_{zi} & 0 & \hat{r}_{xi} \\ \hat{r}_{yi} & -\hat{r}_{xi} & 0 \end{bmatrix}$$

$$S_{21} = -\sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)}^{\ell} m_i \begin{bmatrix} 0 & \hat{R}_{zi} & -\hat{R}_{yi} \\ -\hat{R}_{zi} & 0 & \hat{R}_{xi} \\ \hat{R}_{yi} & -\hat{R}_{xi} & 0 \end{bmatrix}$$

$$S_{22} = \sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)}^{\ell} \left\{ I_i + m_i \begin{bmatrix} \hat{R}_{zi}\hat{r}_{zi} + \hat{R}_{yi}\hat{r}_{yi} & -\hat{R}_{yi}\hat{r}_{xi} & -\hat{R}_{zi}\hat{r}_{xi} \\ -\hat{R}_{xi}\hat{r}_{yi} & \hat{R}_{zi}\hat{r}_{zi} + \hat{R}_{xi}\hat{r}_{xi} & -\hat{R}_{zi}\hat{r}_{yi} \\ -\hat{R}_{xi}\hat{r}_{zi} & -\hat{R}_{yi}\hat{r}_{zi} & \hat{R}_{yi}\hat{r}_{yi} + \hat{R}_{xi}\hat{r}_{xi} \end{bmatrix} \right\}$$

そして、この式（Ａ７－１）は、各関節角の微分を使って、形式上、以下の式（Ａ８）のようにすることができる。

$$\begin{bmatrix} \mathbb{V}_0 \\ \Omega_0 \end{bmatrix} = \mathbb{S}^{-1}\begin{bmatrix} \mathbb{Q} \\ \mathbb{L} \end{bmatrix} + \mathbb{H}_w^3\ \dot{\Theta}_w + \mathbb{H}_m^2\ \dot{\Theta}_m \qquad (\Lambda\ 8)$$

さらに、式（Ａ８）において、以下に示すような定義による条件を与える。

$\dot{\Theta}_m$ ＝その時の値、$\dot{\Theta}_w$ ＝０ならば

$$\begin{bmatrix} \mathbb{V}_0 \\ \Omega_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbb{V}_{00} \\ \Omega_{00} \end{bmatrix}$$

すると、先の式（Ａ８）から、次の式（Ａ９）が得られる。

$$\begin{bmatrix} \mathbb{V}_{00} \\ \Omega_{00} \end{bmatrix} = \mathbb{S}^{-1}\begin{bmatrix} \mathbb{Q} \\ \mathbb{L} \end{bmatrix} + \mathbb{H}_m^1\ \dot{\Theta}_m \qquad (\Lambda\ 9)$$

従って、これにより、次式（Ａ１０）を得る。

$$\mathbb{H}_w^3\ \dot{\Theta}_w = \begin{bmatrix} \mathbb{V}_0 \\ \Omega_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbb{V}_{00} \\ \Omega_{00} \end{bmatrix} \qquad (\Lambda\ 10)$$

また、次のように定義する。

$$\begin{bmatrix} \mathbb{Q} \\ \\ \mathbb{L} \end{bmatrix} = \mathbb{O},\ \dot{\Theta}_m = \mathbb{O},\ \dot{\Theta}_w = \mathbb{C};\ (i = 1,\ 2,\ 3)$$

ならば、

$$\begin{bmatrix} \mathbb{V}_0 \\ \\ \Omega_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbb{V}_{0i} \\ \\ \Omega_{0i} \end{bmatrix}$$

これにより、先の式（Ａ８）から、以下の式（Ａ１１）が求められる。

$$H_w^3 = \begin{bmatrix} V_{01} & V_{02} & V_{03} \\ \\ \Omega_{01} & \Omega_{02} & \Omega_{03} \end{bmatrix} \qquad (A11)$$

その結果、上記の式（Ａ１０），（Ａ１１）により、以下に示す、各モーメンタムホイール２３・１～２３・３に渡されるフィードフォーワード角速度の一般式（Ａ１２）が得られるのである。

$$\dot{\Theta}_w = [\Omega_{01}\ \ \Omega_{02}\ \ \Omega_{03}]^{-1}(\Omega_0 - \Omega_{00}) \qquad (A12)$$

そして、この場合のアルゴリズムＡＡは、ＦＩＧ．３１示すように、式（Ａ８）に基づいて衛星本体の速度と角速度とを求めるアルゴリズムであり、初期値設定（ステップＡＡ１）を施したのち、正順繰り返し計算（ステップＡＡ２）を行ない、さらに、ベース速度，角速度の計算（ステップＡＡ３）を行なうようになっているものである。

ここで、ＦＩＧ．３１に示す、各計算は、以下のような構成をとるものである。

即ち、初期値設定（ステップＡＡ１）は、以下の各演算によって構成されたものである。

$$\hat{R}_0 \Big|_{t=0} \quad ; given$$

$$\theta_i \Big|_{t=0} \quad ; given \ (i=1 \sim \ell)$$

$$\omega_0 = \omega_0' = 0, \ \hat{v}_0 = \hat{v}_0' = 0, \ v_0 = v_0' = 0$$

$${}^{i-1}Z_{i-1} = (0, 0, 1)^T$$

$$\hat{A}_0 \quad ; given$$

また、正順繰り返し計算（ステップＡＡ２）は、以下の各演算によって構成されたものである。

$$(j)\ {}^i\omega_i = \begin{cases} {}^iA_{i-1}\,({}^{i-1}\omega_{i-1} + \dot{\theta}_i\,{}^{i-1}Z_{i-1}) & for\ R \\ {}^iA_{i-1}\,{}^{i-1}\omega_{i-1} & for\ T \end{cases}$$

$$②\ {}^{i}\omega_{i}' = \begin{cases} {}^{i}A_{i-1}\left[{}^{i-1}\omega_{i-1} + \ddot{\theta}_{i}\,{}^{i-1}Z_{i-1} + \dot{\theta}_{i}\,{}^{i-1}\omega_{i-1} \times {}^{i-1}Z_{i-1}\right] & \text{for R} \\ {}^{i}A_{i-1}\,{}^{i-1}\omega_{i-1}' & \text{for T} \end{cases}$$

$$③\ {}^{i}v_{i} = \begin{cases} {}^{i}\omega_{i} \times {}^{i}\ell_{i} + {}^{i}A_{i-1}\,{}^{i-1}v_{i-1} & \text{for R} \\ {}^{i}\omega_{i} \times {}^{i}\ell_{i} + {}^{i}A_{i-1}\left(\dot{d}_{i}\,{}^{i-1}Z_{i-1} + {}^{i-1}v_{i-1}\right) & \text{for T} \end{cases}$$

$$④\ {}^{i}\hat{v}_{i} = {}^{i}v_{i} + {}^{i}\omega_{i} \times {}^{i}\hat{r}_{i}'$$

$$⑤\ {}^{i}v_{i}' = \begin{cases} {}^{i}\omega_{i} \times {}^{i}\ell_{i} + {}^{i}\omega_{i} \times \left({}^{i}\omega_{i} \times {}^{i}\ell_{i}\right) + {}^{i}A_{i-1}\,{}^{i-1}v_{i-1}' & \text{for R} \\ {}^{i}A_{i-1}\left(\ddot{d}_{i}\,{}^{i-1}Z_{i-1} + {}^{i-1}v_{i-1}'\right) + {}^{i}\omega_{i}' \times {}^{i}\ell_{i} + 2\dot{d}_{i}\,{}^{i}\omega_{i} \times \left({}^{i}A_{i-1}\,{}^{i-1}Z_{i-1}\right) + {}^{i}\omega_{i} \times \left({}^{i}\omega_{i} \times {}^{i}\ell_{i}\right) & \text{for T} \end{cases}$$

$$⑥\ {}^{i}\hat{v}_{i}' = {}^{i}v_{i}' + {}^{i}\omega_{i}' \times {}^{i}\hat{r}_{i}' + {}^{i}\omega_{i} \times \left({}^{i}\omega_{i} \times {}^{i}\hat{r}_{i}'\right)$$

$$⑦\ {}^{i}\hat{r}_{i} = {}^{i}\hat{r}_{i}' + {}^{i}\ell_{i} - {}^{i}A_{i-1}\,{}^{i-1}\hat{r}_{i-1}' + {}^{i}A_{i-1}\,{}^{i-1}\hat{r}_{i-1}$$

⑧ ${}^{\wedge}\mathbb{A}_i = {}^{\wedge}\mathbb{A}_{i-1} \; {}^{i-1}\mathbb{A}_i$

⑨ ${}^{\wedge}\hat{\mathbb{r}}_i = {}^{\wedge}\mathbb{A}_i \; {}^{i}\hat{\mathbb{r}}_i$

⑩ ${}^{\wedge}\hat{\mathbb{R}}_i = {}^{\wedge}\hat{\mathbb{r}}_i - (1/M) \times \sum_{i=(1,w_1,w_2,w_3)}^{\ell} m_i \; {}^{\wedge}\hat{\mathbb{r}}_i + ({}^{\wedge}\mathbb{Q}_1 + \mathbb{C}) / M$

更に、ベース速度，角速度の計算（ステップＡＡ３）は、以下の各演算によって構成されたものである。

①${}^{\wedge}S_{12}$の計算

②${}^{\wedge}S_{21}$の計算

③ ${}^{\wedge}\mathbb{I}_i = {}^{\wedge}\mathbb{A}_i \; {}^{i}\mathbb{I}_i \; {}^{i}\mathbb{A}_{\wedge}$

④ ${}^{\wedge}S_{22} = \sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)} \left\{ {}^{\wedge}\mathbb{A}_i \; {}^{i}\mathbb{I}_i \; {}^{i}\mathbb{A}_{\wedge} - m_i \; {}^{\wedge}\hat{\mathbb{R}}_i \; {}^{\wedge}\hat{\mathbb{r}}_i \right\}$

⑤ ${}^{\wedge}\mathbb{h}_v = {}^{\wedge}\mathbb{Q} - \sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)}^{\ell} m_i \; {}^{\wedge}\hat{\mathbb{v}}_i$

⑥ ${}^{\wedge}\mathbb{h}_\omega = {}^{\wedge}\mathbb{L} - \sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)}^{\ell} (m_i \; {}^{\wedge}\hat{\mathbb{R}}_i \times {}^{\wedge}\hat{\mathbb{v}}_i + {}^{\wedge}\mathbb{A}_i \; {}^{i}\mathbb{I}_i \; {}^{i}\omega_i)$

⑦ $$\begin{bmatrix} {}^{\wedge}\mathbb{V}_0 \\ {}^{\wedge}\Omega_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & {}^{\wedge}S_{12} \\ {}^{\wedge}S_{21} & {}^{\wedge}S_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} {}^{\wedge}\mathbb{h}_v \\ {}^{\wedge}\mathbb{h}_\omega \end{bmatrix}$$

尚、このアルゴリズムＡＡの各演算では、以下の定義がされる。

$\hat{R}$; $\hat{\ }$ の定義

一般に、ベクトル $\underline{a} \times \underline{b} = \underline{\mathbb{b}}\, a$

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_y b_z - a\ b_y \\ a_z b_x - a_x b_z \\ a_x b_y - a_y b \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & b_z & -b_y \\ -b_z & 0 & b_x \\ b_y & -b_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}$$

ゆえに、

$$\underline{\mathbb{b}} \equiv \begin{bmatrix} 0 & b_z & -b_y \\ -b_z & 0 & b_x \\ b_y & -b_x & 0 \end{bmatrix}$$

つまり、このフィードフォーワード量演算部２６・１は、上記の制約条件の場合、式（Ａ８）に基づいて、衛星本体の速度と角速度とを求めるアルゴリズムＡＡを４回繰り返し、最後に、式（Ａ１２）に制約条件を入れた式による３×３行列の逆を取ることにより、この条件下でのフィードフォーワード角速度を求めるようになっているのである。

以下、実際に、フィードフォーワード量演算部２６・１が、フィードフォワード量として、ホイール角速度を取る場合の上述の各制約条件毎におけるフィードフォーワード角速度（衛星本体の姿勢を一定値に保持するため、各モーメンタムホイール２３・１～２３・３に渡されるフィードフォーワード値）の求め方が、どのようになっているかを順次説明していく。

〔１〕．まず、フィードフォーワード量演算部２６・１が、上記の運

動量／角運動量保存則の適用に当たって、宇宙機１２本体の角速度に０という制約条件を課す場合を説明する（即ち、制約条件が$\Omega_0 = 0$の場合。尚、これらのΩ_0，０も表示上の都合でスカラ表示してあるだけで、先のベクトルａの場合と同様の扱いとする）。

この場合、フィードフォーワード量演算部２６・１は、上記のフィードフォーワード角速度の一般式（Ａ１２）の右辺にある衛星本体の角速度Ω_0に、制約条件０を代入することにより、この条件下でのフィードフォーワード角速度を表す、以下の式（Ａ１３）を求めるようになっている。

$$\dot{\Theta}_w = -\left[\Omega_{01} \quad \Omega_{02} \quad \Omega_{03}\right]^{-1}\Omega_{00} \qquad (A13)$$

そして、フィードフォーワード量演算部２６・１は、式（Ａ８）に基づいて、先述の衛星本体の速度と角速度とを求めるアルゴリズムＡＡを４回繰り返し、最後に、式（Ａ１３）による３×３行列の逆を取ることにより、式（Ａ１３）の左辺の値、つまり、この条件下でのフィードフォーワード角速度を求めるようになっているのである。

〔２〕．次に、フィードフォーワード量演算部２６・１が、上記の運動量／角運動量保存則の適用に当たって、宇宙機１２本体の角速度に対し、宇宙機１２本体の角速度が定数という制約条件を課す場合を説明する（即ち、制約条件が$\Omega_0 = C$（ｇｉｖｅｎ　ｃｏｎｓｔａｎｔ）の場合。尚、このＣも表示上の都合でスカラ表示してあるだけで、先のベクトルａの場合と同様の扱いとする）。

この場合、フィードフォーワード量演算部２６・１は、式（Ａ１２）の右辺にある衛星本体の角速度Ω_0に、制約条件として定数Ｃを代入することにより、この条件下でのフィードフォーワード角速度を表す、以

下の式（Ａ１４）を求めるようになっている。

$$\dot{\Theta}_w = -[\,\Omega_{01}\ \ \Omega_{02}\ \ \Omega_{03}\,]^{-1}(\mathbb{C} - \Omega_{00}) \qquad (A14)$$

そして、フィードフォーワード量演算部２６・１は、この式（Ａ１４）と、式（Ａ８）および、衛星本体の速度と角速度とを求めるアルゴリズムＡを用いて、先と同様の要領で、式（Ａ１４）の左辺の値、つまり、この条件下でのフィードフォーワード角速度を求めるようになっているのである。

〔３〕．また、フィードフォーワード量演算部２６・１が、上記の運動量／角運動量保存則の適用に当たって、宇宙機１２本体の角速度に対し、宇宙機１２本体の角速度が時間ｔの任意関数という制約条件を課す場合を説明する（即ち、制約条件が$\Omega_0 = u(t)$（ｕ：ｇｉｖｅｎ ｆｕｎｃｔｉｏｎ ｏｆ ｔ）の場合。尚、このｕも表示上の都合でスカラ表示してあるだけで、先のベクトルａの場合と同様の扱いとする）。

この場合、フィードフォーワード量演算部２６・１は、式（Ａ１２）の右辺にある衛星本体の角速度Ω_0に、制約条件として時間の任意関数ｕ（ｔ）を代入することにより、この条件下でのフィードフォーワード角速度を表す、以下の式（Ａ１５）を求めるようになっている。

$$\dot{\Theta}_w = -[\,\Omega_{01}\ \ \Omega_{02}\ \ \Omega_{03}\,]^{-1}(u(t) - \Omega_{00}) \qquad (A15)$$

そして、フィードフォーワード量演算部２６・１は、この式（Ａ１５）と、式（Ａ８）および、衛星本体の速度と角速度とを求めるアルゴリズムＡＡを用いて、再び、制約条件が宇宙機１２本体の角速度が０の場合と同様の要領で、式（Ａ１５）の左辺の値、つまり、この条件下で

のフィードフォーワード角速度を求めるようになっているのである。

以上が、フィードフォーワード量演算部２６・１による、フィードフォワード量としてホイール角速度を取る場合の、各制約条件毎におけるフィードフォーワード角速度の求め方の手法を示したものである。

また、このフィードフォーワード量演算部２６・１は、フィードフォーワード量として角運動量を取る場合において、上述の各制約条件下において求めたフィードフォーワード角速度に、モーメンタムホイール２３・１～２３・３の質量を掛けたものをフィードフォーワード角運動量として出力するようになっているのである。

ところで、また、フィードフォーワード量演算部２６・１は、マニピュレータ１１からもたらされる外乱を補償するために、姿勢制御系２４のホイール制御系２７に渡す、フィードフォワード量として、角運動量またはホイール角速度の代わりにトルクを取り、その値を宇宙用逆動力学により求めて、姿勢制御系アクチュエータ２４・１を制御することも可能なものである。

すなわち、フィードフォーワード量演算部２６・１は、このようにトルクを取る場合、マニピュレータ１からもたらされる外乱を特定の算出アルゴリズムＡＢ（このアルゴリズムについては、後に詳述する。）によって求め、その値を姿勢制御系２４にフィードフォワード項として受け渡すのである。

そして、この場合、フィードフォーワード量演算部２６・１は、上記の宇宙用逆動力学の適用に当たって、宇宙機１２本体の角加速度に対し、宇宙機１２本体の角加速度が０という制約条件か、または、宇宙機１２本体の角加速度が時間の任意関数という制約条件かの何れかを課すようになっている。

あるいはまた、フィードフォーワード量演算部２６・１は、上記の宇

宙用逆動力学の適用に当たって、宇宙機１２本体の角速度および角加速度に対し、次の各制約条件の何れか１つを課すようになっている。

つまり、その制約条件とは、宇宙機１２本体の角速度、角加速度がそれぞれ０という制約条件か、または、宇宙機１２本体の角速度が定数で、宇宙機１２本体の角加速度が０という制約条件、または、宇宙機１２本体の角速度、角加速度がそれぞれ時間の任意関数という制約条件である。尚、これらの各制約条件は、全てベクトルである。

そして、このように、ホイールトルクをフィードフォワード量とする場合においての宇宙用逆動力学における基本となる式は、上述の式（Ａ６），（Ａ７）に示される、上記の運動量／角運動量保存則の微分、即ち、内力，内部トルクの総和＝ゼロの式である〔以下の式（Ａ１６），（Ａ１７）〕。

$$\sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)}^{\ell} m_i \dot{\hat{V}}_i = 0 \qquad (A16)$$

$$\sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)}^{\ell} (m_i \hat{R}_i \times \dot{\hat{V}}_i + d(I_i \Omega_i)/dt) = 0 \qquad (A17)$$

また、これらの式（Ａ１６），（Ａ１７）は、以下の式（Ａ１８），（Ａ１９）のように書き換えられる。

$$\sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)}^{\ell} F_i = 0 \qquad (A18)$$

$$\sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)}^{\ell} (\hat{R}_i \times F_i + N_i) = 0 \qquad (A19)$$

さらに、式（Ａ１８），（Ａ１９）は、以下の式（Ａ２０），（Ａ２１）のように書き換えられる。

$$\dot{\Omega}_i = \dot{\Omega}_0 + \dot{\omega}_i = \dot{\Omega}_0 + \omega_i' + \Omega_0 \times \omega_i \qquad (A20)$$

$$\dot{\hat{V}}_i = \dot{V}_0 + \dot{\Omega}_0 \times \hat{r}_i + 2\Omega_0 \times \hat{v}_i + \Omega_0 \times (\Omega_0 \times \hat{r}_i) + \hat{v}_i' \qquad (A21)$$

そして、これらの式（Ａ２０），（Ａ２１）を使い、先の式（Ａ１６），（１７）を変形すると、以下のような各式（Ａ２２），（Ａ２３），（Ａ２４）が得られる。

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{\Omega}_0 \end{bmatrix} = \mathbb{S}^{-1} \begin{bmatrix} -\sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)}^{\ell} \mathcal{F}_i \\ -\sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)}^{\ell} (\hat{R}_i \times \mathcal{F}_i + \mathcal{N}_i) \end{bmatrix} + \mathbb{S}^{-1} \begin{bmatrix} F_{OUT} \\ N_{OUT} \end{bmatrix} \qquad (A22)$$

$$\begin{cases} \mathcal{F}_i = m_i (2\Omega_0 \times \hat{v}_i + \Omega_0 \times (\Omega_0 \times \hat{r}_i) + \hat{v}_i') & (A23) \\ \mathcal{N}_i = I_i \omega_i' + I_i \Omega_0 \times \omega_i + \Omega_i \times (I_i \Omega_i) & (A24) \end{cases}$$

F_{OUT} ：外力の総和

N_{OUT} ：外部トルクの総和

また、さらに、この式（Ａ２２）から、ホイールに渡すフィードフォワードトルクを次のように求める。即ち、式（Ａ２２）を式（Ａ８）と同様の形式に変形すると、以下の式（Ａ２５）が得られる。

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \\ \dot{\Omega}_0 \end{bmatrix} = S^{-1} \begin{bmatrix} F_{OUT} \\ \\ N_{OUT} \end{bmatrix} + \mathbb{G}_w{}^3 \ddot{\Theta}_w + \mathbb{K}_w{}^3 \dot{\Theta}_w + \mathbb{G}_m{}^{\ell} \ddot{\Theta}_m + \mathbb{K}_m{}^{\ell} \dot{\Theta}_m$$

（Λ２５）

この式（Ａ２５）において、以下のように定義する。

$\dot{\Theta}_w$ ＝その時の値
$\ddot{\Theta}_m$ ＝その時の値
$\dot{\Theta}_m$ ＝その時の値
$\ddot{\Theta}_w$ ＝０

ならば $\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \\ \dot{\Omega}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_{00} \\ \\ \dot{\Omega}_{00} \end{bmatrix}$

$\dot{V}_0$ ：衛星本体の加速度
$\dot{\Omega}_0$ ：衛星本体の角加速度

その結果、次式（Ａ２６）が得られる。

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{00} \\ \\ \dot{\Omega}_{00} \end{bmatrix} = S^{-1} \begin{bmatrix} F_{OUT} \\ \\ N_{OUT} \end{bmatrix} + \mathbb{K}_w{}^3 \dot{\Theta}_w + G_m{}^{\ell} \ddot{\Theta}_m + \mathbb{K}_m{}^{\ell} \dot{\Theta}_m$$

（Λ２６）

従って、以下の式（Ａ２７）が得られる。

$$G_w{}^3 \ddot{\Theta}_w = \begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \\ \dot{\Omega}_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{V}_{00} \\ \\ \dot{\Omega}_{00} \end{bmatrix}$$

（Λ２７）

そして、先の式（Ａ２５）において、以下のように定義する。

$$\begin{bmatrix} F_{OUT} \\ N_{OUT} \end{bmatrix} = 0,\ \dot{\Theta}_w = 0,\ \ddot{\Theta}_m = \dot{\Theta}_m = 0,\ \ddot{\Theta}_w = c_i \qquad (i = 1,\ 2,\ 3)$$

ならば、

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{\Omega}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_{0i} \\ \dot{\Omega}_{0i} \end{bmatrix}$$

すると、次式（Ａ２８）が得られる。

$$G_w^{\ 3} = \begin{bmatrix} \dot{V}_{01} & \dot{V}_{02} & \dot{V}_{03} \\ \dot{\Omega}_{01} & \dot{\Omega}_{02} & \dot{\Omega}_{03} \end{bmatrix} \qquad (A28)$$

このような、式（Ａ２７），（Ａ２８）により、以下に示す、式（Ａ２９）が得られる。

$$\ddot{\Theta}_w = [\dot{\Omega}_{01} \quad \dot{\Omega}_{02} \quad \dot{\Omega}_{03}]^{-1} (\dot{\Omega}_0 - \dot{\Omega}_{00}) \qquad (A29)$$

そして、ＦＩＧ．３２に示す、式（Ａ２２）に基づいて、衛星本体の加速度および角加速度を求めるアルゴリズムＡＢは、先のフィードフォーワード量としてホイール角速度を取る場合のアルゴリズムＡＡの運動量／角運動量保存則から、衛星本体の速度と角速度とを求め、その値を式（Ａ２２）に適用する構成になっているものである。

つまり、このアルゴリズムＡＢは、初期値設定（ステップＡＢ１）を

施したのち、正順繰り返し計算（ステップＡＢ２）を行ない、さらに、ベース速度，角速度の計算（ステップＡＢ３）を行なったのち、ベース加速度，角加速度の計算（ステップＡＢ４）を行なうようになっているのである。

ここで、ＦＩＧ．３２に示す、各計算は、以下に示すような構成のものである。

即ち、初期値設定（ステップＡＢ１）は、以下の各演算によって構成されたものである。

$$\hat{R}_0 \Big|_{t=0} \quad ; \mathrm{given}$$

$$\theta_i \Big|_{t=0} \quad ; \mathrm{given}\ (i=1\sim\ell)$$

$$\omega_0 = \omega_0' = 0,\ \hat{v}_0 = \hat{v}_0' = 0,\ v_0 = v_0' = 0$$

$${}^{i-1}Z_{i-1} = (0,\ 0,\ 1)^T$$

$$\Lambda_0 \quad ; \mathrm{given}$$

また、正順繰り返し計算（ステップＡＢ２）は、以下の各演算によって構成されたものである。

$$\text{①}\ {}^{i}\omega_{i} = \begin{cases} {}^{i}\Lambda_{i-1}\ ({}^{i-1}\omega_{i-1} + \dot{\theta}_{i}\ {}^{i-1}Z_{i-1}) & \text{for R} \\ {}^{i}\Lambda_{i-1}\ {}^{i-1}\omega_{i-1} & \text{for T} \end{cases}$$

$$\text{②}\ {}^{i}\omega_{i}' = \begin{cases} {}^{i}\Lambda_{i-1}\ \{{}^{i-1}\omega_{i-1}' + \ddot{\theta}_{i}\ {}^{i-1}Z_{i-1} \\ \qquad + \dot{\theta}_{i}\ {}^{i-1}\omega_{i-1} \times {}^{i-1}Z_{i-1}\} & \text{for R} \\ {}^{i}\Lambda_{i-1}\ {}^{i-1}\omega_{i-1}' & \text{for T} \end{cases}$$

$$\text{③}\ {}^{i}v_{i} = \begin{cases} {}^{i}\omega_{i} \times {}^{i}\ell_{i} + {}^{i}\Lambda_{i-1}\ {}^{i-1}v_{i-1} & \text{for R} \\ {}^{i}\omega_{i} \times {}^{i}\ell_{i} \\ \quad + {}^{i}\Lambda_{i-1}\ (\dot{d}_{i}\ {}^{i-1}Z_{i-1} + {}^{i-1}v_{i-1}) & \text{for T} \end{cases}$$

$$\text{④}\ {}^{i}\hat{v}_{i} = {}^{i}v_{i} + {}^{i}\omega_{i} \times {}^{i}\hat{r}_{i}$$

$$\text{⑤}\ {}^{i}v_{i}' = \begin{cases} {}^{i}\omega_{i}' \times {}^{i}\ell_{i} + {}^{i}\omega_{i} \times ({}^{i}\omega_{i} \times {}^{i}\ell_{i}) \\ \qquad + {}^{i}\Lambda_{i-1}\ {}^{i-1}v_{i-1}' & \text{for R} \\ {}^{i}\Lambda_{i-1}\ (\ddot{d}_{i}\ {}^{i-1}Z_{i-1} + {}^{i-1}v_{i-1}') \\ \quad + {}^{i}\omega_{i}' \times {}^{i}\ell_{i} \\ \quad + 2\dot{d}_{i}\ {}^{i}\omega_{i} \times ({}^{i}\Lambda_{i-1}\ {}^{i-1}Z_{i-1}) \\ \quad + {}^{i}\omega_{i} \times ({}^{i}\omega_{i} \times {}^{i}\ell_{i}) & \text{for T} \end{cases}$$

$$\text{⑥}\ {}^{i}\hat{v}_{i}' = {}^{i}v_{i}' + {}^{i}\omega_{i}' \times {}^{i}\hat{r}_{i} + {}^{i}\omega_{i} \times ({}^{i}\omega_{i} \times {}^{i}\hat{r}_{i})$$

$$⑦\ {}^{i}\hat{\mathbb{r}}_{i} = {}^{i}\hat{\mathbb{r}}_{i}' + {}^{i}\ell_{i} - {}^{i}A_{i-1}\ {}^{i-1}\hat{\mathbb{r}}_{i-1}' + {}^{i}A_{i-1}\ {}^{i-1}\hat{\mathbb{r}}_{i-1}$$

$$⑧\ {}^{A}\mathbb{A}_{i} = {}^{A}\mathbb{A}_{i-1}\ {}^{i-1}A_{i}$$

$$⑨\ {}^{A}\hat{\mathbb{r}}_{i} = {}^{A}\mathbb{A}_{i}\ {}^{i}\hat{\mathbb{r}}_{i}$$

$$⑩\ {}^{A}\hat{\mathbb{R}}_{i} = {}^{A}\hat{\mathbb{r}}_{i}' - (1/M) \times \sum_{i=(1,w_1,w_2,w_3)}^{\ell} m_i\ {}^{A}\hat{\mathbb{r}}_{i} + (\mathbb{Q}t + \mathbb{C})/M$$

更に、ベース速度，角速度の計算（ステップＡＢ３）は、以下の各演算によって構成されたものである。

①${}^{A}S_{12}$の計算

②${}^{A}S_{21}$の計算

$$③\ {}^{A}\mathbb{I}_{i} = {}^{A}\mathbb{A}_{i}\ {}^{i}\mathbb{I}_{i}\ {}^{i}A_{A}$$

$$④\ {}^{A}S_{22} = \sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)}^{\ell} \left\{ {}^{A}\mathbb{A}_{i}\ {}^{i}\mathbb{I}_{i}\ {}^{i}A_{A} - m_i\ {}^{A}\hat{\underline{\mathbb{R}}}_{i}\ {}^{A}\hat{\underline{\mathbb{r}}}_{i} \right\}$$

$$⑤\ {}^{A}\mathbb{h}_{v} = {}^{A}\mathbb{Q} - \sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)}^{\ell} m_i\ {}^{A}\hat{\mathbb{v}}_{i}$$

$$⑥\ {}^{A}\mathbb{h}_{\omega} = {}^{A}\mathbb{L} - \sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)}^{\ell} (m_i\ {}^{A}\hat{\mathbb{R}}_{i} \times {}^{A}\hat{\mathbb{v}}_{i} + {}^{A}\mathbb{A}_{i}\ {}^{i}\mathbb{I}_{i}\ {}^{i}\omega_{i})$$

$$⑦\quad \begin{bmatrix} {}^{A}\mathbb{V}_{0} \\ {}^{A}\Omega_{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & {}^{A}S_{12} \\ {}^{A}S_{21} & {}^{A}S_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} {}^{A}\mathbb{h}_{v} \\ {}^{A}\mathbb{h}_{\omega} \end{bmatrix}$$

そして、ベース加速度，角加速度の計算（ステップＡＢ４）は、以下の各演算によって構成されたものである。

① $^{\wedge}\hat{\dot{v}}_i' = {}^{\wedge}A_i \; {}^{i}\hat{\dot{v}}_i'$

② $^{\wedge}\mathcal{F}_i = m_i \; (2\,{}^{\wedge}\Omega_0 \times {}^{\wedge}\hat{v}_i + {}^{\wedge}\Omega_0 \times ({}^{\wedge}\Omega_0 \times {}^{\wedge}\hat{r}_i) + {}^{\wedge}\hat{\dot{v}}_i')$

③ $^{i}\Omega_0 = {}^{i}A_{\wedge} \; {}^{\wedge}\Omega_0$

④ $^{i}\Omega_i = {}^{i}\Omega_0 + {}^{i}\omega_i$

⑤ $^{\wedge}\mathcal{N}_i = {}^{\wedge}A_i \; {}^{i}I_i \; {}^{i}\omega_i' + {}^{\wedge}\Lambda_i \; {}^{i}I_i \; {}^{i}\Omega_0 \times {}^{i}\omega_i + {}^{\wedge}\Lambda_i \; {}^{i}\Omega_i \times ({}^{i}I_i \; {}^{i}\Omega_i)$

⑥ $-\sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)}^{t} {}^{\wedge}\mathcal{F}_i \equiv {}^{\wedge}W_f$

⑦ $-\sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)}^{t} ({}^{\wedge}\hat{R}_i \times {}^{\wedge}\mathcal{F}_i + {}^{\wedge}\mathcal{N}_i) \equiv {}^{\wedge}W_n$

⑧ $$\begin{bmatrix} {}^{\wedge}\dot{V}_0 \\ {}^{\wedge}\dot{\Omega}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & {}^{\wedge}S_{12} \\ {}^{\wedge}S_{21} & {}^{\wedge}S_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} {}^{\wedge}W_f \\ {}^{\wedge}W_n \end{bmatrix}$$

即ち、フィードフォーワード量演算部２６・１は、フィードフォワード量として、ホイールトルクを取る場合、上記の式（Ａ２２），（Ａ２９）および、アルゴリズムＡＢを利用することにより、目標角速度であるフィードフォーワードトルクを求めるようになっている。

以下、実際に、フィードフォーワード量演算部２６・１が、フィードフォワード量として、ホイールトルクを取る場合の上述の各制約条件毎におけるフィードフォーワードトルク（衛星本体の姿勢を一定値に保持するため、各モーメンタムホイール２３・１～２３・３に渡されるフィードフォーワード値）を求める際の演算手順が、どのようになっているかを順次説明していく。

〔４〕．まず、フィードフォーワード量演算部２６・１が、上記の宇宙用逆動力学の適用に当たって、宇宙機１２本体の角加速度に０という制約条件を課す場合を説明する（即ち、制約条件が$d\Omega_0/dt=0$の場合）。

この場合、フィードフォーワード量演算部２６・１は、上記のフィードフォーワードトルクの一般式（Ａ２９）の右辺にある衛星本体の角加速度$d\Omega_0/dt$に、制約条件０を代入することにより、以下の式（Ａ３０）を求めるようになっている。

$$\ddot{\Theta}_w = -[\dot{\Omega}_{01} \quad \dot{\Omega}_{02} \quad \dot{\Omega}_{03}]^{-1}\dot{\Omega}_{00} \qquad (A30)$$

更に、フィードフォーワード量演算部２６・１は、この式（Ａ３０）に、各ホイールの回転軸方向のイナーシャI_{3wi}を掛けることにより、各ホイールに渡すべきフィードフォワードトルクを示す、以下の式（Ａ３１）を得るようになっている。

フィードフォワードトルク

$$\tau_w = \begin{bmatrix} I_{3w1}\ \ddot{\theta}_{w1} \\ I_{3w2}\ \ddot{\theta}_{w2} \\ I_{3w3}\ \ddot{\theta}_{w3} \end{bmatrix} \qquad (A31)$$

回転軸方向のイナーシャ；I_{3wi}

そして、フィードフォーワード量演算部２６・１は、上記の処理ののち、式（Ａ２２）に基づいて、衛星本体の加速度と角加速度とを求めるアルゴリズムＡＢを４回繰り返し、式（Ａ３０）で３×３の逆行列を取り、式（３１）でイナーシャを掛けることにより、式（Ａ３１）の示す、この条件下でのフィードフォーワードトルクを求めるようになっているのである。

あるいは、フィードフォーワード量演算部２６・１は、予め、式（Ａ３０）にイナーシャI_{3wi}を掛けた式に、制約条件を入れて、そのフィードフォーワードトルクを求めるようになっているのである。

〔５〕．次に、フィードフォーワード量演算部２６・１が、上記の宇宙用逆動力学の適用に当たって、宇宙機１２本体の角速度に対し、宇宙機１２本体の角速度、角加速度がそれぞれ０という制約条件を課す場合を説明する（即ち、制約条件が、$\Omega_0 = 0$，$d\Omega_0 / dt = 0$の場合）。

ところで、この場合、先述の式（Ａ１２）の右辺にある衛星本体の角速度Ω_0に、制約条件として０を代入することにより、この条件下でのホイールの角速度を表す、以下の式（Ａ３２）が求められる。尚、この式（Ａ３２）は、先の式（Ａ１３）と同様のものである。

$$\dot{\Theta}_w = -[\ \Omega_{01}\ \ \Omega_{02}\ \ \Omega_{03}\ ]^{-1}\ \Omega_{00} \qquad (A32)$$

また、式（Ａ２５）によって、式（Ａ３２）から、以下の式（Ａ３３）が求められる。

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{\Omega}_0 \end{bmatrix} = S^{-1} \begin{bmatrix} F_{OUT} \\ N_{OUT} \end{bmatrix} + \mathbb{G}_w{}^3 \ddot{\Theta}_w + \mathbb{K}_w{}^3 \dot{\Theta}_w + \mathbb{G}_m{}^l \ddot{\Theta}_m + \mathbb{K}_m{}^l \dot{\Theta}_m \qquad (A33)$$

そして、この式（Ａ３３）において、以下のように定義する。

$\ddot{\Theta}_m$ ＝その時の値
$\dot{\Theta}_m$ ＝その時の値
$\dot{\Theta}_w = -\left[\Omega_{01} \quad \Omega_{02} \quad \Omega_{03}\right]^{-1} \Omega_{00}$ （Ａ３２）
$\ddot{\Theta}_w = 0$
ならば、

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{\Omega}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_{00} \\ \dot{\Omega}_{00} \end{bmatrix}$$

その結果、式（Ａ３３）は、以下に示す、式（Ａ３４）のようになる。

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{00} \\ \dot{\Omega}_{00} \end{bmatrix} = S^{-1} \begin{bmatrix} F_{OUT} \\ N_{OUT} \end{bmatrix} + \mathbb{K}_w{}^3 \dot{\Theta}_w + \mathbb{G}_m{}^l \ddot{\Theta}_m + \mathbb{K}_m{}^l \dot{\Theta}_m \qquad (A34)$$

従って、以下の式（Ａ３５）が得られる。

$$\mathbb{G}_w{}^3 \ddot{\Theta}_w = \begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{\Omega}_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{V}_{00} \\ \dot{\Omega}_{00} \end{bmatrix} \qquad (A35)$$

そして、式（Ａ３５）のＧ$_w{}^3$の成分を求めるために、式（Ａ３３）において、以下の条件を定義する。尚、このＧも表示上の都合でスカラ表示してあるだけで、先のベクトルａの場合と同様の扱いとする。

$$\begin{bmatrix} F_{OUT} \\ N_{OUT} \end{bmatrix} = 0,\ \dot{\Theta}_w = 0,\ \ddot{\Theta}_m = \dot{\Theta}_m = 0,\ \ddot{\Theta}_w = e_i \quad (i = 1,\ 2,\ 3)$$

ならば、

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{\Omega}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_{0i} \\ \dot{\Omega}_{0i} \end{bmatrix}$$

すると、以下の式（Ａ３６）を得る。

$$G_w{}^3 = \begin{bmatrix} \dot{V}_{01} & \dot{V}_{02} & \dot{V}_{03} \\ \dot{\Omega}_{01} & \dot{\Omega}_{02} & \dot{\Omega}_{03} \end{bmatrix} \qquad (A36)$$

このような、上記のような式（Ａ３５），（Ａ３６）により、次式（Ａ３７）が得られる。

$$\ddot{\Theta}_w = [\dot{\Omega}_{01}\ \ \dot{\Omega}_{02}\ \ \dot{\Omega}_{03}]^{-1}(\dot{\Omega}_0 - \dot{\Omega}_{00}) \qquad (A37)$$

ここで、もうひとつの拘束条件、衛星本体の角加速度ｄΩ$_0$／ｄｔ＝０を課すと、式（Ａ３７）は、次式（Ａ３８）のようになる。

$$\ddot{\Theta}_w = -[\dot{\Omega}_{01}\ \ \dot{\Omega}_{02}\ \ \dot{\Omega}_{03}]^{-1}\dot{\Omega}_{00} \qquad (A38)$$

即ち、この式（Ａ３８）に各ホイールの回転軸方向のイナーシャI_{3w_i}を掛けた値が、各ホイールに渡すべきフィードフォワードトルクである。これを次式（Ａ３９）に示す。

フィードフォワードトルク

$$\tau_w = \begin{bmatrix} I_{3w1} & \ddot{\theta}_{w1} \\ I_{3w2} & \ddot{\theta}_{w2} \\ I_{3w3} & \ddot{\theta}_{w3} \end{bmatrix} \qquad (A39)$$

即ち、フィードフォーワード量演算部２６・１は、制約条件の角速度Ω_0，角加速度$d\Omega_0/dt$が共に０の場合、フィードフォワードトルクを、式（Ａ８）に基づいて、速度と角速度を求めるアルゴリズムＡＡを４回繰り返し、式（Ａ１３）によって、式（Ａ３２）の左辺を求めるようになっている。

そして更に、フィードフォーワード量演算部２６・１は、この式（Ａ３２）によって得た値を使いながら、式（Ａ２２）に基づいて、加速度と角加速度を求めるアルゴリズムＡＢを４回繰り返し、式（Ａ３８）で３×３逆行列を取り、式（Ａ３９）でイナーシャを掛けることにより、フィードフォーワードトルクを求めるようになっている。

〔６〕．また、フィードフォーワード量演算部２６・１が、上記の宇宙用逆動力学の適用に当たって、宇宙機１２本体の角速度に対し、宇宙機１２本体の角速度を定数、角加速度を０という制約条件を課す場合を説明する（即ち、制約条件がΩ_0＝Ｃ（ｃｏｎｓｔａｎｔ），$d\Omega_0/dt=0$の場合）。

この場合、制約条件を変えるだけで、先の〔５〕の場合（制約条件が、$\Omega_0=0$，$d\Omega_0/dt=0$）と、同様の要領で、フィードフォーワードトルクを求めることができるが、但し、ホイールの角速度として、式

（Ａ３２）の代わりに、先述の〔２〕の式（Ａ１４）を使用する。

即ち、フィードフォーワード量演算部２６・１は、角速度を定数Ｃ、角加速度を０という制約条件の場合において、上記の各式により、〔５〕の場合と、同様の要領で、フィードフォーワードトルクを求めるようになっているのである。

〔７〕．次に、フィードフォーワード量演算部２６・１が、上記の宇宙用逆動力学の適用に当たり、宇宙機１２本体の角速度に対し、宇宙機１２本体の角加速度を時間ｔの任意関数という制約条件を課す場合を説明する（即ち、制約条件が$d\Omega_0/dt = du(t)/dt$の場合（ｕ；ｇｉｖｅｎ　ｏｆ　ｔ））。

この場合、フィードフォーワード量演算部２６・１は、先の〔４〕の場合に用いた、式（Ａ２９）において、拘束条件として衛星本体の角加速度にｕ（ｔ）を課して得られる、次式（Ａ４０）を用いて、フィードフォワードトルクを求めるようになっている。

$$\ddot{\theta}_w = [\dot{\Omega}_{01} \quad \dot{\Omega}_{02} \quad \dot{\Omega}_{03}]^{-1} (\dot{u}(t) - \dot{\Omega}_{00}) \qquad (A40)$$

即ち、フィードフォーワード量演算部２６・１は、角加速度が時間の任意関数という制約条件の場合は、先述の〔４〕の式（Ａ３０）の変わりに式（Ａ４０）を用いるだけで、その他に関しては、〔４〕の場合と同様の要領で、フィードフォーワードトルクを求めるようになっているのである。

〔８〕．そしてまた、フィードフォーワード量演算部２６・１が、上記の宇宙用逆動力学の適用に当たって、宇宙機１２本体の角速度に対し、宇宙機１２本体の加速度および角加速度のそれぞれに、時間の任意関数という制約条件を課す場合を説明する（即ち、制約条件が$\Omega_0 = u$（

t），$d\Omega_w/dt = du(t)/dt$の場合）。

この場合においては、先の〔5〕の場合と、同様の原理により、フィードフォーワードトルクを求めるための各式が得られる。但し、この時（〔8〕）の制約条件により、ホイールの角速度として、〔5〕の式（A32）の代わりに、先に説明した〔3〕の式（A15）を採用する。

また、これとともに、〔5〕の式（A37）において、式（A38）の代わりに、次式（A41）を採用するのである。

$$\ddot{\Theta}_w = [\dot{\Omega}_{01} \quad \dot{\Omega}_{02} \quad \dot{\Omega}_{03}]^{-1} (\dot{u}(t) - \dot{\Omega}_{00}) \qquad (A41)$$

即ち、フィードフォーワード量演算部26・1は、上記の原理により求められる各式を用いて、〔5〕の場合と同様の要領の処理を行なうことにより、フィードフォーワードトルクを求めるようになっているのである。

以上が、フィードフォーワード量演算部26・1による、フィードフォワード量としてホイールトルクを取る場合の、各制約条件毎におけるフィードフォーワードトルクの求め方の手法を示したものである。

ところで、また、フィードフォーワード量演算部26・1は、フィードフォーワード角速度、またはフィードフォーワードトルクを求めるに際し、計算回数を削減するために、ホイール自由度をトランケート（truncate）し、系全体の自由度を、マニピュレータ11の関節数Lと宇宙機12本体の位置・姿勢6自由度の合計L＋6自由度に設定することもできるものである。

〔9〕．以下、〔1〕～〔8〕において、ホイール自由度をトランケートした場合のフィードフォワード項の計算方式の詳細を各条件ごとに

順次示していく〔以下の１）～６）参照〕。

１）．フィードフォワード項としてホイール角速度を採用する場合（先述の〔１〕，〔２〕，〔３〕に相当）の説明。

この場合、運動量／角運動量保存則は、ホイール自由度をトランケートするため、式（Ａ８）の代わりに、以下の式（Ａ４２）となる。

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ \Omega_0 \end{bmatrix} = \$^{-1} \begin{bmatrix} Q \\ L \end{bmatrix} + I\!I_m^{\ell}\ \dot{\Theta}_m \qquad (\Lambda 4\,2)$$

また、先に説明したＳの定義でのｉ＝０の場合における、衛星本体，モーメンタムホイール２３・１，２３・２，２３・３についての総和（Ｓｕｍｍａｔｉｏｎ）は、以後、各モーメンタムホイール部分が省略され、本体のみのものとなる。

そして、この式（Ａ４２）から本体に流れる角運動量L_B（このＬも表示上の都合でスカラ表示してあるだけで、先のａの場合と同様の扱いとする。）は、次式（Ａ４３）となる。

$$L_B = I\!I_0\ \Omega_0 \equiv \begin{bmatrix} L_{B1} \\ L_{B2} \\ L_{B3} \end{bmatrix} \qquad (\Lambda 4\,3)$$

ホイールが持つべき角運動量〔次式（Ａ４４）参照〕を、式（Ａ４３）と一致させる。ホイール配置を特に３軸直行型にとると、次式（Ａ４５）が得られる。

$$(\text{角運動量}) = \sum_{i=1}^{3} I\!I_{wi}\ \omega_{wi} \qquad (\Lambda 4\,4)$$

$$\begin{cases} I_{w1}\theta_{w1} = L_{n1} \\ I_{w1}\theta_{w2} = L_{n2} \\ I_{w1}\theta_{w3} = L_{n3} \end{cases} \qquad (A45)$$

その結果、この式（Ａ４５）により、以下に示す、各ホイールの目標角速度が定まる。

$$(\text{ホイールの目標角速度}) = \dot{\Theta}_{w\ ref}.$$

以上より、ホイール自由度をトランケートした場合のフィードフォワードホイール角速度を求めるアルゴリズムＡＣは、ＦＩＧ．３３に示すように、まとめられる。

即ち、このアルゴリズムＡＣは、まず、アルゴリズムＡＡによる本体角速度の計算を行ない（ステップＡＣ１）、そののち、式（Ａ４３）による本体角運動量の計算をし（ステップＡＣ２）、さらに、式（Ａ４５）によるホイールの目標角速度の計算を行なう（ステップＡＣ３）ようになっているものである。

２）－１．フィードフォワード項としてホイールトルクを採用して、且つ、制約条件として本体角加速度が０を課される場合（先の〔４〕に相当）の説明。

ホイール自由度をトランケートした場合、衛星本体に作用する外乱力，外乱トルクは以下のように計算される。

即ち、ＦＩＧ．２３に示すように、マニピュレータ１とベース１３を定義する時、マニピュレータ１が駆動すると、ベースからマニピュレータ１に以下の内力ｆ，，内部トルクｎ，が作用し、その反作用として、以下の内力－ｆ，，内部トルク－ｎ，が、マニピュレータ１からベース

１３に作用する（これらのｆ，ｎも表示上の都合でスカラ表示してあるだけで、先のａの場合と同様扱いとする。）。

内力－f_i，内部トルク－n_iをベース重心まわりに換算すると、ベースに掛かる外乱力f_D，外乱トルクτ_Dは、次の式（Ａ４６），（Ａ４７）ようになる（このτも表示上の都合でスカラ表示してあるだけで、先のベクトルａの場合と同様扱いとする。）。

$$\begin{cases} \mathbf{f}_D = -\mathbf{f}_i & (A46) \\ \tau_D = -n_i + \mathbf{r}_0 \times \mathbf{f}_i & (A47) \end{cases}$$

以上の議論より、外乱トルク（この値をホイールのフィードフォワードトルクとする。）を計算するには、各関節に作用する内部トルクn_iを計算すればよい。この内部トルクn_iを求める最も一般的手法が、ＦＩＧ．３４に示す、汎用型宇宙用逆動力学である。

この汎用型宇宙用逆動力学は、まず、初期値設定（ステップＡａ１）を施したのち、正順繰り返し計算（ステップＡａ２）を行ない、さらに、ベース速度，角速度の計算（ステップＡａ３）、ベース加速度，角加速度の計算（ステップＡａ４）、逆順繰り返し計算（ステップＡａ５）を行なうようになっているものである。

ここで、ＦＩＧ．３４に示す、各計算の構成の説明を行なう。

即ち、初期値設定（ステップＡａ１）は、以下の各演算によって構成されたものである。

$$\hat{R}_0\Big|_{t=0} \quad ; given$$

$$\theta_i\Big|_{t=0} \quad ; given\ (i=1\sim\ell)$$

$$\omega_0 = \omega_0' = 0,\ \hat{v}_0 = \hat{v}_0' = 0,\ v_0 = v_0' = 0$$

$${}^{i-1}Z_{i-1} = (0,\ 0,\ 1)^T$$

$${}^{A}A_0 \ ; given,$$

$$\begin{cases} Qの計算((A6)) \\ Lの計算((A7)) \end{cases}$$

また、正順繰り返し計算（ステップＡａ２）は、以下の各演算によって構成されたものである。

$$① {}^{i}\omega_i = \begin{cases} {}^{i}A_{i-1}\ ({}^{i-1}\omega_{i-1} + \dot{\theta}_i\ {}^{i-1}Z_{i-1}) & for\ R \\ {}^{i}A_{i-1}\ {}^{i-1}\omega_{i-1} & for\ T \end{cases}$$

$$② {}^{i}\omega_i' = \begin{cases} {}^{i}A_{i-1}\ ({}^{i-1}\omega_{i-1}' + \ddot{\theta}_i\ {}^{i-1}Z_{i-1} \\ \qquad + \dot{\theta}_i\ {}^{i-1}\omega_{i-1} \times {}^{i-1}Z_{i-1}) \\ \qquad\qquad for\ R \\ {}^{i}A_{i-1}\ {}^{i-1}\omega_{i-1}' \qquad for\ T \end{cases}$$

$$③ {}^{i}v_i = \begin{cases} {}^{i}\omega_i \times {}^{i}\ell_i + {}^{i}A_{i-1}\ {}^{i-1}v_{i-1} & for\ R \\ {}^{i}\omega_i \times {}^{i}\ell_i \\ \quad + {}^{i}A_{i-1}\ (\dot{d}_i\ {}^{i-1}Z_{i-1} + {}^{i-1}v_{i-1}) \\ \qquad\qquad for\ T \end{cases}$$

$$④ {}^{i}\hat{v}_i = {}^{i}v_i + {}^{i}\omega_i \times {}^{i}\hat{r}_i$$

$$⑤\ {}^{i}v_i' = \begin{cases} {}^{i}\omega_i' \times {}^{i}\ell_i + {}^{i}\omega_i \times ({}^{i}\omega_i \times {}^{i}\ell_i) \\ \qquad + {}^{i}A_{i-1}\ {}^{i-1}v_{i-1}' & \text{for R} \\ {}^{i}A_{i-1}\ (\ddot{d}_i\ {}^{i-1}Z_{i-1} + {}^{i-1}v_{i-1}') \\ + {}^{i}\omega_i' \times {}^{i}\ell_i \\ + 2\dot{d}_i\ {}^{i}\omega_i \times ({}^{i}A_{i-1}\ {}^{i-1}Z_{i-1}) \\ + {}^{i}\omega_i \times ({}^{i}\omega_i \times {}^{i}\ell_i) & \text{for T} \end{cases}$$

$$⑥\ {}^{i}\hat{v}_i' = {}^{i}v_i' + {}^{i}\omega_i' \times {}^{i}\hat{r}_i' + {}^{i}\omega_i \times ({}^{i}\omega_i \times {}^{i}\hat{r}_i')$$

$$⑦\ {}^{i}\hat{r}_i = {}^{i}\hat{r}_i' + {}^{i}\ell_i - {}^{i}A_{i-1}\ {}^{i-1}\hat{r}_{i-1}' + {}^{i}A_{i-1}\ {}^{i-1}\hat{r}_{i-1}$$

$$⑧\ {}^{\wedge}\mathbb{A}_i = {}^{\wedge}\mathbb{A}_{i-1}\ {}^{i-1}A_i$$

$$⑨\ {}^{\wedge}\hat{r}_i = {}^{\wedge}\mathbb{A}_i\ {}^{i}\hat{r}_i$$

$$⑩\ {}^{\wedge}\hat{R}_i = {}^{\wedge}\hat{r}_i - (1/M) \times \sum_{i=0}^{\ell} m_i\ {}^{\wedge}\hat{r}_i + ({}^{\wedge}\mathbb{Q}_i + \mathbb{C})/M$$

更に、ベース速度，角速度の計算（ステップＡａ３）は、以下の各演算によって構成されたものである。

①${}^{\wedge}S_{12}$の計算

②${}^{\wedge}S_{21}$の計算

③ $^{A}\mathbb{I}_{i} = {}^{A}\Lambda_{i}\ {}^{i}\mathbb{I}_{i}\ {}^{i}A_{A}$

④ $^{A}S_{22} = \sum_{i=0}^{\ell} \{ {}^{A}A_{i}\ {}^{i}\mathbb{I}_{i}\ {}^{i}\Lambda_{A} - m_{i}\ {}^{A}\underline{\hat{\mathbb{R}}}_{i}\ {}^{A}\underline{\hat{\mathbb{r}}}_{i} \}$

⑤ $^{A}\mathbb{h}_{v} = {}^{A}\mathbb{Q} - \sum_{i=0}^{\ell} m_{i}\ {}^{A}\hat{\mathbb{v}}_{i}$

⑥ $^{A}\mathbb{h}_{\omega} = {}^{A}\mathbb{L} - \sum_{i=0}^{\ell} (m_{i}\ {}^{A}\hat{\mathbb{R}}_{i} \times {}^{A}\hat{\mathbb{v}}_{i} + {}^{A}A_{i}\ {}^{i}\mathbb{I}_{i}\ {}^{i}\omega_{i})$

⑦ $$\begin{bmatrix} {}^{A}\mathbb{V}_{0} \\ {}^{A}\mathbb{Q}_{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & {}^{A}S_{12} \\ {}^{A}S_{21} & {}^{A}S_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} {}^{A}\mathbb{h}_{v} \\ {}^{A}\mathbb{h}_{\omega} \end{bmatrix}$$

そして、ベース加速度，角加速度の計算（ステップＡａ４）は、以下の各演算によって構成されたものである。

① $^{A}\hat{\mathbb{v}}_{i}' = {}^{A}A_{i}\ {}^{i}\hat{\mathbb{v}}_{i}'$

② $^{A}\mathcal{F}_{i} = m_{i}\ (2\ {}^{A}\mathbb{Q}_{0} \times {}^{A}\hat{\mathbb{v}}_{i} + {}^{A}\mathbb{Q}_{0} \times ({}^{A}\mathbb{Q}_{0} \times {}^{A}\hat{\mathbb{r}}_{i}) + {}^{A}\hat{\mathbb{v}}_{i}')$

③ $^{i}\mathbb{Q}_{0} = {}^{i}A_{A}\ {}^{A}\mathbb{Q}_{0}$

④ $^{i}\mathbb{Q}_{i} = {}^{i}\mathbb{Q}_{0} + {}^{i}\omega_{i}$

⑤ $^{A}\mathcal{N}_{i} = {}^{A}A_{i}\ {}^{i}\mathbb{I}_{i}\ {}^{i}\omega_{i}' + {}^{A}A_{i}\ {}^{i}\mathbb{I}_{i}\ {}^{i}\mathbb{Q}_{0} \times {}^{i}\omega_{i} + {}^{A}A_{i}\ {}^{i}\mathbb{Q}_{i} \times ({}^{i}\mathbb{I}_{i}\ {}^{i}\mathbb{Q}_{i})$

$$⑥ -\sum_{i=0}^{\ell} {}^{A}\mathcal{F}_i \equiv {}^{A}W_f$$

$$⑦ -\sum_{i=0}^{\ell} ({}^{A}\hat{R}_i \times {}^{A}\mathcal{F}_i + {}^{A}\mathcal{N}_i) \equiv {}^{A}W_n$$

$$⑧ \begin{bmatrix} {}^{A}\dot{V}_0 \\ {}^{A}\dot{\Omega}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & {}^{A}S_{12} \\ {}^{A}S_{21} & {}^{A}S_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} {}^{A}W_f \\ {}^{A}W_n \end{bmatrix}$$

また更に、逆順繰り返し計算（ステップＡａ５）は、以下の各演算によって構成されたものである。

① ${}^{\ell+1}f_{\ell+1} = F_{OUT}$ ：手先に加えられる外力

② ${}^{\ell+1}n_{\ell+1} = N_{OUT}$ ：手先にくわえられる外部トルク

③ $${}^{i}F_i = m_i ({}^{i}A_A \, {}^{A}\dot{V}_0 + {}^{i}A_A \, {}^{A}\dot{\Omega}_0 \times {}^{i}\hat{r}_i) + {}^{i}A_A \, {}^{A}\mathcal{F}_i$$

④ $${}^{i}N_i = {}^{i}I_i \, {}^{i}A_A \, {}^{i}A_A \, {}^{A}\dot{\Omega}_0 + {}^{i}A_A \, {}^{A}\mathcal{N}_i$$

⑤ $${}^{i}f_i = {}^{i}A_{i+1} \, {}^{i+1}f_{i+1} + {}^{i}F_i$$

⑥ $${}^{i}n_i = {}^{i}A_{i+1} \, {}^{i+1}n_{i+1} + {}^{i}\ell_i \times ({}^{i}A_{i+1} \, {}^{i+1}f_{i+1}) + ({}^{i}\ell_i + {}^{i}\hat{r}_i) \times {}^{i}F_i + {}^{i}N_i$$

⑦ $$\tau_i = \begin{cases} ({}^{i}A_{i-1} \, {}^{i-1}Z_{i-1})^T \cdot {}^{i}n_i + \gamma_i \dot{\theta}_i & \text{for R} \\ ({}^{i}A_{i-1} \, {}^{i-1}Z_{i-1})^T \cdot {}^{i}f_i + \gamma_i \dot{d}_i & \text{for T} \end{cases}$$

尚、汎用型宇宙用逆動力学の各演算では、以下の定義がされる。

$$A_{i,i-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{i-1} & -\sin\theta_{i-1}\cos\alpha_{i-1} & \sin\theta_{i-1}\sin\alpha_{i-1} \\ \sin\theta_{i-1} & \cos\theta_{i-1}\cos\alpha_{i-1} & -\cos\theta_{i-1}\sin\alpha_{i-1} \\ 0 & \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} \end{bmatrix}$$

$$\overset{*}{A}_{i,i-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & \sin\theta_i & 0 \\ -\sin\theta_i\cos\alpha_i & \cos\theta_i\cos\alpha_i & \sin\alpha_i \\ \sin\theta_i\sin\alpha_i & -\cos\theta_i\sin\alpha_i & \cos\alpha_i \end{bmatrix}$$

$$\overset{*}{\ell}_i = \begin{bmatrix} b_i \\ d_i\sin\alpha_i \\ d_i\cos\alpha_i \end{bmatrix}$$

そして、本例のように、〔4〕の拘束条件、即ち、本体角加速度として0を課す場合は、ＦＩＧ．３５に示すような、角加速度$d\Omega_0/dt=0$による拘束型宇宙用逆動力学が用いられる。

この角加速度$d\Omega_0/dt=0$による拘束型宇宙用逆動力学は、初期値の設定（ステップＡａ１′），正順繰り返し計算（ステップＡａ２′），ベース速度，角速度の計算（ステップＡａ３′），ベース加速度の計算（ステップＡａ４′），逆順繰り返し計算（ステップＡａ５′）によって構成されたものである。

そして、角加速度$d\Omega_0/dt=0$による拘束型宇宙用逆動力学は、汎用型宇宙用逆動力学におけるベース加速度，角加速度の計算（ステップＡａ４）を、ベース加速度の計算（ステップＡａ４′）で置き換えたもので、その他の各ステップＡａ１′，ａ２′，ａ３′，ａ５′は、同様のものである。

ここで、ＦＩＧ．３５に示す、ベース加速度の計算（ステップＡａ４′）は、以下のような構成をとるものである。

$$① {}^{\wedge}\hat{\dot{v}}_i' = {}^{\wedge}A_i \; {}^{\cdot}\hat{v}_i'$$

$$② {}^{\wedge}\mathcal{F}_i = m_i \left(2\,{}^{\wedge}\Omega_0 \times {}^{\wedge}\hat{v}_i + {}^{\wedge}\Omega_0 \times \left({}^{\wedge}\Omega_0 \times {}^{\wedge}\hat{r}_i \right) + {}^{\wedge}\hat{\dot{v}}_i' \right)$$

$$③ {}^{\wedge}\dot{V}_0 = -(1/M) \sum_{i=0}^{\ell} {}^{\wedge}\mathcal{F}_i$$

$$④ \dot{\Omega}_0 = 0$$

以上、まとめると、フィードフォーワード量演算部２６・１は、ホイールの自由度をトランケートし、〔４〕のように、フィードフォワード項としてホイールトルクを採用して、且つ、本体加角速度として０を課される場合、この角加速度ｄΩ₀／ｄｔ＝０による拘束型宇宙用逆動力学により、内力ｆᵢ，内部トルクｎᵢを求め、式（Ａ４７）によりホイールフィードフォワードトルクを求めるようになっているのである。

３）－２．フィードフォワード項としてホイールトルクを採用して、且つ、制約条件として本体角速度，角加速度が０を課される場合（〔５〕に相当）の説明。

この場合、拘束条件として本体角速度，角加速度が共に０であるため、汎用型宇宙用逆動力学は、非常に簡略化される。即ち、本体速度は、運動量保存則より、以下の式（Ａ４８）のようになる。

$$V_0 = (1/M) \left[Q - \sum_{i=0}^{\ell} m_i \hat{v}_i \right] \qquad (A48)$$

これにより、本体加速度は、式（Ａ４８）を微分して、以下の式（Ａ４９）が得られる。

$$\dot{\hat{V}}_0 = -(1/M)\sum_{i=0}^{\ell} m_i \hat{v}_i' \qquad (A49)$$

そして、外力を求めるアルゴリズムA（これをアルゴリズムADとする）は、ＦＩＧ．３６に示すように、汎用型宇宙用逆動力学のベース速度，角速度の計算（ステップＡａ３）および、ベース加速度，角加速度の計算（ステップＡａ４）とを省略したものである。

つまり、この場合のアルゴリズムＡＤは、まず、汎用型宇宙用逆動力学の場合と同様に、初期値設定（ステップＡＤ１）を施したのち、正順繰り返し計算（ステップＡＤ２）を行なうようになっている。

そののち、このアルゴリズムＡＤは、ベース速度，加速度の計算（ステップＡＤ３）行ない、さらに、逆順繰り返し計算（ステップＡＤ４）を行なうようになっているものである。

ここで、ＦＩＧ．３６に示す、各計算は、以下に示すような構成のものである。

即ち、初期値設定（ステップＡＤ１）は、以下の各演算によって構成されたものである。

$$\hat{R}_0\Big|_{t=0} \quad ;\mathrm{given}$$

$$\theta_i\Big|_{t=0} \quad ;\mathrm{given}\ (i=1\sim\ell)$$

$$\omega_0 = \omega_0' = 0,\ \hat{v}_0 = \hat{v}_0' = 0,\ v_0 = v_0' = 0$$

$${}^{i-1}Z_{i-1} = (0,\ 0,\ 1)^T$$

$^{*}A_0$; g i v e n,

$$\begin{cases} \mathbb{Q}\text{の計算}(\langle A6\rangle) \\ \mathbb{L}\text{の計算}(\langle A7\rangle) \end{cases}$$

また、正順繰り返し計算（ステップＡＤ２）は、以下の各演算によって構成されたものである。

$$\textcircled{1}\ {}^{i}\omega_{i} = \begin{cases} {}^{i}A_{i-1}\ ({}^{i-1}\omega_{i-1} + \dot{\theta}_{i}\ {}^{i-1}Z_{i-1}) & \text{for R} \\ {}^{i}A_{i-1}\ {}^{i-1}\omega_{i-1} & \text{for T} \end{cases}$$

$$\textcircled{2}\ {}^{i}\omega_{i}' = \begin{cases} {}^{i}A_{i-1}\ [{}^{i-1}\omega_{i-1}' + \ddot{\theta}_{i}\ {}^{i-1}Z_{i-1} \\ \qquad + \dot{\theta}_{i}\ {}^{i-1}\omega_{i-1} \times {}^{i-1}Z_{i-1}] \\ \qquad\qquad \text{for R} \\ {}^{i}A_{i-1}\ {}^{i-1}\omega_{i-1}' \qquad \text{for T} \end{cases}$$

$$\textcircled{3}\ {}^{i}v_{i} = \begin{cases} {}^{i}\omega_{i} \times {}^{i}\ell_{i} + {}^{i}A_{i-1}\ {}^{i-1}v_{i-1} & \text{for R} \\ {}^{i}\omega_{i} \times {}^{i}\ell_{i} \\ \quad + {}^{i}A_{i-1}\ (\dot{d}_{i}\ {}^{i-1}Z_{i-1} + {}^{i-1}v_{i-1}) \\ \qquad\qquad \text{for T} \end{cases}$$

$$\textcircled{4}\ {}^{i}\hat{v}_{i} = {}^{i}v_{i} + {}^{i}\omega_{i} \times {}^{i}\hat{r}_{i}$$

$$\textcircled{5}\ {}^{i}v_{i}' = \begin{cases} {}^{i}\omega_{i}' \times {}^{i}\ell_{i} + {}^{i}\omega_{i} \times ({}^{i}\omega_{i} \times {}^{i}\ell_{i}) \\ \qquad + {}^{i}A_{i-1}\ {}^{i-1}v_{i-1}' \\ \qquad\qquad \text{for R} \\ {}^{i}A_{i-1}\ (\ddot{d}_{i}\ {}^{i-1}Z_{i-1} + {}^{i-1}v_{i-1}') \\ \quad + {}^{i}\omega_{i}' \times {}^{i}\ell_{i} \\ \quad + 2\dot{d}_{i}\ {}^{i}\omega_{i} \times ({}^{i}A_{i-1}\ {}^{i-1}Z_{i-1}) \\ \quad + {}^{i}\omega_{i} \times ({}^{i}\omega_{i} \times {}^{i}\ell_{i}) \qquad \text{for T} \end{cases}$$

⑥ $^{i}\hat{v}_{i}' = {}^{i}v_{i}' + {}^{i}\omega_{i}' \times {}^{i}\hat{r}_{i} + {}^{i}\omega_{i} \times ({}^{i}\omega_{i} \times {}^{i}\hat{r}_{i})$

⑦ $^{i}\hat{R}_{i} = {}^{i}\hat{R}_{i}' + {}^{i}0_{i} - {}^{i}A_{i-1}\ {}^{i-1}\hat{R}_{i-1}' + {}^{i}A_{i-1}\ {}^{i-1}\hat{r}_{i-1}$

⑧ $^{A}A_{i} = {}^{A}A_{i-1}\ {}^{i-1}A_{i}$

⑨ $^{A}\hat{R}_{i} = {}^{A}A_{i}\ {}^{i}\hat{r}_{i}$

⑩ $^{A}\hat{R}_{i} = {}^{A}\hat{r}_{i} - (1/M) \times \sum_{i=0}^{\ell} m_{i}\ {}^{A}\hat{r}_{i} + ({}^{A}Q_{i} + C)/M$

更に、ベース速度，加速度の計算（ステップＡＤ３）は、以下の各演算によって構成されたものである。

① $^{A}V_{0} = (1/M)\left[{}^{A}Q - \sum_{i=0}^{\ell} m_{i}\ {}^{A}\hat{v}_{i}\right]$

② $^{A}F_{i} = m_{i}\ {}^{A}\hat{v}_{i}'$

③ $^{A}\dot{V}_{0} = -(1/M)\sum_{i=0}^{\ell} {}^{A}F_{i}$

そして、逆順繰り返し計算（ステップＡＤ４）は、以下の各演算によって構成されたものである。

① $^{\ell+1}f_{\ell+1} = F_{OUT}$ ：手先に加えられる外力

② $^{\ell+1}n_{\ell+1} = N_{OUT}$ ：手先にくわえられる外部トルク

$$③\ {}^{i}F_i = m_i\ {}^{i}A_A\ {}^{A}\dot{V}_0 + {}^{i}A_A\ {}^{A}\mathcal{F}_i$$

$$④\ {}^{i}N_i = {}^{i}I_i\ {}^{i}\omega_i' + {}^{i}\Omega_i \times ({}^{i}I_i\ {}^{i}\Omega_i)$$

$$⑤\ {}^{i}f_i = {}^{i}A_{i+1}\ {}^{i+1}f_{i+1} + {}^{i}F_i$$

$$⑥\ {}^{i}n_i = {}^{i}A_{i+1}\ {}^{i+1}n_{i+1} + {}^{i}\ell_i \times ({}^{i}A_{i+1}\ {}^{i+1}f_{i+1}) + ({}^{i}\ell_i + {}^{i}\hat{r}_i^{*}) \times {}^{i}F_i + {}^{i}N_i$$

$$⑦\tau_i = \begin{cases} ({}^{i}A_{i-1}\ {}^{i-1}Z_{i-1})^{T} \cdot {}^{i}n_i + \gamma_i \dot{\theta}_i & \text{for R} \\ ({}^{i}A_{i-1}\ {}^{i-1}Z_{i-1})^{T} \cdot {}^{i}f_i + \gamma_i \dot{d}_i & \text{for T} \end{cases}$$

即ち、これが、角速度および角加速度が共に0の時の拘束型宇宙用逆動力学である。

以上、まとめると、フィードフォーワード量演算部26・1は、ホイールの自由度をトランケートし、〔5〕のように、フィードフォワード項としてホイールトルクを採用して、且つ、本体角速度，加角速度として、共に0を課される場合、この本体角速度，角加速度が共に0による拘束型宇宙用逆動力学により、内力f_i，内部トルクn_iを求め、式（A47）により外乱トルクτ_Dを求めるようになっているのである。

4）－3．フィードフォワード項としてホイールトルクを採用して、且つ、制約条件として本体角速度が定数で、本体角加速度が0を課される場合－3（先の〔6〕に相当）の説明。

この場合、拘束条件として本体角速度が定数〔${}^{A}C$（given constant）〕で、本体角加速度が0であるため、汎用型宇宙用逆動力学は、非常に簡略化される。即ち、本体速度は、運動量保存則より、以下の式（A50）となる。

$$\mathbf{V}_0 = (1/M)\left[\mathcal{Q} - \sum_{i=0}^{\ell} m_i \hat{\mathbf{v}}_i - \left(\sum_{i=0}^{\ell} m_i \hat{\underline{\mathbf{r}}}_i\right) \Omega_0 \right]$$

$$= (1/M) \left[\mathcal{Q} - \sum_{i=0}^{\ell} m_i \hat{\mathbf{v}}_i - \left(\sum_{i=0}^{\ell} m_i \hat{\underline{\mathbf{r}}}_i\right) \mathbb{C}_{\omega_0} \right] \quad (A50)$$

この式（Ａ５０）と、内力の総和＝０の式より、本体加速度は、以下の式（Ａ５１），（Ａ５２）が得られる。

$$\dot{\mathbf{V}}_0 = -(1/M) \sum_{i=0}^{\ell} \mathcal{F}_i \quad (A51)$$

$$\mathcal{F}_i = m_i \left(2\Omega_0 \times \hat{\mathbf{v}}_i + \Omega_0 \times (\Omega_0 \times \hat{\mathbf{r}}_i) + \hat{\mathbf{v}}_i'\right)$$
$$= m_i \left(2\mathbb{C}_{\omega_0} \times \hat{\mathbf{v}}_i + \mathbb{C}_{\omega_0} \times (\mathbb{C}_{\omega_0} \times \hat{\mathbf{r}}_i) + \hat{\mathbf{v}}_i'\right) \quad (A52)$$

そして、この場合の外力は、アルゴリズムＡＥによって、求めることができる。このアルゴリズムＡＥは、ＦＩＧ．３７に示すように、初期値の設定（ステップＡＥ１），正順繰り返し計算（ステップＡＥ２），ベース速度，加速度の計算（ステップＡＥ３′），逆順繰り返し計算（ステップＡＥ４）によって構成されたものである。

これらは、つまり、先のアルゴリズムＡＤ、即ち、角速度および角加速度が共に０の時の拘束型宇宙用逆動力学においてのベース速度，加速度の計算（ステップＡＤ３）を、以下のベース速度，加速度の計算（ステップＡＥ３）に置き換えたアルゴリズムＡであり、その他のステップＡＥ１，ＡＥ２，ＡＥ４に関しては、同様のものである。

$$\text{①}\ {}^{\wedge}\mathbf{V}_0 = (1/M)\left[{}^{\wedge}\mathcal{Q} - \sum_{i=0}^{\ell} m_i \, {}^{\wedge}\hat{\mathbf{v}}_i - \left(\sum_{i=0}^{\ell} m_i \, {}^{\wedge}\hat{\underline{\mathbf{r}}}_i\right) {}^{\wedge}\mathbb{C}_{\omega_0} \right]$$

$$②\ {}^{\wedge}\mathcal{F}_i = m_i\left[\ 2\ {}^{\wedge}\mathbb{C}_{\Omega_0} \times {}^{\wedge}\hat{v}_i + {}^{\wedge}\mathbb{C}_{\Omega_0} \times \left({}^{\wedge}\mathbb{C}_{\Omega_0} \times {}^{\wedge}\hat{r}_i \right) + {}^{\wedge}\hat{v}_i'\ \right]$$

$$③\ {}^{\wedge}\dot{V}_0 = -\left(1/M\right) \sum_{i=0}^{n} {}^{\wedge}\mathcal{F}_i$$

即ち、これが、本体角速度が定数で、本体角加速度が０の時の拘束型宇宙用逆動力学である。

以上、まとめると、フィードフォーワード量演算部２６・１は、ホイールの自由度をトランケートし、〔６〕のように、フィードフォワード項としてホイールトルクを採用して、且つ、本体角速度が定数で、本体角加速度が０を課される場合、上述の本体角速度が定数で、本体角加速度が０の時の拘束型宇宙用逆動力学により、外力を求めるようになっているのである。

５）－４．フィードフォワード項としてホイールトルクを採用して、且つ、制約条件として本体角加速度が時間の任意関数を課される場合（先述の〔７〕に相当）の説明。

この場合、拘束条件として本体角速度に時間の任意関数を課すため、汎用型宇宙用逆動力学おけるベース加速度，角加速度の計算（ステップＡａ４）を以下のベース加速度の計算（ステップＡｂ４）で置き換えられる。

$$①\ {}^{\wedge}\hat{v}_i' = {}^{\wedge}A_i\ {}^{\cdot}\hat{v}_i'$$

$$②\ {}^{\wedge}\mathcal{F}_i = m_i\ \left(2\ {}^{\wedge}\Omega_0 \times {}^{\wedge}\hat{v}_i + {}^{\wedge}\Omega_0 \times \left({}^{\wedge}\Omega_0 \times {}^{\wedge}\hat{r}_i \right) + {}^{\wedge}\hat{v}_i'\right)$$

$$③\ {}^{\wedge}\dot{V}_0 = -\left(1/M\right)\left[\ \left(\sum_{i=0}^{n} m_i\ {}^{\wedge}\underline{\hat{r}_i}\right)\ {}^{\wedge}v\ (t) + \sum_{i=0}^{n} {}^{\wedge}\mathcal{F}_i\right]$$

この結果、ＦＩＧ．３８に示すような、本体角加速度が時間の任意関数の時の拘束型宇宙用逆動力学が得られる。この拘束型宇宙用逆動力学は、本図に示すように、初期値の設定（ステップＡｂ１），正順繰り返し計算（ステップＡｂ２），ベース速度，角速度の計算（ステップＡｂ３），ベース加速度の計算（ステップＡｂ４），逆順繰り返し計算（ステップＡｂ５）によって構成されたものである。

つまり、これらは、先の説明からも分かる通り、汎用型宇宙用逆動力学においてのステップＡａ４を、先のステップＡｂ４に置き換えたものであり、その他のステップＡｂ１，Ａｂ２，Ａｂ３，Ａｂ５に関しては、同様のものである。

以上、まとめると、フィードフォーワード量演算部２６・１は、ホイールの自由度をトランケートし、〔７〕のように、フィードフォワード項としてホイールトルクを採用して、且つ、本体角加速度が時間の任意関数を課される場合、上記の本体角加速度が時間の任意関数の時の拘束型宇宙用逆動力学により、ホイールフィードフォーワードトルクを求めるようになっているのである。

６）－５．フィードフォワード項としてホイールトルクを採用して、且つ、制約条件として、本体角速度および本体角加速度が共に時間の任意関数を課される場合（先の〔８〕に相当）の説明。

この場合、拘束条件として本体角速度および本体角加速度に時間の任意関数を課すため、先の３）の場合と同様、汎用型宇宙逆動力学は、非常に簡略化される。

即ち、本体速度は、運動量保存則より、以下の式（Ａ５３）のようになる。

$$V_0 = (1/M)\left[Q - \sum_{i=0}^{\ell} m_i \hat{v}_i - \left(\sum_{i=0}^{\ell} m_i \hat{r}_i\right) \Omega_0 \right]$$

$$= (1/M)\left[Q - \sum_{i=0}^{\ell} m_i \hat{v}_i - \left(\sum_{i=0}^{\ell} m_i \hat{r}_i\right) u(t) \right] \quad (A53)$$

そして、本体加速度は、以下の式（A54）ようになる。

$$\dot{V}_0 = -(1/M)\left[\sum_{i=0}^{\ell} \mathcal{F}_i + \left(\sum_{i=0}^{\ell} m_i \hat{r}_i\right) \dot{\Omega}_0 \right]$$

$$= -(1/M)\left[\sum_{i=0}^{\ell} \mathcal{F}_i + \left(\sum_{i=0}^{\ell} m_i \hat{r}_i\right) \dot{u}(t) \right]$$

$$\mathcal{F}_i = m_i \left[2\Omega_0 \times \hat{v}_i + \Omega_0 \times (\Omega_0 \times \hat{r}_i) + \hat{v}_i' \right]$$
$$= m_i \left[2u(t) \times \hat{v}_i + u(t) \times (u(t) \times \hat{r}_i) + \hat{v}_i' \right]$$

(A54)

この結果、外力を求めるアルゴリズム（これをアルゴリズムＡＦとする。）は、先述のアルゴリズムＡＤにおいて、ベース速度，加速度の計算（ステップＡＤ３）を以下のベース速度，加速度の計算（ステップＡＦ３）で置き換えることにより得られる。

① $^{A}V_0 = (1/M)\left[{}^{A}Q - \sum_{i=0}^{\ell} m_i {}^{A}\hat{v}_i - \left(\sum_{i=0}^{\ell} m_i {}^{A}\hat{r}_i\right) {}^{A}u(t) \right]$

② $\hat{\mathcal{F}}_i = m_i \left[2\,{}^{A}u(t) \times {}^{A}\hat{v}_i + {}^{A}u(t) \times ({}^{A}u(t) \times {}^{A}\hat{r}_i) + {}^{A}\hat{v}_i' \right]$

③ $^{A}\dot{V}_0 = -(1/M)\left[\sum_{i=0}^{\ell} {}^{A}\mathcal{F}_i + \left(\sum_{i=0}^{\ell} m_i {}^{A}\hat{r}_i\right) {}^{A}\dot{u}(t) \right]$

つまり、このアルゴリズムＡＦは、ＦＩＧ．３９に示すように、初期値設定（ステップＡＦ１），正順繰り返し計算（ステップＡＦ２），ベース速度，加速度の計算（ステップＡＦ３），逆順繰り返し計算（ステップＡＦ４）によって構成されたものである。

そして、先述したように、このアルゴリズムＡＦは、先のアルゴリズムＡＤにおいて、ベース速度，加速度の計算（ステップＡＤ３）を、以下のベース速度，加速度の計算（ステップＡＦ３）で置き換えられたもので、その他のステップＡＦ１，ＡＦ２，ＡＦ４に関しては、同様のものである。

即ち、このアルゴリズムＡＦが、本体角速度および本体角加速度が共に時間の任意関数の時の拘束型宇宙用逆動力学である。

以上、まとめると、フィードフォーワード量演算部２６・１は、ホイールの自由度をトランケートし、〔８〕のように、フィードフォワード項としてホイールトルクを採用して、且つ、本体角速度および本体角加速度が共に時間の任意関数を課される場合、上述の本体角速度および本体角加速度が共に時間の任意関数の時の拘束型宇宙用逆動力学により、ホイールフィードフォーワードトルクを求めるようになっているのである。

以上が、フィードフォーワード量演算部２６・１による〔１〕～〔８〕の場合において、ホイール自由度をトランケートした時のフィードフォワード項の計算方式である。

このように、系全体の自由度をマニピュレータ１の関節数Ｌと人工衛星本体の位置・姿勢６自由度の合計Ｌ＋６自由度にしたことにより、つまり、モーメンタムホイール２３・１～２３・３の自由度をトランケートすることにより、計算回数を大幅に削減することができ、各装置の構成を簡略化や処理性能の向上に貢献できる。

ところで、ＦＩＧ．２１の姿勢制御系２４は、姿勢制御系アクチュエータ２４・１（２３，２１１），ホイール制御系２７，姿勢制御センサ系２４・３とからなり、宇宙機１２の姿勢を姿勢制御系アクチュエータ２４・１を用いて制御するためのものである。

この姿勢制御系アクチュエータ２４・１は、ＦＩＧ．２２に示すように、３軸モーメンタムホイール２１１が使用されたものであり、そして、この３軸モーメンタムホイール２１１は、本体重心回りに３直交配置された３つのモーメンタムホイール２３・１～２３・３によって構成されたものである。

すなわち、姿勢制御系アクチュエータ２４・１は、これらのモーメンタムホイール２３・１～２３・３をホイール制御系２７の指示に従って、独立に回転さすことにより、衛星本体の姿勢制御を直接に行なうようになっているのである。

また、ＦＩＧ．２１の姿勢制御センサ系２４・３は、衛星の姿勢変動を検出するものであり、ホイール制御系２７は、マニピュレータ１１からもたらされる外乱を補償するために、衛星本体の姿勢角およびその微分によるＰＤフィードバック制御を行なって、その出力をフィードフォーワード出力と加算するものである。

あるいは、このホイール制御系２７は、マニピュレータ１１からもたらされる外乱を補償するために、人工衛星本体の姿勢角、その積分、および姿勢角の微分の何れかによるＰＩＤフィードバック制御を行なって、その出力をフィードフォーワード出力と加算するものである。

このため、ホイール制御系２７は、姿勢制御論理演算部２４・４と加算器２４・２とから、構成されるものである。ここで、加算器２４・２は、マニピュレータ１１からもたらされる外乱を補償するため協調制御系２６から送られて来るフィードフォーワード信号（角運動量またはホ

イール角速度、またはトルク、つまり、先述の〔１〕～〔９〕によるホイールのフィードフォーワード制御）と、姿勢制御論理演算部２４・４からのＰＤあるいはＰＩＤフィードバック制御信号とを合体させ、これをアクチュエータ制御信号とするとともに、電圧信号に変換して出力するものである。

姿勢制御論理演算部２４・４は、姿勢制御系２４のフィードバック項として、衛星本体の姿勢角およびその微分によるＰＤフィードバック制御を採用した場合、次に述べる各構成をそれぞれの条件に応じて取るようになっているのである。

〔１０〕．以下、姿勢制御論理演算部２４・４が、先の〔１〕～〔９〕において、姿勢制御系２４のフィードバック項として、衛星本体の姿勢角およびその微分によるＰＤフィードバック制御を採用された場合の説明をそれぞれ順次行なう。

ａ）．まず、ＰＤフィードバック＋フィードフォーワードホイール角速度の場合（先述の〔１〕，〔２〕，〔３〕，〔９〕－１に相当）の説明を行なう。

この場合、姿勢制御論理演算部２４・４は、各軸毎にＦＩＧ．２４のような、ブロックダイヤグラムを組む。そして、このＦＩＧ．２４の各符号は、以下に示す通りである。

ϕ_i ；本体ｉ軸オイラー角

$\dot{\phi}_i$ ；本体ｉ軸オイラー角時間微分

$\dot{\theta}_{wi}$ ；ｉ軸まわりホイール角速度

$\dot{\theta}_{wi\ ref.}$ ；ｉ軸まわりフィードフォワードホイール角速度

τ_{PDi} ；ｉ軸まわりＰＤフィードバックトルク

τ_{FFi} ；ｉ軸まわりフィードフォワードトルク

τ_{wci} ；ｉ軸まわり制御トルク

G_{Pi} ；ｉ軸まわり比例ゲイン

G_{Di} ；ｉ軸まわり微分ゲイン

G_{wi} ；ｉ軸まわりホイール速度制御比例ゲイン

このような構成の姿勢制御論理演算部２４・４によって、本体ｉ軸オイラー角とその時間微分は、それぞれｉ軸まわりの比例ゲインと微分ゲインを取られ、更に、それらの各出力が加算されて、ｉ軸まわりのＰＤフィードバックトルクとなる。

また、ｉ軸まわりのフィードフォーワードホイール角速度からｉ軸まわりのホイール角速度を減算した出力は、ｉ軸まわりのホイール速度制御比例ゲインを取られて、ｉ軸まわりのフィードフォーワードトルクとして出力される。

そして、これらの両出力のｉ軸まわりのＰＤフィードバックトルクと、ｉ軸まわりのフィードフォーワードトルクとが加算されて、これがｉ軸まわりの制御トルクとして、姿勢制御系アクチュエータ２４・１へと出力されるのである。

ｂ）．ＰＤフィードバック＋フィードフォーワードホイールトルクの場合（先述の〔４〕，〔５〕，〔６〕，〔７〕，〔８〕，〔９〕－２）～６）に相当する。）の説明。

この場合、姿勢制御論理演算部２４・４は、各軸毎にＦＩＧ．２５のような、ブロックダイヤグラムを組む。そして、このＦＩＧ．２５でのτ_{rri}は、ｉ軸まわりのホイールフィードフォーワードトルクであり、他の記号は、ＦＩＧ．２４と同様である。

このような構成の姿勢制御論理演算部２４・４によって、先の場合と同様の要領で得られたｉ軸まわりのＰＤフィードバックトルクは、ｉ軸まわりのホイールフィードフォーワードトルクと加算されて、これがｉ軸まわりの制御トルクとして、姿勢制御系アクチュエータ２４・１へと

出力されるのである。

そしてまた、姿勢制御論理演算部２４・４は、姿勢制御系２４のフィードバック項として、衛星本体の姿勢角，その積分，姿勢角の微分によるＰＩＤフィードバック制御を採用した場合、次に述べる各構成をそれぞれの条件に応じて取るようになっているのである。

〔１１〕．以下、姿勢制御論理演算部２４・４が、先の〔１〕～〔９〕において、姿勢制御系２４のフィードバック項として、衛星本体の姿勢角，その積分，姿勢角の微分によるＰＩＤフィードバック制御を採用した場合の説明をそれぞれ順次行なう。

ｃ）．ＰＩＤフィードバック＋フィードフォワードホイール角速度の場合（〔１〕，〔２〕，〔３〕，〔９〕－１）に相当）の説明。

この場合、姿勢制御論理演算部２４・４は、各軸毎にＦＩＧ．２６のような、ブロックダイヤグラムを組む。そして、このＦＩＧ．２６のG_{ii}は、ｉ軸まわりの積分ゲインであり、その他の記号は、ＦＩＧ．２４のものと同様である。

このような構成の姿勢制御論理演算部２４・４によって、本体ｉ軸オイラー角出力は、ラプラス変換され、さらに、ｉ軸まわりの積分ゲインを取られる。また、これとともに、本体ｉ軸オイラー角出力は、ｉ軸まわりの比例ゲインを取られる。

そして、これらの各出力は、ｉ軸まわりの微分ゲインを取られたのちの本体ｉ軸オイラー角時間微分の出力と加算されて、ｉ軸まわりのＰＩＤフィードバックトルクとなる。

また、ｉ軸まわりのフィードフォーワードホイール角速度から、ｉ軸まわりのホイール角速度を減算した出力は、ｉ軸まわりのホイール速度制御比例ゲインを取られて、ｉ軸まわりのフィードフォーワードトルクとして出力される。

そして、これら両出力のｉ軸まわりのＰＩＤフィードバックトルクとｉ軸まわりのフィードフォーワードトルクとが加算されて、これがｉ軸まわりの制御トルクとして、姿勢制御系アクチュエータ２４・１へと出力されるのである。

ｄ）．ＰＩＤフィードバック＋フィードフォワードホイールトルクの場合（先述の〔４〕，〔５〕，〔６〕，〔７〕，〔８〕，〔９〕－２）～６）に相当する）の説明。

この場合、姿勢制御論理演算部２４・４は、各軸毎にＦＩＧ．２７のような、ブロックダイヤグラムを組む。そして、このＦＩＧ．２７の記号は、先のＦＩＧ．２６のものと同様のものである。

このような構成の姿勢制御論理演算部２４・４によって、先と同様の要領で得られたｉ軸まわりのＰＩＤフィードバックトルクは、ｉ軸まわりのホイールフィードフォーワードトルクと加算されて、これがｉ軸まわりの制御トルクとして、姿勢制御系アクチュエータ２４・１へと出力されるのである。

以上の各説明が、姿勢制御論理演算部２４・４による、各場合におけるフィードフォーワード項とフィードバック項との組み合わせに関する処理を述べたものである。

このように、姿勢制御系２４が、マニピュレータ１１からもたらされる外乱を補償するために、宇宙機１２の姿勢角およびその微分によるＰＤフィードバック制御を行なうか、あるいは、宇宙機１２の姿勢角、その積分、および姿勢角の微分によるＰＩＤフィードバック制御を行なうことにより、マニピュレータ１１の駆動により、マニピュレータ１１から衛星本体の姿勢制御系２４にもたらされる外乱を押さえ込み、宇宙機の姿勢制御性能を高度に保つことができるのである。

上述の構成により、ＦＩＧ．２１に示すように、マニピュレータ制御

系２５は、マニピュレータ関節情報入力部１から関節角時系列データを貰い（ＦＩＧ．２１の①）、その経路に沿うようにマニピュレータ１１をサーボ制御する。

即ち、マニピュレータ制御系２５は、関節角時系列データをマニピュレータ駆動論理演算部２５・２によって受信し、ここで、マニピュレータ駆動アクチュエータ２５・１を目標経路に沿うように駆動させるための電圧信号をつくり出すのである。

その結果、マニピュレータ駆動アクチュエータ２５・１は、この電圧信号に従って、マニピュレータ１を駆動させる。これにより、マニピュレータ１１の付け根を通して宇宙機１２の姿勢に外乱（ＦＩＧ．２１の②）が及び、その姿勢が変動する。

そして、姿勢制御系２４では、宇宙機１２の姿勢変動を姿勢制御センサ系２４・３を通して検出し、その値を姿勢制御論理演算部２４・４に渡す。この値を受けた姿勢制御論理演算部２４・４では、宇宙機１２の姿勢角およびその微分、あるいは宇宙機１２の姿勢角とその積分および姿勢角の微分によって、ＰＤフィードバック制御信号を得て、これを加算器２４・２へと吐き出す。

そして、このＰＤフィードバック制御信号（ＦＩＧ．２１の⑥）は、フィードフォーワード量演算部２６・１から来るフィードフォワード制御信号と、加算器２４・２において合体し（ＦＩＧ．２１の③）、電圧信号に変換されて姿勢制御系アクチュエータ２４・１へ送られる（ＦＩＧ．２１の⑦）。

その結果、マニピュレータ制御系２５と姿勢制御系２４との制御に協調が得られ、宇宙機１２の姿勢を良好に保つように、姿勢制御系アクチュエータ２４・１が可動する。

また、協調制御系２６は、マニピュレータ制御系２５と姿勢制御系２

４とを協調させ、宇宙機１２の姿勢制御性能を良好に保つため、そのフィードフォーワード量演算部２６・１が、マニピュレータ関節角，角速度，角加速度時系列の情報（ＦＩＧ．２１の⑤）を基にして、姿勢制御系アクチュエータ２４・１に受け渡すフィードフォワード角速度、またはフィードフォワードトルクをつくり出す（ＦＩＧ．２１の⑥）。

このように、マニピュレータ１１を有する宇宙機１２において、姿勢制御系２４と、マニピュレータ制御系２５とをそなえるとともに、マニピュレータ制御系２５からの情報に基づき、姿勢制御系２４へフィードフォーワード信号として供給する協調制御系２６をそなえ、この協調制御系２６で、マニピュレータ１１からもたらされる外乱を補償するために、姿勢制御系２４のホイール制御系２７に渡すフィードフォワード量として、角運動量、またはそれをモーメンタムホイール２３・１～２３・３の質量で割ったホイール角速度を取り、モーメンタムホイール２３・１～２３・３の目標角運動量または目標角速度を運動量／角運動量保存則から求めて、モーメンタムホイール２３・１～２３・３を制御するこことともに、この運動量／角運動量保存則の適用に当たって、宇宙機１２本体の角速度に対し、宇宙機１２本体の角速度が０という制約条件を課すか、あるいは、宇宙機１２本体の角速度が定数という制約条件を課すか、または、宇宙機１２本体の角速度が時間の任意関数という制約条件を課すことにより、マニピュレータ１１の駆動によりマニピュレータ１１から衛星本体にもたらされる外乱を、マニピュレータ制御系２５と姿勢制御系２４が協調して制御して押さえ込むことができ、宇宙機１２の姿勢制御性能を高度に保つことができる。

また、このマニピュレータ１１を有する宇宙機１２において、協調制御系２６で、姿勢制御系２４のホイール制御系２７に渡すフィードフォワード量として、トルクを取り、その値を宇宙用逆動力学により求めて、

モーメンタムホイール２３・１～２３・３を制御することとともに、この宇宙用逆動力学の適用に当たって、宇宙機１２本体の角加速度に対し、宇宙機１２本体の角加速度が０という制約条件を課すか、あるいは、宇宙機１２本体の角速度、角加速度に対し、宇宙機１２本体の角速度、角加速度がそれぞれ０という制約条件を課す、または、宇宙機１２本体の角速度、角加速度に対し、宇宙機１２本体の角速度が定数で、宇宙機１２本体の角加速度が０という制約条件を課す、あるいは、宇宙機１２本体の角加速度に対し、宇宙機１２本体の角加速度が時間の任意関数という制約条件を課す、または、宇宙機１２本体の角速度、角加速度に対し、宇宙機１２本体の角速度、角加速度がそれぞれ時間の任意関数という制約条件を課すことにより、フィードフォーワードトルクで、先の角運動量、または、ホイール角速度によるフィードフォーワード量の場合と同様、マニピュレータ１１の駆動によりマニピュレータ１１から衛星本体にもたらされる外乱を、マニピュレータ制御系２５と姿勢制御系２４が協調して制御して押さえ込むことができ、宇宙機１２の姿勢制御性能を高度に保つことができるのである。

さらに、マニピュレータを有する衛星・宇宙ロボットにおいて姿勢制御系を包含したダイナミクスを高速に、即ち姿勢制御系を包含した宇宙機全体に対する３次元ダイナミクスをリアルタイムに計算し、その計算結果をディスプレイ上にリアルタイムに出力できるのである。

また、系全体の運動方程式を高速・高精度に解くことができ、これにより宇宙機全体に対する３次元ダイナミクスのリアルタイム計算を容易に実現できる。

また、本実施例のおいては、マニピュレータ１１を有する宇宙ロボットや人工衛星のごとき宇宙機１２の姿勢制御系に対する３次元ダイナミクスリアルタイムミュレーションやホイールによる姿勢制御を行なって

いたが、ホイールによる姿勢制御のみを行なってもよい。

すなわち、この場合においては、ＦＩＧ．２１に示すものと同様に、マニピュレータ駆動パターンとして、例えば操作者からのマニピュレータ操作情報を受けると、ホイールにより宇宙機の姿勢制御を制御するとともに、マニピュレータを駆動するようになっている。

（ｃ）第３実施例の説明

次に、本発明の第３実施例について説明する。本実施例は、ＦＩＧ．４１に示すようなマニピュレータ１１を有する人工衛星のごとき宇宙機１２について、シミュレーションを行なって姿勢制御を行なうマニピュレータ装置のためのシミュレーション及び制御装置についてのものである。尚、ＦＩＧ．４１において、１３はパドルである。

このマニピュレータ装置のためのシミュレーション及び制御装置は、機能的にはＦＩＧ．４０に示すようなブロック図で表すことができる。即ち、このマニピュレータ装置のためのシミュレーション及び制御装置は、地上にいる操作者３１Ａのもとに設置されるシミュレーション部３１０と軌道上の宇宙機１２に設置される制御部３００に分かれて構成されている。

ここで、シミュレーション部３１０は、初期指令値入力手段としてのマニピュレータ関節情報入力部３１と過大指令値抑制指標予測部（手段）３１０Ａとスケール変換部（手段）３１０Ｂと表示手段としてのグラフィックディスプレイ３２とをそなえている。

マニピュレータ関節情報入力部３１はマニピュレータの経路指令値情報θ（ｔ）を初期指令値として入力するものであり、過大指令値抑制指標予測部３１０Ａはマニピュレータ関節情報入力部３１からの初期指令値θ（ｔ）を受け、マニピュレータ１１に関する力学モデルに基づき、マニピュレータ１１が初期指令値通りに動作した場合に生ずる外乱情報

を過大指令値抑制指標としてリアルタイムで予測（計算）するものである。

スケール変換部３１０Ｂは、過大指令値抑制指標予測部３１０Ａで予測された過大指令値抑制指標に基づき、初期指令値に対しスケール変換を施して中間指令値ｓθ（ｔ）を得るものであり、グラフィックディスプレイ３２は、初期指令値とスケール変換部３１０Ｂで得られる中間指令値ｓθ（ｔ）と後述する制御部３００におけるスケール変換部３５・２からのセンサ値に基づいて、マニピュレータ１１の動きをシミュレート表示するものである。

ここで、過大指令値抑制指標予測部３１０Ａにおいて予測する過大指令値抑制指標として、〔１〕角運動量または運動量を取る方法，〔２〕トルク又は力を取る方法及び〔３〕トルク（力）と角運動量（運動量）とを組み合わせて取る方法がある。以下、これらの方法について説明する。

ここで、以後、各装置の構成を説明するために使用される各式に用いられる記号、および、座標系の説明を行なう。即ち、以後のノーテーションを以下の表のように取る。なお、ここで、大文字は慣性座標系Σ_Aから見たベクトルを示し、小文字はベース固定座標系Σ_0から見たベクトルを示している。

尚、本実施例において、本文中、時間の１回，２回微分を示す時は、ｄ／ｄｔ，d^2／dt^2を用いるが、数式あるいは図面中においてはこの限りでない。

V_i ；慣性座標系Σ_Aに対する座標系Σ_iの原点の速度

$\dot{V}_i$ ；慣性座標系Σ_Aに対する座標系Σ_iの原点の加速度

$\hat{V}_i$ ；慣性座標系Σ_Aに対するリンクｉの重心速度

$\dot{\hat{V}}_i$ ；慣性座標系Σ_Aに対するリンクｉの重心加速度

Ω_i ；慣性座標系Σ_Aに対するリンクｉの角速度

$\dot{\Omega}_i$ ；慣性座標系Σ_Aに対するリンクｉの角加速度

$\mathbf{v}_i$ ；ベース固定座標系Σ_0に対するベクトル$\mathbf{p}_i$の時間微分

$$\mathbf{v}_i \equiv d_0\,\mathbf{p}_i / dt = \mathbf{p}_i'$$

$\mathbf{v}_i'$ ；ベース固定座標系Σ_0に対するベクトル$\mathbf{v}_i$の時間微分

$$\mathbf{v}_i' \equiv d_0\,\mathbf{v}_i / dt = \mathbf{p}_i''$$

$\hat{\mathbf{v}}_i$ ；ベース固定座標系Σ_0に対するベクトル$\hat{\mathbf{r}}_i$の時間微分

$$\hat{\mathbf{v}}_i \equiv d_0\,\hat{\mathbf{r}}_i / dt = \hat{\mathbf{r}}_i'$$

$\hat{\mathbf{v}}_i'$ ；ベース固定座標系Σ_0に対するベクトル$\hat{\mathbf{v}}_i$の時間微分

$$\hat{\mathbf{v}}_i' \equiv d_0\,\hat{\mathbf{v}}_i / dt = \hat{\mathbf{r}}_i''$$

ω_i ；ベース固定座標系Σ_0に対するリンクｉの角速度

ω_i' ；ベース固定座標系Σ_0に対するω_iの時間微分

$$\omega_i' \equiv d_0\,\omega_i / dt$$

注１）慣性座標系Σ_Aに対する時間微分とベース固定座標系Σ_0に対する時間微分とは明確に区別される。

ベクトル$\mathbf{X}$に対し、

Σ_Aに対する時間微分；　$\dot{\mathbf{X}} \equiv d\mathbf{X}/dt$

Σ_0に対する時間微分；　$\mathbf{X}' \equiv d_0\,\mathbf{X}/dt$

$\dot{\mathbf{X}}$と$\mathbf{X}'$の関係は次式の通り

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{X}' + \Omega_0 \times \mathbf{X}$$

また、全系に対する座標系は、ＦＩＧ．４２に示すようなＤｅｎａｖｉｔ－Ｈａｒｔｅｎｂｅｒｇ座標系を採用する。

ここで、ＦＩＧ．４２の座標系Σ_i，Σ_{i-1}で表示されたベクトルをそれぞれ^{i}a，^{i-1}a（実際は、これらの^{i}a，^{i-1}aについてはベクトル表記をすべきであるが、表記の都合上、スカラ表記されている。以下においても、このようにベクトル表記をすべきであるが、表記の都合

上、スカラ表記する場合がある。）と定義する時、^{i}a，^{i-1}aは次式で関係づけられる（ＦＩＧ．４３参照）。（数式中の１は筆記体を使用している場合がある。）

$$^{i-1}a = {}^{i-1}A_i \, {}^{i}a + {}^{i-1}\ell_i$$

ここで、$^{i-1}A_i$は座標系間の回転を表す直交行列であり、$^{i-1}l_i$（ベクトル）は、座標原点O_{i-1}からO_iへ至るベクトルをΣ_{i-1}系で表示したものである。

なお、$^{i-1}A_i$，$^{i-1}l_i$（ベクトル）はＤｅｎａｖｉｔ－Ｈａｒｔｅｎｂｅｒｇ座標系表示として標準的パラメータを取るとき、以下のように表現される。

$$^{i-1}A_i \equiv \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i \end{bmatrix} \qquad (i = 1 \sim \ell)$$

$$^{i-1}\ell_i \equiv \begin{bmatrix} b_i \cos\theta_i \\ b_i \sin\theta_i \\ d_i \end{bmatrix} \qquad (i = 1 \sim \ell)$$

また、Ｄｅｎａｖｉｔ－Ｈａｒｔｅｎｂｅｒｇ座標系におけるパラメータの定義はＦＩＧ．４４に示す通りであるが、この座標系は、次表のような基準に従って設定される。

z_i 軸；関節ｉ＋１軸

x_i 軸；z_{i-1}からz_iに向けての共通垂線

y_i 軸；右手座標系となるように構成

b_i ；z_i，z_{i-1} 間の共通垂線の長さ

d_i ；x_i，x_{i-1} 間の長さ（z_{i-1} 座標値）

α_i ；z_i，z_{i-1} 間の角度（x_i 軸まわりに α_i 回転すると z_{i-1} 方向が z_i 方向と一致する。）

θ_i ；x_i，x_{i-1} 間の角度（z_{i-1} 軸まわりに θ_i 回転すると x_{i-1} 方向が x_i 方向と一致する。）

さらに、${}^{i}a$ において、i＝－1の時は、慣性系表示を表す。

従って、以下のようになる。

$$ {}^{i}a\Big|_{i=-1} = {}^{A}a \quad , \quad {}^{i}A\Big|_{i=-1} = {}^{A}\mathbb{A} $$

この場合、左肩添字Aは、Ａｂｓｏｌｕｔｅ　ｃｏｏｒｄｉｎａｔｅの頭文字を意味し、特に以下の式は、慣性系とベース基準座標系間の変換行列を表す。

$$ {}^{i-1}A_i\Big|_{i=0} = {}^{A}A_0 $$

〔１〕角運度量または運動量に基づいて過大指令値抑制指標を予測する場合

マニピュレータ１１の手先を通して対象に及ぼされる外乱角運動量／外乱運動量は、作用・反作用の原理により、マニピュレータ１１の付け根に作用する角運動量／運動量に反映する。

このため、以下に示す計算により運動量／角運動量を算出し、これに基づいて過大指令値抑制指標を予測する。

ここで、運動量／角運動量保存則、即ち、２つの方程式は、以下の式（Ａ６），（Ａ７）に示される。

$$\sum_{i=0}^{\ell} m_i \hat{V}_i = \mathbb{Q} \text{ (given constant)} \quad ; \text{運動量保存則} \quad (\Lambda 6)$$

$$\sum_{i=0}^{\ell} (m_i \hat{R}_i \times \hat{V}_i + I_i \Omega_i) = \mathbb{L} \text{ (given constant)}$$
$$; \text{角運動量保存則} \quad (\Lambda 7)$$

そして、マニピュレータ関節角とホイール関節角とについて、以下のような、定義を行なう（本実施例では、説明を簡単にするため、モーメンタムホイール３・１～３・３の数を３つとしているのである）。

$$q = \begin{bmatrix} \Theta_m \\ \Theta_w \end{bmatrix},$$

$$\begin{cases} \Theta_m = [\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_\ell]^T & ; \text{マニピュレータ関節角} \\ \Theta_w = [\theta_{w1}, \theta_{w2}, \theta_{w3}]^T & ; \text{ホイール関節角} \end{cases}$$

この時、式（Ａ６），（Ａ７）は、以下の式（Ａ７－１）のように置き換えることができる。

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ \Omega_0 \end{bmatrix} = \mathbb{S}^{-1} \begin{bmatrix} h_v \\ h_\omega \end{bmatrix}, \quad \begin{cases} h_v = \mathbb{Q} - \sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)}^{\ell} m_i \hat{V}_i \\ h_\omega = \mathbb{L} - \sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)}^{\ell} (m_i \hat{R}_i \times \hat{V}_i + I_i \omega_i) \end{cases} \quad (\Lambda 7-1)$$

V_0 ：衛星本体の速度
Ω_0 ：衛星本体の角速度

尚、この式のＳ（このＳも表示上の都合でスカラ表示してあるだけで、先のａの場合と同様の扱いとする。）の定義は、以下に示す通りである。

$$\$ = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}$$

$$\$_{11} = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & M \end{bmatrix}, \quad M = \sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)}^{\ell} m_i \quad (\text{全質量})$$

注）$i=(0, w_1, w_2, w_3)$は、$i=0$の場合に、衛星本体，ホイール1，ホイール2，ホイール3についてｓｕｍｍａｔｉｏｎを行なうことを意味する。

$$S_{12} = \sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)}^{\ell} m_i \begin{bmatrix} 0 & \hat{r}_{zi} & -\hat{r}_{yi} \\ -\hat{r}_{zi} & 0 & \hat{r}_{xi} \\ \hat{r}_{yi} & -\hat{r}_{xi} & 0 \end{bmatrix}$$

$$S_{21} = -\sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)}^{\ell} m_i \begin{bmatrix} 0 & \hat{R}_{zi} & -\hat{R}_{yi} \\ -\hat{R}_{zi} & 0 & \hat{R}_{xi} \\ \hat{R}_{yi} & -\hat{R}_{xi} & 0 \end{bmatrix}$$

$$S_{22} = \sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)}^{\ell} \left\{ I_i + m_i \begin{bmatrix} \hat{R}_{zi}\hat{r}_{zi} + \hat{R}_{yi}\hat{r}_{yi} & -\hat{R}_{yi}\hat{r}_{xi} & -\hat{R}_{zi}\hat{r}_{xi} \\ -\hat{R}_{xi}\hat{r}_{yi} & \hat{R}_{zi}\hat{r}_{zi} + \hat{R}_{xi}\hat{r}_{xi} & -\hat{R}_{zi}\hat{r}_{yi} \\ -\hat{R}_{xi}\hat{r}_{zi} & -\hat{R}_{yi}\hat{r}_{zi} & \hat{R}_{yi}\hat{r}_{yi} + \hat{R}_{xi}\hat{r}_{xi} \end{bmatrix} \right\}$$

式（Ａ７－１）に基づいて$\begin{bmatrix} V_0 \\ \Omega_0 \end{bmatrix}$を求めるアルゴリズムＢＡは以下の通りである。

ここで、ＦＩＧ．４５に示す各計算は、以下のような構成をとるものである。

即ち、初期値設定（ステップＢＡ１）は、以下の各演算によって構成されたものである。

$$\hat{R}_0 \Big|_{t=0} \ ; \mathrm{given}$$

$$\theta_i \Big|_{t=0} \ ; \mathrm{given}\ (i=1\sim\ell)$$

$$\omega_0 = \omega_0' = 0,\ \hat{V}_0 = \hat{V}_0' = 0,\ v_0 = v_0' = 0$$

$${}^{i-1}Z_{i-1} = (0,\ 0,\ 1)^T$$

$$\hat{A}_0 \ ; \mathrm{given}$$

また、正順繰り返し計算（ステップＢＡ２）は、以下の各演算によって構成されたものである。

$$\text{①}\ {}^{i}\omega_{i} = \begin{cases} {}^{i}A_{i-1}\,({}^{i-1}\omega_{i-1} + \dot{\theta}_{i}\,{}^{i-1}Z_{i-1}) & \text{for R} \\ {}^{i}A_{i-1}\,{}^{i-1}\omega_{i-1} & \text{for T} \end{cases}$$

$$\text{②}\ {}^{i}\dot{\omega}_{i} = \begin{cases} {}^{i}A_{i-1}\,({}^{i-1}\dot{\omega}_{i-1} + \ddot{\theta}_{i}\,{}^{i-1}Z_{i-1} + \dot{\theta}_{i}\,{}^{i-1}\omega_{i-1} \times {}^{i-1}Z_{i-1}) & \text{for R} \\ {}^{i}A_{i-1}\,{}^{i-1}\dot{\omega}_{i-1} & \text{for T} \end{cases}$$

$$\text{③}\ {}^{i}v_{i} = \begin{cases} {}^{i}\omega_{i} \times {}^{i}\ell_{i} + {}^{i}A_{i-1}\,{}^{i-1}v_{i-1} & \text{for R} \\ {}^{i}\omega_{i} \times {}^{i}\ell_{i} + {}^{i}A_{i-1}\,(\dot{d}_{i}\,{}^{i-1}Z_{i-1} + {}^{i-1}v_{i-1}) & \text{for T} \end{cases}$$

$$\text{④}\ {}^{i}\hat{v}_{i} = {}^{i}v_{i} + {}^{i}\omega_{i} \times {}^{i}\hat{r}_{i}$$

$$\text{⑤}\ {}^{i}\dot{v}_{i} = \begin{cases} {}^{i}\dot{\omega}_{i} \times {}^{i}\ell_{i} + {}^{i}\omega_{i} \times ({}^{i}\omega_{i} \times {}^{i}\ell_{i}) + {}^{i}A_{i-1}\,{}^{i-1}\dot{v}_{i-1} & \text{for R} \\ {}^{i}A_{i-1}\,(\ddot{d}_{i}\,{}^{i-1}Z_{i-1} + {}^{i-1}\dot{v}_{i-1}) + {}^{i}\dot{\omega}_{i} \times {}^{i}\ell_{i} + 2\dot{d}_{i}\,{}^{i}\omega_{i} \times ({}^{i}A_{i-1}\,{}^{i-1}Z_{i-1}) + {}^{i}\omega_{i} \times ({}^{i}\omega_{i} \times {}^{i}\ell_{i}) & \text{for T} \end{cases}$$

$$⑥\ {}^{i}\hat{v}_{i}' = {}^{i}v_{i}' + {}^{i}\omega_{i}' \times {}^{i}\hat{r}_{i}' + {}^{i}\omega_{i} \times ({}^{i}\omega_{i} \times {}^{i}\hat{r}_{i}')$$

$$⑦\ {}^{i}\hat{r}_{i} = {}^{i}\hat{r}_{i}' + {}^{i}\ell_{i} - {}^{i}A_{i-1}\ {}^{i-1}\hat{r}_{i-1}' + {}^{i}A_{i-1}\ {}^{i-1}\hat{r}_{i-1}$$

$$⑧\ {}^{A}\mathbb{A}_{i} = {}^{A}\mathbb{A}_{i-1}\ {}^{i-1}A_{i}$$

$$⑨\ {}^{A}\hat{r}_{i} = {}^{A}\mathbb{A}_{i}\ {}^{i}\hat{r}_{i}$$

$$⑩\ {}^{A}\hat{R}_{i} = {}^{A}\hat{r}_{i} - (1/M) \times \sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)}^{\ell} m_{i}\ {}^{A}\hat{r}_{i} + ({}^{A}Q_{t} + C)/M$$

更に、ベース速度，角速度の計算（ステップＢＡ３）は、以下の各演算によって構成されたものである。

①${}^{A}S_{12}$の計算

②${}^{A}S_{21}$の計算

$$③\ {}^{A}I_{i} = {}^{A}A_{i}\ {}^{i}\mathbb{I}_{i}\ {}^{i}A_{A}$$

$$④\ {}^{A}S_{22} = \sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)} \left\{ {}^{A}A_{i}\ {}^{i}I_{i}\ {}^{i}A_{A} - m_{i}\ {}^{A}\hat{\mathbb{R}}_{i}\ {}^{A}\hat{\mathbb{r}}_{i} \right\}$$

$$⑤\ {}^{A}h_{v} = {}^{A}Q - \sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)}^{t} m_{i}\ {}^{A}\hat{v}_{i}$$

$$⑥\ {}^{\wedge}\mathbb{h}_{\omega} = {}^{\wedge}\mathbb{L} - \sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)}^{\ell} (m_i\ {}^{\wedge}\hat{\mathbb{R}}_i \times {}^{\wedge}\hat{\mathbb{v}}_i + {}^{\wedge}\mathbb{A}_i\ {}^{i}\mathbb{I}_i\ {}^{i}\omega_i)$$

$$⑦\ \begin{bmatrix} {}^{\wedge}\mathbb{V}_0 \\ {}^{\wedge}\Omega_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & {}^{\wedge}S_{12} \\ {}^{\wedge}S_{21} & {}^{\wedge}S_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} {}^{\wedge}\mathbb{h}_v \\ {}^{\wedge}\mathbb{h}_{\omega} \end{bmatrix}$$

尚、このアルゴリズムＢＡの各演算では、以下の定義がされる。

${}^{\wedge}\hat{\mathbb{R}}_i$; ${}^{\wedge}\underline{\mathbb{r}}_i$; の定義

一般に、ベクトル$\mathbb{a} \times \mathbb{b} = \underline{\mathbb{b}}\,\mathbb{a}$

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_y b_z - a\ b_y \\ a_z b_x - a_x b_z \\ a_x b_y - a_y b \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & b_z & -b_y \\ -b_z & 0 & b_x \\ b_y & -b_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}$$

ゆえに、

$$\underline{\mathbb{b}} \equiv \begin{bmatrix} 0 & b_z & -b_y \\ -b_z & 0 & b_x \\ b_y & -b_x & 0 \end{bmatrix}$$

このようにして、式（Ａ７－１）に基づいて得られる$\begin{bmatrix} V_0 \\ \Omega_0 \end{bmatrix}$に、本体の質量$M_0$とイナーシャ$I_0$を掛けたものがそれぞれ運動量，角運動

量である。即ち、 $M_0 V_0$ ；運動量

$I_0 \Omega_0$ ；角運動量

〔2〕力またはトルクに基づいて過大指令値抑制指標を予測する場合

マニピュータ１１の手先を通して対象に及ぼされる外乱トルク／外乱力は、作用／反作用の原理により、マニピュレータ１１の付け根に作用するトルク／力に反映する。

このため、以下に示すような計算によりトルク／力を算出し、これにより、過大指令値抑制指標を予測する。

基本となる式は、運動量・角運動量保存則の微分，すなわち内力、内部トルクの総和＝０の式である。

$$\begin{cases} \sum_{i=(0,w1,w2,w3)}^{\ell} m_i \dot{\hat{V}}_i = 0 & (B9) \\ \sum_{i=(0,w1,w2,w3)}^{\ell} (m_i \hat{R}_i \times \dot{\hat{V}}_i + (d\mathbb{I}_i \Omega_i / dt)) = 0 & (B10) \end{cases}$$

式（Ｂ９），（Ｂ１０）は、それぞれ以下のように書き換えることができる。

$$\begin{cases} \sum_{i=(0,w1,w2,w3)}^{\ell} \mathbf{F}_i = 0 & (B11) \\ \sum_{i=(0,w1,w2,w3)}^{\ell} (\mathbb{R}_i \times \mathbb{F}_i + \mathbb{N}_i) = 0 & (B12) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{\Omega}_i = \dot{\Omega}_0 + \dot{\omega}_i = \dot{\Omega}_0 + \omega_i' + \Omega_0 \times \omega_i & (B13) \\ \dot{\hat{V}}_i = \dot{V}_0 + \dot{\Omega}_0 \times \hat{r}_i + 2\Omega_0 \times \hat{v}_i + \Omega_0 \times (\Omega_0 \times \hat{r}_i) + \hat{v}_i' & (B14) \end{cases}$$

式（Ｂ１３），（Ｂ１４）を使い、式（Ｂ９），（Ｂ１０）を変形すると、

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \\ \dot{\Omega}_0 \end{bmatrix} = \mathbb{S}^{-1} \begin{bmatrix} -\sum_{i=(0,w1,w2,w3)}^{\ell} F_i \\ \\ \sum_{i=(0,w1,w2,w3)}^{\ell} (R_i \times F_i + N_i) \end{bmatrix} + \mathbb{S}^{-1} \begin{bmatrix} F_{OUT} \\ \\ N_{OUT} \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} F_i = m_i (2\Omega_0 \times v_i + \Omega_0 \times (\Omega_0 \times \hat{r}_i) + \hat{v}_i') & (B15) \\ N_i = I_i \omega_i' + I_i \Omega_0 \times \omega_i + \Omega_i \times (I_i \Omega_i) & (B16) \\ & (B17) \end{cases}$$

F_{OUT} ：外力の総和，N_{OUT} ：外部トルクの総和

式（Ｂ１５）に基づいて、$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \\ \dot{\Omega}_0 \end{bmatrix}$ を求めるアルゴリズムＢＢは以下の通りである。

このアルゴリズムＢＢは、先のアルゴリズムＢＡの運動量／角運動量保存則から、衛星本体の速度と角速度とを求め、その値を式（Ｂ１５）に適用する構成になっているものである。

つまり、このアルゴリズムＢＢは、初期値設定（ステップＢＢ１）を施したのち、正順繰り返し計算（ステップＢＢ２）を行ない、さらに、ベース速度，角速度の計算（ステップＢＢ３）を行なったのち、ベース加速度，角加速度の計算（ステップＢＢ４）を行なうようになっているのである。

ここで、ＦＩＧ．４６に示す、各計算は、以下に示すような構成のものである。

即ち、初期値設定（ステップＢＢ１）は、以下の各演算によって構成されたものである。

$$^{\wedge}\hat{\mathbb{R}}_0 \Big|_{t=0} \quad ; given$$

$$0_i \Big|_{t=0} \quad ; given \ (i=1 \sim \ell)$$

$$\omega_0 = \omega_0' = 0, \ \hat{v}_0 = \hat{v}_0' = 0, \ v_0 = v_0' = 0$$

$$^{i-1}\mathbb{Z}_{i-1} = (0, \ 0, \ 1)^T$$

$$^{\wedge}\Lambda_0 \quad ; given$$

また、正順繰り返し計算（ステップＢＢ２）は、以下の各演算によって構成されたものである。

$$\text{(i)} \ ^i\omega_i = \begin{cases} ^i\Lambda_{i-1} \ (\ ^{i-1}\omega_{i-1} + \dot{\theta}_i \ ^{i-1}\mathbb{Z}_{i-1}) & for \ R \\ ^i\Lambda_{i-1} \ ^{i-1}\omega_{i-1} & for \ T \end{cases}$$

$$② \ {}^{i}\omega_{i}' = \begin{cases} {}^{i}A_{i-1}\left({}^{i-1}\omega_{i-1}' + \ddot{\theta}_{i}\,{}^{i-1}Z_{i-1} + \dot{\theta}_{i}\,{}^{i-1}\omega_{i-1} \times {}^{i-1}Z_{i-1}\right) & \text{for R} \\ {}^{i}A_{i-1}\,{}^{i-1}\omega_{i-1}' & \text{for T} \end{cases}$$

$$③ \ {}^{i}v_{i} = \begin{cases} {}^{i}\omega_{i} \times {}^{i}\ell_{i} + {}^{i}A_{i-1}\,{}^{i-1}v_{i-1} & \text{for R} \\ {}^{i}\omega_{i} \times {}^{i}\ell_{i} + {}^{i}A_{i-1}\left(\dot{d}_{i}\,{}^{i-1}Z_{i-1} + {}^{i-1}v_{i-1}\right) & \text{for T} \end{cases}$$

$$④ \ {}^{i}\hat{v}_{i} = {}^{i}v_{i} + {}^{i}\omega_{i} \times {}^{i}\hat{r}_{i}$$

$$⑤ \ {}^{i}v_{i}' = \begin{cases} {}^{i}\omega_{i}' \times {}^{i}\ell_{i} + {}^{i}\omega_{i} \times \left({}^{i}\omega_{i} \times {}^{i}\ell_{i}\right) + {}^{i}A_{i-1}\,{}^{i-1}v_{i-1}' & \text{for R} \\ {}^{i}A_{i-1}\left(\ddot{d}_{i}\,{}^{i-1}Z_{i-1} + {}^{i-1}v_{i-1}'\right) + {}^{i}\omega_{i}' \times {}^{i}\ell_{i} + 2\dot{d}_{i}\,{}^{i}\omega_{i} \times \left({}^{i}A_{i-1}\,{}^{i-1}Z_{i-1}\right) + {}^{i}\omega_{i} \times \left({}^{i}\omega_{i} \times {}^{i}\ell_{i}\right) & \text{for T} \end{cases}$$

$$⑥ \ {}^{i}\hat{v}_{i}' = {}^{i}v_{i}' + {}^{i}\omega_{i}' \times {}^{i}\hat{r}_{i} + {}^{i}\omega_{i} \times \left({}^{i}\omega_{i} \times {}^{i}\hat{r}_{i}\right)$$

$$⑦ \ {}^{i}\hat{r}_{i} = {}^{i}\hat{r}_{i} + {}^{i}\ell_{i} - {}^{i}A_{i-1}\,{}^{i-1}\hat{r}_{i-1} + {}^{i}A_{i-1}\,{}^{i-1}\hat{r}_{i-1}$$

$$⑧ \ {}^{n}A_{i} = {}^{n}A_{i-1}\,{}^{i-1}A_{i}$$

⑨ $^{\wedge}\hat{\mathbb{r}}_i = {}^{\wedge}\mathbb{A}_i \ {}^{i}\hat{r}_i$

⑩ $^{\wedge}\hat{\mathbb{R}}_i = {}^{\wedge}\hat{\mathbb{r}}_i - (1/M) \times \sum_{i=(1,w_1,w_2,w_3)}^{\ell} m_i \ {}^{\wedge}\hat{\mathbb{r}}_i + ({}^{\wedge}\mathbb{Q}_1 + \mathbb{C}) / M$

更に、ベース速度，角速度の計算（ステップＢＢ３）は、以下の各演算によって構成されたものである。

①$^{\wedge}S_{12}$の計算

②$^{\wedge}S_{21}$の計算

③$^{\wedge}\mathbb{I}_i = {}^{\wedge}A_i \ {}^{i}\mathbb{I}_i \ {}^{i}A_{\wedge}$

④$^{\wedge}S_{22} = \sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)}^{\ell} \left\{ {}^{\wedge}A_i \ {}^{i}\mathbb{I}_i \ {}^{i}A_{\wedge} - m_i \ {}^{\wedge}\underline{\hat{R}}_i \ {}^{\wedge}\underline{\hat{\mathbb{r}}}_i \right\}$

⑤$^{\wedge}\mathbb{h}_v = {}^{\wedge}\mathbb{Q} - \sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)}^{\ell} m_i \ {}^{\wedge}\hat{\mathbb{v}}_i$

⑥$^{\wedge}\mathbb{h}_\omega = {}^{\wedge}\mathbb{L} - \sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)}^{\ell} (m_i \ {}^{\wedge}\hat{\mathbb{R}}_i \times {}^{\wedge}\hat{\mathbb{v}}_i + {}^{\wedge}A_i \ {}^{i}\mathbb{I}_i \ {}^{i}\omega_i)$

⑦ $$\begin{bmatrix} {}^{\wedge}\mathbb{V}_0 \\ {}^{\wedge}\Omega_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & {}^{\wedge}S_{12} \\ {}^{\wedge}S_{21} & {}^{\wedge}S_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} {}^{\wedge}\mathbb{h}_v \\ {}^{\wedge}\mathbb{h}_\omega \end{bmatrix}$$

そして、ベース加速度，角加速度の計算（ステップＢＢ４）は、以下の各演算によって構成されたものである。

$$\textcircled{1}\ {}^{A}\hat{\dot{V}}_i' = {}^{A}A_i \ {}^{i}\hat{\dot{V}}_i'$$

$$\textcircled{2}\ {}^{A}\mathcal{F}_i = m_i \left(2\,{}^{A}\Omega_0 \times {}^{A}\hat{V}_i + {}^{A}\Omega_0 \times \left({}^{A}\Omega_0 \times {}^{A}\hat{r}_i\right) + {}^{A}\hat{\dot{V}}_i'\right)$$

$$\textcircled{3}\ {}^{i}\Omega_0 = {}^{i}A_A \ {}^{A}\Omega_0$$

$$\textcircled{4}\ {}^{i}\Omega_i = {}^{i}\Omega_0 + {}^{i}\omega_i$$

$$\textcircled{5}\ {}^{A}\mathcal{N}_i = {}^{A}A_i \ {}^{i}I_i \ {}^{i}\dot{\omega}_i' + {}^{A}A_i \ {}^{i}I_i \ {}^{i}\Omega_0 \times {}^{i}\omega_i + {}^{A}A_i \ {}^{i}\Omega_i \times \left({}^{i}I_i \ {}^{i}\Omega_i\right)$$

$$\textcircled{6}\ -\sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)}^{l} {}^{A}\mathcal{F}_i \equiv {}^{A}W_f$$

$$\textcircled{7}\ -\sum_{i=(0,w_1,w_2,w_3)}^{l} \left({}^{A}\hat{R}_i \times {}^{A}\mathcal{F}_i + {}^{A}\mathcal{N}_i\right) \equiv {}^{A}W_n$$

$$\textcircled{8}\ \begin{bmatrix} {}^{A}\dot{V}_0 \\ {}^{A}\dot{\Omega}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & {}^{A}S_{12} \\ {}^{A}S_{21} & {}^{A}S_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} {}^{A}W_f \\ {}^{A}W_n \end{bmatrix}$$

〔３〕角運度量／運動量，トルク／力の組合せに基づいて過大指令値抑制指標を予測する場合

前述したように、マニピュレータ１１の手先を通して対象に及ぼされる角運動量／運動量，トルク／力は作用・反作用の原理により、マニピュレータ１１の付け根に作用する角運動量／運動量，トルク／力に反映する。

これら角運動量／運動量，トルク／力は、それぞれ前述の〔１〕，〔２〕に示す計算により算出される。

〔４〕速度抑制におけるマニピュレータ関節角の微分項の算出法

前述の〔１〕，〔２〕で詳述したように、スケール変換の指標を計算するには、マニピュレータ１１の関節角の一階微分（ｄθ／ｄｔ）及び二階微分（$d^2\theta/dt^2$）が必要である。

マニピュレータ１１の初期指令値は、関節角時系列θ_i（ｔ）（ｉ＝１～１）で与えられるので、θ_i（ｔ）からｄθ／ｄｔ，$d^2\theta/dt^2$を計算する必要がある。

このため、ＦＩＧ．４７に示すような計算式により、ｄθ／ｄｔ，$d^2\theta/dt^2$を求めている。

すなわち、初期指令値としてのθ_i（ｔ）について（ステップＢＣ１）、ステップＢＣ２に示すような変位の計算を行なう。そして、ステップＢＣ３に示す式の計算結果をθ（ｔ）の一階微分（ｄθ／ｄｔ）として算出する。

また、二階微分の算出にあたっては、ステップＢＣ４のように、θ（ｔ）の一階微分（ｄθ／ｄｔ）の変位の計算を行ない、これを用いてステップＢＣ５の式の計算結果をθ（ｔ）の二階微分（$d^2\theta/dt^2$）として算出する。

これにより、過大指令値抑制指標を求める際に使用する初期指令値の

微分情報として、初期指令値の微分値について平均化処理を施したものが使用されるようになっている。

このような計算により、スケール変換部３１０Ｂでは、過大指令値抑制指標予測部３１０Ａにて予測された過大指令値抑制指標に基づいて、スケールを変換して中間指令値ｓθ（ｔ）を得るが、このスケールの変換態様は、例えばＦＩＧ．４８に示す通りである。

すなわち、初期指令値としてのアーム関節角時系列データΘ（ｔ）と（ステップＢＤ１）、過大指令値抑制指標としての運動量／角運動量またはトルク／力に関する時系列データ〔ｍｘ（ｔ），ｍｙ（ｔ），ｍｚ（ｔ）〕を入力する（ステップＢＤ２）。

そして、ステップＢＤ３に示すように、ｍｘ（ｔ），ｍｙ（ｔ），ｍｚ（ｔ）についてのしきい値関数〔Ｓｘ（ｔ），Ｓｙ（ｔ），Ｓｚ（ｔ）〕について計算し、このしきい値関数に基づいて、ステップＢＤ４に示すような大小判定を行なうことにより、Ｓ（ｔ）を決定し、このＳ（ｔ）に基づいて初期指令値が過大指令値かどうかを判定している。

すなわち、各軸におけるしきい値関数が１以下である場合は、初期指令値の値をそのままＳ（ｔ）とし、そうでない場合は、しきい値関数の最大値をＳ（ｔ）として、このＳ（ｔ）を用いることにより、ステップＢＤ５に示すように、初期指令値として設定されたアーム関節角の速度が抑制されている。

ここで、T_s は初期指令値としての入力データのサンプリング間隔である。

なお、スケールの変換方法としては、このようなＦＩＧ．４８に示すもののほかに、ＦＩＧ．４９に示すように、指数関数を導入することもできる。

すなわち、この図に示す方法によれば、ステップＢＥ１～ステップＢ

Ｅ４において、ＦＩＧ．４８におけるステップＢＤ１～ステップＢＤ４と同様に、初期指令値としてのアーム関節角時系列データΘ（ｔ）と過大指令値抑制指標としての運動量／角運動量またはトルク／力に関する時系列データ〔ｍｘ（ｔ），ｍｙ（ｔ），ｍｚ（ｔ）〕を入力することにより、Ｓ（ｔ）を決定する。

そして、上記のステップＢＥ４で得られたＳ（ｔ）について、ステップＢＥ５に示すような、指数変換演算を施したものをＳ（ｔ）とし、このＳ（ｔ）を用いることにより、ステップＢＥ６に示すように、中間指令値としてのｓθ（ｔ）は、初期指令値として設定されたアーム関節角の速度が抑制されている。

既述したように、初期指令値θ（ｔ）と上記のようにして出力される中間指令値としてのｓθ（ｔ）と軌道上のスケール変換部３５・２からのセンサ値に基づいて、グラフィックディスプレイ３２では、マニピュレータ１１の動きがシミュレート表示されるが、このシミュレート表示は、ＦＩＧ．５２に示すような態様で行なわれる。

すなわち、このＦＩＧ．５２において、操作者３１Ａから初期指令値が入力されると、例えば（ａ）に示すような画面が構成され、その後中間指令値が計算され、軌道上のマニピュレータ１１の関節角が姿勢センサ系３４・３より入力されると、（ｂ）に示すような画面が構成される。この画面は適宜オーバレイすることにより、操作者３１Ａのマニピュレータ操作を支援するようになっている。

さらに、マニピュレータ１１の運用に際し、操作者３１Ａからのマニピュレータ１１の初期指令値θ（ｔ），中間指令値ｓθ（ｔ）及び到達値（軌道上のスケール変換部３５・２からの現在の関節角）の間に大きな開きが生じた場合は、中間指令値を全てリセットし、マニピュレータ１１の初期値を現在の到達点に設定し直してグラフィックディスプレイ

３２に表示し、運用を再開するようになっている。

すなわち、中間指令値ｓθ（ｔ）に基づくマニピュレータ１１の動きに加えて、初期指令値θ（ｔ）及び現在のマニピュレータ位置を表す到達値に基づくマニピュレータ１１の動きをそれぞれシミュレート表示するとともに、初期指令値θ（ｔ），中間指令値ｓθ（ｔ）及び到達値の間に、所定値以上の偏差が生じると、現在のマニピュレータ到達点以降の初期指令値θ（ｔ），中間指令値ｓθ（ｔ）をリセットし、マニピュレータ１１の初期値を現在の到達点に設定し直すようになっているのである。

ところで、軌道上の宇宙機１２に設置された制御部３００は、ＦＩＧ．４０及びＦＩＧ．５０に示すように、姿勢制御系３４，姿勢制御センサ系３４・３，マニピュレータ制御系３５及び協調制御系３６・１に分けられる。

ここで、マニピュレータ制御系３５は、操作者３１Ａからシミュレーション部３１０に入力された初期指令値について、スケール変換部３１０Ｂにてスケール変換の施された中間指令値を貰い（ＦＩＧ．５０の①）、その経路に沿うようにデータを補正して、宇宙機１２付きのマニピュレータ１１をサーボ制御する、マニピュレータ駆動論理演算部としてのスケール変換部（手段）３５・２とマニピュレータ駆動アクチュエータ（ロボット系）３５・１とで構成されている。

すなわち、スケール変換部３５・２は、シミュレーション部３１０におけるスケール変換部３１０Ｂから入力される関節時系列データについて、姿勢制御センサ系３４・３からの姿勢角／ホイール角速度検出情報に基づいて補正し、マニピュレータ駆動アクチュエータ３５・１を目標経路に沿うように駆動させるための電気信号を作り出すものである。

つまり、マニピュレータ１１を制御するに際しては、初期指令値に対

しスケール変換を施した第１中間指令値について、更にマニピュレータ系の実外乱に基づいて抑制処理を施すことにより、第２中間指令値を得たあと、この第２段中間指令値に従って、マニピュレータ１１を制御するようになっているのである。

さらに、このスケール変換部３５・２は、地上のシミュレーション部３１０におけるスケール変換部３１０Ｂに比して、予測された角運動量／運動量またはトルク／力あるいはこれら双方にもとづいてスケール変換を行なうのでなく、姿勢制御センサ系３４・３で検出された角運動量／運動量またはトルク／力あるいはこれら双方に基づいてスケール変換を行なう点が異なり、スケール変換の方法は、前述のスケール変換部３１０Ｂにおける方法と同様である。

したがって、スケール変換部３５・２における、シミュレーション部３１０からの関節時系列データについての姿勢角／ホイール角速度検出情報に基づく補正は、前述のＦＩＧ．４８あるいはＦＩＧ．４９に示す方法により行なわれる。

また、マニピュレータ駆動アクチュエータ３５・１は、スケール変換部３５・２からの電圧信号の示す、目標経路（マニピュレータの関節角，角速度，角加速度）に沿うように駆動するものである。

ところで、スケール変換部３５・２は、スケール変換の周期よりも、マニピュレータ駆動アクチュエータ３５・１に出力する電気信号の周期を短くとることにより、マニピュレータ１１の制御周期を短くして、より円滑に動作するようになっている。

ここで、スケール変換部３５・２からの電圧信号は、以下に示すような方法で生成される。

〔５〕マニピュレータの目標経路生成－１

マニピュレータ１１の目標経路の生成する際に、以下のような速度ス

ケール変換とスプライン補間計算とを結び付け、一階微分に対し、ＦＩＧ．５１に示すような滑らかな目標経路を生成する。

ここで、力学計算の周期、即ち速度スケールの変換を行なう周期をT_Dとし、マニピュレータ制御周期をT_{MC}とする。

θ_i，θ_{i+1}の間を次式に基づいてスプライン補間する。

$$\theta_i(u) = (1/2)u^2(u-1)\theta_{i+2} + (1/2)u(1+4u-3u^2)\theta_{i+1} + (1/2)(u-1)(3u^2-2u-2)\theta_i - (1/2)u^2(u-1)\theta_{i-1}$$

$$(0 \leqq u \leqq 1) \qquad (B8-1)$$

この時、

$$\begin{cases} \theta_i(0) = \theta_i \\ \theta_i(1) = \theta_{i+1} \\ \dot{\theta}_i(0) = \dfrac{1}{T_D}\dfrac{d\theta_i}{du}\Big|_{u=0} = \dfrac{1}{2T_D}(\theta_{i+1} - \theta_{i-1}) \\ \dot{\theta}_i(1) = \dfrac{1}{T_D}\dfrac{d\theta_i}{du}\Big|_{u=1} = \dfrac{1}{2T_D}(\theta_{i+2} - \theta_i) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{\theta}_i(u) = \dfrac{1}{T_D}\dfrac{d\theta_i}{du} \\ \ddot{\theta}_i(u) = \dfrac{1}{T_D^2}\dfrac{d^2\theta_i}{du^2} \end{cases}$$

従って、T_{MC}毎のマニピュレータ目標経路は、次式より得られる。

$$\theta_i\left(\frac{nT_{MC}}{T_D}\right)$$

$$\left(0 \leqq n \leqq \frac{T_D}{nT_{MC}},\ n\text{はinteger}\right)$$

〔6〕マニピュレータの目標経路生成－2

また、マニピュレータ１１の制御周期は、以下に示すように、スケール変換計算と二階微分まで連続なスプライン補間計算とを結び付け、ＦＩＧ．５１に示すような滑らかな目標経路を生成することもできる。

〔8〕において、（Ｂ８－１）式を次式で置き換える。

$$\theta_i(u) = (u^3/6)\theta_{i+2} + (1/6) \times (-3u^3 + 3u^2 + 3u + 1)\theta_{i+1} + (1/6)(3u^2 - 6u + 4)\theta_i + (1/6)(1-u)^3\theta_{i-1}$$

この時、

$$\begin{cases} \dot{\theta}_i(0) = \dfrac{1}{2T_D}(\theta_{i+1} - \theta_{i-1}) \\ \dot{\theta}_i(1) = \dfrac{1}{2T_D}(\theta_{i+2} - \theta_i) \\ \ddot{\theta}_i(0) = \dfrac{1}{T_D^2}(\theta_{i+1} - 2\theta_i + \theta_{i-1}) \\ \ddot{\theta}_i(1) = \dfrac{1}{T_D^2}(\theta_{i+2} - 2\theta_{i+1} + \theta_i) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{\theta}_i(u) = \dfrac{1}{T_D}\dfrac{d\theta_i}{du} \\ \ddot{\theta}_i(u) = \dfrac{1}{T_D^2}\dfrac{d^2\theta_i}{du^2} \end{cases}$$

なお、姿勢制御系３４は、前述の第２実施例の姿勢制御系２４におけるものと同様の機能を有する姿勢制御系アクチュエータ３４・１，ホイール制御系３７とからなり、宇宙機１２の姿勢を姿勢制御系アクチュエータ３４・１を用いて制御するようになっている。なお、３１１，３３・１～３３・３は、それぞれ第２実施例のものと同様の機能を有する３軸モーメンタムホイール，モーメンタムホイールである。

また、姿勢制御センサ系３４・３は、宇宙機１２の姿勢変動を検出するものであり、前述の第２実施例における姿勢制御系２４におけるものと同様の機能を有する。

そして、協調制御系３６は、マニピュレータ制御系３５と姿勢制御系３４とを協調させ、衛星の姿勢制御性能を良好に保つものであり、マニピュレータ制御系３５と前述のスケール変換部３５・２とを共有するとともに、第２実施例におけるものと同様の機能を有するフィードフォワード量演算部３６・１をそなえて構成されたものである。

上述の構成により、本実施例によれば、ＦＩＧ．４０に示すように、地上の操作者３１Ａから初期指令値としての関節角時系列データが入力されると、過大指令値抑制指標予測部３１０Ａにおいて、過大指令値抑制指標が計算により予測される（①）。

すると、スケール変換部３１０Ｂでは、予測された過大指令値抑制指標に基づいて、初期指令値としての関節角時系列データθ（ｔ）について速度スケールの変換を行なうことにより（②）、中間指令値ｓθ（ｔ）として軌道上の制御部３００及びグラフィックディスプレイ３２に出力する。

そして、軌道上の制御部３００におけるスケール変換部３５・２においては、姿勢センサ系３４・３からのセンサ値に基づいて、速度スケール変換を行ない（④）、変換されたデータを電気信号としてマニピュレ

ータ駆動アクチュエータ３５・１に出力することにより、アクチュエータ１１が制御される。

一方、フィードフォワード量演算部３６・１では、スケール変換部３５・２からの電気信号について、フィードフォワードホイール角速度$\omega_{FF}(t)$を計算し、姿勢制御系３４に出力されて、宇宙機１２の姿勢が制御される。

また、地上のグラフィックディスプレイ３２には、スケール変換部３１０Ｂより、初期指令値，中間指令値及び姿勢角センサ３４・３からの実際のアクチュエータの関節角に関するセンサ値に基づいて、宇宙機１２の状態の画像が出力されている。

従って、操作者とマニピュレータとの間に力学的隔たりのあるマニピュレータをプログラム操作や遠隔操作を行なう場合に、マニピュレータによる作業を安全且つ効率良く行なうことができる利点がある。

なお、本実施例においては、軌道上の制御部３００に、スケール変換部３５・２，フィードフォワード量演算部３６・１をそなえ、スケール変換部３１０Ｂにてスケール変換の施された中間指令値を貰って、その経路に沿うようにデータを補正して、宇宙機１２付きのマニピュレータ１１をサーボ制御するとともに、姿勢制御系３４では、フィードフォワード量演算部３６・１と姿勢センサ系３４・３からの情報に基づいて姿勢制御を行なっているが、本発明においては、ＦＩＧ．５４に示すように、軌道上の制御部４００に、スケール変換部３５・２，フィードフォワード量演算部３６・１をそなえなくてもよい。

この場合においては、地上のシミュレーション装置４１０におけるスケール変換部４１０Ｂは、機能的には前述の第３実施例におけるシミュレーション装置３１０におけるスケール変換部３１０Ｂと、軌道上の制御部３００におけるスケール変換部３５・２とが併合したものであり、

これにより、初期指令値と過大指令値抑制指標予測部４１０Ａにて予測された過大指令値予測指標と姿勢センサ系４４・３からのセンサ値を受けて中間指令値を算出するようになっている。

また、制御部４００におけるマニピュレータ駆動アクチュエータ４５・１では、地上のシミュレーション装置４１０におけるスケール変換部４１０Ｂにてスケール変換された中間指令値と過大指令値抑制指標予測部４１０Ａにて予測された過大指令値抑制指標とを入力してマニピュレータ１１を制御する一方で、宇宙機１２の姿勢制御は姿勢センサ系４４・３のみに基づいて行なわれるようになっている。

一方、グラフィックディスプレイ３２においては、操作者３１Ａからの初期指令値と、スケール変換部４１０にてスケール変換された中間指令値と、姿勢センサ系３４・３からの実際の関節角情報に基づいたマニピュレータ１１の動きについての画像が表示されるようになっている。

さらに、ＦＩＧ．５５に示すように、地上系のみのシミュレーション装置のみにより構成することもできる。

この場合においては、操作者３１Ａからの初期指令値が入力されると、これに基づいて過大指令値抑制指標予測部５１０Ａにて過大指令値抑制指標を予測し、この予測された過大指令値抑制指標に基づき、スケール変換部５１０Ｂにて初期指令値をスケール変換して中間指令値としてグラフィックディスプレイ５２に出力するようになっている。このグラフィックディスプレイ５２では、初期指令値および中間指令値に基づいたマニピュレータ１１の動きについての画像が表示されるようになっている。

なお、本実施例においては、地上にいる操作者３１Ａのもとに設置されるシミュレーション部３１０と軌道上の宇宙機１２に設置される制御部３００に分かれて構成されているが、本発明によれば、このシミュレ

ーション部３１０を軌道上の宇宙機１２に設置することも可能である。

この場合においては、軌道上の宇宙機１２に設置される制御部は、マニピュレータの経路指令値情報を初期指令値として入力する初期指令値入力手段と、初期指令値入力手段からの初期指令値を受け、マニピュレータ１１に関する力学モデルに基づき、マニピュレータが初期指令値通りに動作した場合に生ずる外乱情報を過大指令値抑制指標としてリアルタイムで予測する過大指令値抑制指標予測手段と、過大指令値抑制指標予測手段で予測された過大指令値抑制指標に基づき、経路指令値情報に対しスケール変換を施して中間指令値を得るスケール変換手段と、スケール変換手段で変換された中間指令値に従って、マニピュレータを制御する制御手段とをそなえて構成されている。マニュレータ１１の経路指令値情報を初期指令値として入力して、マニピュレータ１１に関する力学モデルに基づき、マニピュレータが初期指令値通りに動作した場合に生ずる外乱情報を過大指令値抑制指標としてリアルタイムで予測し、過大指令値抑制指標に基づき、初期指令値に対しスケール変換を施して中間指令値を得たあと、このスケール変換された中間指令値に従って、マニピュレータ１１を制御するようになっている。

産業上の利用可能性

宇宙ステーションやプラットフォームなど宇宙インフラストラクチャの構築・運用で予想される様々な軌道上作業を安全かつ効率よく行なう目的で、宇宙飛行士による船外活動をマニピュレータを有する宇宙機（宇宙ロボット、人工衛星等）に代行させる場合や、海底，地下道，トンネル内のようにオペレータとマニピュレータ間に力学的隔たりのあるマニピュレータをプログラム操作、遠隔操作する場合において、オンボードソフトウェア（ＯＢＳ）の開発過程におけるエミュレーション装置

や宇宙機の運用過程におけるオペレータ支援装置として用いることができる。

請 求 の 範 囲

1．マニピュレータ（１１）と該マニピュレータ（１１）を支持するマニピュレータ本体とをそなえるとともにホイールの回転によって姿勢制御が可能なマニピュレータ装置（１２）について、該マニピュレータ（１１）の関節角度，関節角速度，関節角加速度の情報を入力し、これらの情報に基づいて、姿勢制御系を包含したマニピュレータ装置（１２）全体に対する３次元ダイナミクスを、全系運動量／角運動量保存則，逆動力学，ホイール系順動力学を用いて、リアルタイムに演算することにより、ディスプレイ（２）にて該マニピュレータ装置（１２）の動きをシミュレート表示することを特徴とする、マニピュレータ装置のためのシミュレーション方法。

2．マニピュレータ（１１）と該マニピュレータ（１１）を支持するマニピュレータ本体とをそなえるとともにホイールの回転によって姿勢制御が可能なマニピュレータ装置（１２）について、該マニピュレータ（１１）の関節角度，関節角速度，関節角加速度の情報を入力するマニピュレータ関節情報入力部（１）と、

該マニピュレータ装置（１２）の動きをシミュレート表示するディスプレイ（２）とをそなえるとともに、

該マニピュレータ関節情報入力部（１）からの情報を受けて、姿勢制御系を包含したマニピュレータ装置（１２）全体に対する３次元ダイナミクスを、全系運動量／角運動量保存則，逆動力学，ホイール系順動力学を用いて、リアルタイムに演算することにより、該ディスプレイ（２）にて該マニピュレータ装置（１２）の動きをシミュレート表示させるための３次元ダイナミクスリアルタイムシミュレート部（１０）をそなえて構成されたことを

特徴とする、マニピュレータ装置のためのシミュレーション装置。

3．該3次元ダイナミクスリアルタイムシミュレート部（10）が、

該マニピュレータ装置（12）の位置姿勢情報，ホイール角速度情報，該マニピュレータ関節情報入力部（1）からのマニピュレータ関節角，関節角速度情報を入力として、全系運動量／角運動量保存則を用いることにより、該マニピュレータ装置（12）の速度，角速度情報を演算するマニピュレータ装置速度・角速度演算部（4）と、

ある2時刻における該マニピュレータ装置（12）の位置情報と該マニピュレータ装置速度・角速度演算部（4）で得られた速度，角速度情報とを入力として、一階積分を施すことにより、次の時刻における該マニピュレータ装置（12）の位置情報を該ディスプレイへ出力するマニピュレータ装置位置情報演算部（5）と、

該マニピュレータ装置位置情報演算部（5）からのマニピュレータ装置位置情報を受けてホイールフィードバック制御トルクを演算するホイールフィードバック制御トルク演算部（6）と、

該マニピュレータ関節角，関節角速度情報を入力とし、ホイール系順動力学を用いて、内部トルク，ホイール系慣性情報を演算する内部トルク・ホイール系慣性情報演算部（7）と、

該マニピュレータ関節角，関節角速度情報を入力とし、拘束付き逆動力学を用いて、ホイールフィードフォワードトルクを演算するホイールフィードフォワードトルク演算部（8）と、

2時刻におけるホイール回転角，ホイール角速度情報，フィードバック制御トルク情報，内部トルク情報，ホイール系慣性情報，フィードフォワードトルク情報を入力とし、次の時刻におけるホイール回転角，ホイール角速度情報を出力するホイールダイナミクス積分部（9）とをそなえて構成されたことを

特徴とする請求の範囲第２項記載のマニピュレータ装置のためのシミュレーション装置。

４．該ホイールダイナミクス積分部（９）が、一階積分部として構成されることにより、系全体の運動方程式を数値的に解くに際し、ホイールの回転対称性から、該ホイールに対して、一階の数値積分で済ませ、該ホイールの回転角情報を陽に求めないことを特徴とする請求の範囲第３項記載のマニピュレータ装置のためのシミュレーション装置。

５．該ホイールダイナミクス積分部（９）が、二階積分部として構成されることにより、一階積分演算によってホイール角速度情報を求め、更に二階積分演算によってホイール回転角情報を求めることを特徴とする請求の範囲第３項記載のマニピュレータ装置のためのシミュレーション装置。

６．系全体の運動方程式を数値的に解くに際し、ホイールの回転対称性から、該ホイールに対する一階の数値積分と二階の数値積分の刻み幅を変え、二階数値積分を一階数値積分より粗計算で処理することを特徴とする請求の範囲第５項記載のマニピュレータ装置のためのシミュレーション装置。

７．系全体の運動方程式を数値的に解くに際し、ホイールの回転対称性から、該ホイールに対する一階の数値積分と二階の数値積分の積分次数を変え、二階数値積分を一階数値積分より粗計算で処理することを特徴とする請求の範囲第５項記載のマニピュレータ装置のためのシミュレーション装置。

８．系全体の運動方程式を数値的に解くに際し、ホイールの回転対称性から、該ホイールに対する一階の数値積分と二階の数値積分の刻み幅および積分次数を変え、二階数値積分を一階数値積分より粗計算で処理することを特徴とする請求の範囲第５項記載のマニピュレータ装置のため

のシミュレーション装置。

9．該ホイールの回転角を高速・高精度に求めるべく、すべてのホイールの慣性モーメントを比例倍することを特徴とする請求の範囲第3項記載のマニピュレータ装置のためのシミュレーション装置。

10．ホイールの回転を該ディスプレイに表示するに際して、表示する直前でホイールの角速度を比例倍した形で表示することを特徴とする請求の範囲第3項記載のマニピュレータ装置のためのシミュレーション装置。

11．マニピュレータ（11）と該マニピュレータ（11）を支持するマニピュレータ本体とをそなえるとともにホイール（23）の回転によって姿勢制御が可能なマニピュレータ装置（12）について、該マニピュレータ（11）の関節角度，関節角速度，関節角加速度の情報を入力し、これらの情報に基づいて、姿勢制御系を包含したマニピュレータ装置（12）全体に対する3次元ダイナミクスを、全系運動量／角運動量保存則，逆動力学，ホイール系順動力学を用いて、リアルタイムに演算することにより、ディスプレイ（2）にて該マニピュレータ装置（12）の動きをシミュレート表示するとともに、

該マニピュレータ装置（12）の姿勢を該ホイール（23）を用いて制御するための姿勢制御系（24）と、

該マニピュレータ（11）の関節角度，関節角速度，関節角加速度の情報を入力して、該マニピュレータ（11）を制御するマニピュレータ制御系（25）と、

該マニピュレータ制御系（25）からの情報に基づき該マニピュレータ（11）からもたらされる外乱を所要のアルゴリズムを用いることにより算出して該姿勢制御系（24）へフィードフォーワード信号として供給する協調制御系（26）とをそなえることにより、

該協調制御系（２６）で、該マニピュレータ（１１）からもたらされる外乱を補償するために、該姿勢制御系（２４）のホイール制御系（２７）に渡すフィードフォワード量として、角運動量若しくはそれをホイール（２３）の質量で割ったホイール角速度又はトルクを取り、その値をホイール（２３）の目標角運動量若しくは目標角速度を運動量／角運動量保存則又は宇宙用逆動力学から求めて、該ホイール（２３）を制御することを

特徴とする、マニピュレータ装置のためのシミュレーション及び制御方法。

１２．該運動量／角運動量保存則の適用に当たって、該マニピュレータ本体の角速度に対し、該マニピュレータ本体の角速度が０という制約条件を課すことを特徴とする、請求の範囲第１１項記載のマニピュレータ装置のためのシミュレーション及び制御方法。

１３．該運動量／角運動量保存則の適用に当たって、該マニピュレータ本体の角速度に対し、該マニピュレータ本体の角速度が定数という制約条件を課すことを特徴とする、請求の範囲第１１項記載のマニピュレータ装置のためのシミュレーション及び制御方法。

１４．該運動量／角運動量保存則の適用に当たって、該マニピュレータ本体の角速度に対し、該マニピュレータ本体の角速度が時間の任意関数という制約条件を課すことを特徴とする、請求の範囲第１１項記載のマニピュレータ装置のためのシミュレーション及び制御方法。

１５．該宇宙用逆動力学の適用に当たって、該マニピュレータ本体の角加速度に対し、該マニピュレータ本体の角加速度が０という制約条件を課すことを特徴とする請求の範囲第１１項記載のマニピュレータ装置のためのシミュレーション及び制御方法。

１６．該宇宙用逆動力学の適用に当たって、該マニピュレータ本体の角

速度、角加速度に対し、該マニピュレータ本体の角速度、角加速度がそれぞれ0という制約条件を課すことを特徴とする請求の範囲第１１項記載のマニピュレータ装置のためのシミュレーション及び制御方法。

１７．該宇宙用逆動力学の適用に当たって、該マニピュレータ本体の角速度、角加速度に対し、該マニピュレータ本体の角速度が定数で、該マニピュレータ本体の角加速度が0という制約条件を課すことを特徴とする請求の範囲第１１項記載のマニピュレータ装置のためのシミュレーション及び制御方法。

１８．該宇宙用逆動力学の適用に当たって、該マニピュレータ本体の角加速度に対し、該マニピュレータ本体の角加速度が時間の任意関数という制約条件を課すことを特徴とする請求の範囲第１１項記載のマニピュレータ装置のためのシミュレーション及び制御方法。

１９．該宇宙用逆動力学の適用に当たって、該マニピュレータ本体の角速度、角加速度に対し、該マニピュレータ本体の角速度、角加速度がそれぞれ時間の任意関数という制約条件を課すことを特徴とする請求の範囲第１１項記載のマニピュレータ装置のためのシミュレーション及び制御方法。

２０．系全体の自由度を該マニピュレータ（１１）の関節数Ｌと該マニピュレータ本体の位置・姿勢６自由度の合計Ｌ＋６自由度にしたことを特徴とする請求の範囲第１１項記載のマニピュレータ装置のためのシミュレーション及び制御方法。

２１．該姿勢制御系（２４）が、該マニピュレータ（１１）からもたらされる外乱を補償するために、該マニピュレータ装置（１２）の姿勢角およびその微分によるＰＤフィードバック制御を行なうことを特徴とする請求の範囲第１１項記載のマニピュレータ装置のためのシミュレーション及び制御方法。

２２．該姿勢制御系（２４）が、該マニピュレータ（１１）からもたらされる外乱を補償するために、該マニピュレータ装置（１２）の姿勢角、その積分、および姿勢角の微分によるＰＩＤフィードバック制御を行なうことを特徴とする請求の範囲第１１項記載のマニピュレータ装置のためのシミュレーション及び制御方法。

２３．マニピュレータ（１１）と該マニピュレータ（１１）を支持するマニピュレータ本体とをそなえるとともにホイール（２３）の回転によって姿勢制御が可能なマニピュレータ装置（１２）について、該マニピュレータ（１１）の関節角度，関節角速度，関節角加速度の情報を入力するマニピュレータ関節情報入力部（１）と、

該マニピュレータ装置（１２）の動きをシミュレート表示するディスプレイ（２）と、

該マニピュレータ関節情報入力部（１）からの情報を受けて、姿勢制御系を包含したマニピュレータ装置（１２）全体に対する３次元ダイナミクスを、全系運動量／角運動量保存則，逆動力学，ホイール系順動力学を用いて、リアルタイムに演算することにより、該ディスプレイ（２）にて該マニピュレータ装置（１２）の動きをシミュレート表示させるための３次元ダイナミクスリアルタイムシミュレート部（１０）とをそなえるとともに、

該マニピュレータ装置（１２）の姿勢を該ホイール（２３）を用いて制御するための姿勢制御系（２４）と、

該マニピュレータ（１１）の関節角度，関節角速度，関節角加速度の情報を入力して、該マニピュレータ（１１）を制御するマニピュレータ制御系（２５）と、

該マニピュレータ制御系（２５）からの情報に基づき該マニピュレータ（１１）からもたらされる外乱を所要のアルゴリズムを用いることに

より算出して該姿勢制御系（２４）へフィードフォーワード信号として供給する協調制御系（２６）をそなえ、

該協調制御系（２６）が、該マニピュレータ（１１）からもたらされる外乱を補償するために、該姿勢制御系（２４）のホイール制御系（２７）に渡すフィードフォワード量として、角運動量若しくはそれをホイール（２３）の質量で割ったホイール角速度又はトルクを取り、その値をホイール（２３）の目標角運動量若しくは目標角速度を運動量／角運動量保存則又は宇宙用逆動力学から求めて、該ホイール（２３）を制御するように構成されたことを

特徴とする、マニピュレータ装置のためのシミュレーション及び制御装置。

２４．該３次元ダイナミクスリアルタイムシミュレート部（１０）が、

該マニピュレータ装置（１２）の位置姿勢情報，ホイール角速度情報，該マニピュレータ関節情報入力部（１）からのマニピュレータ関節角，関節角速度情報を入力として、全系運動量／角運動量保存則を用いることにより、該マニピュレータ装置（１２）の速度，角速度情報を演算するマニピュレータ装置速度・角速度演算部（４）と、

ある２時刻における該マニピュレータ装置（１２）の位置情報と該マニピュレータ装置速度・角速度演算部（４）で得られた速度，角速度情報とを入力として、一階積分を施すことにより、次の時刻における該マニピュレータ装置（１２）の位置情報を該ディスプレイ（２）へ出力するマニピュレータ装置位置情報演算部（５）と、

該マニピュレータ装置位置情報演算部（５）からのマニピュレータ装置（１２）位置情報を受けてホイールフィードバック制御トルクを演算するホイールフィードバック制御トルク演算部（６）と、

該マニピュレータ関節角，関節角速度情報を入力とし、ホイール系順

動力学を用いて、内部トルク，ホイール系慣性情報を演算する内部トルク・ホイール系慣性情報演算部（７）と、

該マニピュレータ関節角，関節角速度情報を入力とし、拘束付き宇宙用逆動力学を用いて、ホイールフィードフォワードトルクを演算するホイールフィードフォワードトルク演算部（８）と、

２時刻におけるホイール回転角，ホイール角速度情報，フィードバック制御トルク情報，内部トルク情報，ホイール系慣性情報，フィードフォワードトルク情報を入力とし、次の時刻におけるホイール回転角，ホイール角速度情報を出力するホイールダイナミクス積分部（９）とをそなえて構成されたことを

特徴とする請求の範囲第２３項記載のマニピュレータ装置のためのシミュレーション及び制御装置。

２５．マニピュレータ（１１）と該マニピュレータ（１１）を支持するマニピュレータ本体とをそなえるとともにホイール（２３）の回転によって姿勢制御が可能なマニピュレータ装置（１２）において、

該マニピュレータ装置（１２）の姿勢を該ホイール（２３）を用いて制御するための姿勢制御系（２４）と、

該マニピュレータ装置（１２）付きの該マニピュレータ（１１）を制御するマニピュレータ制御系（２５）とをそなえるとともに、

該マニピュレータ制御系（２５）からの情報に基づき該マニピュレータ（１１）からもたらされる外乱を所要のアルゴリズムを用いることにより算出して該姿勢制御系（２４）へフィードフォーワード信号として供給する協調制御系（２６）をそなえることにより、

該協調制御系（２６）で、該マニピュレータ（１１）からもたらされる外乱を補償するために、該姿勢制御系（２４）のホイール制御系（２７）に渡すフィードフォワード量として、角運動量、またはそれをホイ

ール（２３）の質量で割ったホイール角速度を取り、ホイール（２３）の目標角運動量または目標角速度を運動量／角運動量保存則から求めて、該ホイール（２３）を制御することを
特徴とする、マニピュレータ装置のための制御方法。

２６．マニピュレータ（１１）と該マニピュレータ（１１）を支持するマニピュレータ本体とをそなえるとともにホイールの回転によって姿勢制御が可能なマニピュレータ装置（１２）において、

該マニピュレータ装置（１２）の姿勢をホイール（２３）を用いて制御するための姿勢制御系（２４）と、

該マニピュレータ装置（１２）付きの該マニピュレータ（１１）を制御するマニピュレータ（１１）制御系とをそなえるとともに、

該マニピュレータ（１１）制御系からの情報に基づき該マニピュレータ（１１）からもたらされる外乱を所要のアルゴリズムを用いることにより算出して該姿勢制御系（２４）へフィードフォーワード信号として供給する協調制御系（２６）をそなえることにより、

該協調制御系（２６）で、該マニピュレータ（１１）からもたらされる外乱を補償するために、該姿勢制御系（２４）のホイール制御系（２７）に渡すフィードフォワード量として、トルクを取り、その値を宇宙用逆動力学により求めて、該ホイール（２３）を制御することを
特徴とする、マニピュレータ装置のための制御方法。

２７．マニピュレータ（１１）と該マニピュレータ（１１）を支持するマニピュレータ本体とをそなえるとともにホイール（２３）の回転によって姿勢制御が可能なマニピュレータ装置（１２）において、

該マニピュレータ装置（１２）の姿勢を該ホイール（２３）を用いて制御するための姿勢制御系（２４）と、

該マニピュレータ装置（１２）付きの該マニピュレータ（１１）を制

御するマニピュレータ制御系（２５）とをそなえるとともに、

該マニピュレータ制御系（５）からの情報に基づき該マニピュレータ（１１）からもたらされる外乱を所要のアルゴリズムを用いることにより算出して該姿勢制御系（２４）へフィードフォーワード信号として供給する協調制御系（２６）をそなえ、

該協調制御系（２６）が、該マニピュレータ（１１）からもたらされる外乱を補償するために、該姿勢制御系（２４）のホイール制御系（２７）に渡すフィードフォワード量として、角運動量若しくはそれをホイール（２３）の質量で割ったホイール角速度又はトルクを取り、その値をホイール（２３）の目標角運動量若しくは目標角速度を運動量／角運動量保存則又は宇宙用逆動力学から求めて、該ホイール（２３）を制御するように構成されていることを

特徴とする、マニピュレータ装置のための制御装置。

２８．マニピュレータ（１１）と該マニピュレータ（１１）を支持するマニピュレータ本体とをそなえてなるマニピュレータ装置（１２）について、該マニピュレータ（１１）の経路指令値情報を初期指令値として入力して、該マニピュレータ（１１）に関する力学モデルに基づき、該マニピュレータ（１１）が該初期指令値通りに動作した場合に生ずる外乱情報を過大指令値抑制指標としてリアルタイムで予測し、

該過大指令値抑制指標に基づき、該初期指令値に対しスケール変換を施して中間指令値を得たあと、

このスケール変換された中間指令値に従って、該マニピュレータ（１１）の動きをシミュレート表示することを

特徴とする、マニピュレータ装置のためのシミュレーション方法。

２９．該過大指令値抑制指標として、運動量／角運動量保存則を用いて、運動量／角運動量をリアルタイムで予測することを特徴とする請求の範

囲第２８項記載のマニピュレータ装置のためのシミュレーション方法。

３０．該過大指令値抑制指標として、逆動力学を用いて、トルク／力をリアルタイムで予測することを特徴とする請求の範囲第２８項記載のマニピュレータ装置のためのシミュレーション方法。

３１．該過大指令値抑制指標として、運動量／角運動量保存則，逆動力学を用いて、運動量／角運動量，トルク／力をリアルタイムで予測することを特徴とする請求の範囲第２８項記載のマニピュレータ装置のためのシミュレーション方法。

３２．該過大指令値抑制指標を求める際に使用する該初期指令値の微分情報として、該初期指令値の微分値について平均化処理を施したものが使用されることを特徴とする請求の範囲第２８項記載のマニピュレータ装置のためのシミュレーション方法。

３３．スケール変換を施す際に指数変換演算を施すことを特徴とする請求の範囲第２８項記載のマニピュレータ装置のためのシミュレーション方法。

３４．該スケール変換処理とスプライン補間計算処理とを組み合わせて、該マニピュレータ（１１）の目標経路を生成することを特徴とする請求の範囲第２８項記載のマニピュレータ装置のためのシミュレーション方法。

３５．該スプライン補間計算処理として、一階微分まで連続なスプライン補間計算処理を使用することを特徴とする請求の範囲第３４項記載のマニピュレータ装置のためのシミュレーション方法。

３６．該スプライン補間計算処理として、二階微分まで連続なスプライン補間計算処理を使用することを特徴とする請求の範囲第３４項記載のマニピュレータ装置のためのシミュレーション方法。

３７．マニピュレータ（１１）と該マニピュレータ（１１）を支持する

マニピュレータ本体とをそなえてなるマニピュレータ装置（１２）について、該マニピュレータ（１１）の経路指令値情報を初期指令値として入力する初期指令値入力手段（３１）と、

該初期指令値入力手段（３１）からの該初期指令値を受け、該マニピュレータ（１１）に関する力学モデルに基づき、該マニピュレータ（１１）が該初期指令値通りに動作した場合に生ずる外乱情報を過大指令値抑制指標としてリアルタイムで予測する過大指令値抑制指標予測手段（３１０Ａ）と、

該過大指令値抑制指標予測手段（３１０Ａ）で予測された該過大指令値抑制指標に基づき、該初期指令値に対しスケール変換を施して中間指令値を得るスケール変換手段（３１０Ｂ）と、

該スケール変換手段（３１０Ｂ）で変換された中間指令値に従って、該マニピュレータ（１１）の動きをシミュレート表示する表示手段（３２）とをそなえて構成されたことを

特徴とする、マニピュレータ装置のためのシミュレーション装置。

３８．マニピュレータ（１１）と該マニピュレータ（１１）を支持するマニピュレータ本体とをそなえてなるマニピュレータ装置（１２）について、該マニピュレータ（１１）の経路指令値情報を初期指令値として入力して、該マニピュレータ（１１）に関する力学モデルに基づき、該マニピュレータ（１１）が該初期指令値通りに動作した場合に生ずる外乱情報を過大指令値抑制指標としてリアルタイムで予測し、

該過大指令値抑制指標に基づき、該初期指令値に対しスケール変換を施して中間指令値を得たあと、

このスケール変換された中間指令値に従って、該マニピュレータ（１１）の動きをシミュレート表示するとともに、該マニピュレータ（１１）を制御することを

特徴とする、マニピュレータ装置のためのシミュレーション及び制御方法。

３９．該マニピュレータ（１１）を制御するに際しては、該初期指令値に対しスケール変換を施した第１中間指令値について、更にマニピュレータ系の実外乱に基づいて抑制処理を施すことにより、第２中間指令値を得たあと、この第２段中間指令値に従って、該マニピュレータ（１１）を制御することを特徴とする請求の範囲第３８項記載のマニピュレータ装置のためのシミュレーション及び制御方法。

４０．該中間指令値に基づく該マニピュレータ（１１）の動きに加えて、該初期指令値及び現在のマニピュレータ位置を表す到達値に基づく該マニピュレータ（１１）の動きをそれぞれシミュレート表示することを特徴とする請求の範囲第３８項記載のマニピュレータ装置のためのシミュレーション及び制御方法。

４１．該初期指令値，該中間指令値及び該到達値の間に、所定値以上の偏差が生じると、現在のマニピュレータ到達点以降の初期指令値，中間指令値をリセットし、該マニピュレータ（１１）の初期値を現在の到達点に設定し直すことをことを特徴とする請求の範囲第４０項記載のマニピュレータ装置のためのシミュレーション及び制御方法。

４２．マニピュレータ（１１）と該マニピュレータ（１１）を支持するマニピュレータ本体とをそなえてなるマニピュレータ装置（１２）について、該マニピュレータ（１１）の経路指令値情報を初期指令値として入力する初期指令値入力手段と、

該初期指令値入力手段（３１）からの該初期指令値を受け、該マニピュレータ（１１）に関する力学モデルに基づき、該マニピュレータ（１１）が該初期指令値通りに動作した場合に生ずる外乱情報を過大指令値抑制指標としてリアルタイムで予測する過大指令値抑制指標予測手段

（４１０Ａ）と、

該過大指令値抑制指標予測手段（４１０Ａ）で予測された該過大指令値抑制指標に基づき、該経路指令値情報に対しスケール変換を施して中間指令値を得るスケール変換手段（４１０Ｂ）と、

該スケール変換手段（４１０Ｂ）で変換された中間指令値に従って、該マニピュレータ（１１）の動きをシミュレート表示する表示手段（３２）と、

該スケール変換手段（４１０Ｂ）で変換された中間指令値に従って、該マニピュレータ（１１）を制御する制御手段（４００）とをそなえて構成されたことを

特徴とする、マニピュレータ装置のためのシミュレーション及び制御装置。

４３．マニピュレータ（１１）と該マニピュレータ（１１）を支持するマニピュレータ本体とをそなえてなるマニピュレータ装置（１２）について、該マニピュレータ（１１）の経路指令値情報を初期指令値として入力して、該マニピュレータ（１１）に関する力学モデルに基づき、該マニピュレータ（１１）が該初期指令値通りに動作した場合に生ずる外乱情報を過大指令値抑制指標としてリアルタイムで予測し、

該過大指令値抑制指標に基づき、該初期指令値に対しスケール変換を施して中間指令値を得たあと、

このスケール変換された中間指令値に従って、該マニピュレータ（１１）を制御することを

特徴とする、マニピュレータ装置のための制御方法。

４４．マニピュレータ（１１）と該マニピュレータ（１１）を支持するマニピュレータ本体とをそなえてなるマニピュレータ装置（１２）について、該マニピュレータ（１１）の経路指令値情報を初期指令値として

入力する初期指令値入力手段と、

該初期指令値入力手段からの該初期指令値を受け、該マニピュレータ（１１）に関する力学モデルに基づき、該マニピュレータ（１１）が該初期指令値通りに動作した場合に生ずる外乱情報を過大指令値抑制指標としてリアルタイムで予測する過大指令値抑制指標予測手段と、

該過大指令値抑制指標予測手段で予測された該過大指令値抑制指標に基づき、該経路指令値情報に対しスケール変換を施して中間指令値を得るスケール変換手段と、

該スケール変換手段で変換された中間指令値に従って、該マニピュレータ（１１）を制御する制御手段とをそなえて構成されたことを特徴とする、マニピュレータ装置のための制御装置。

FIG. 1

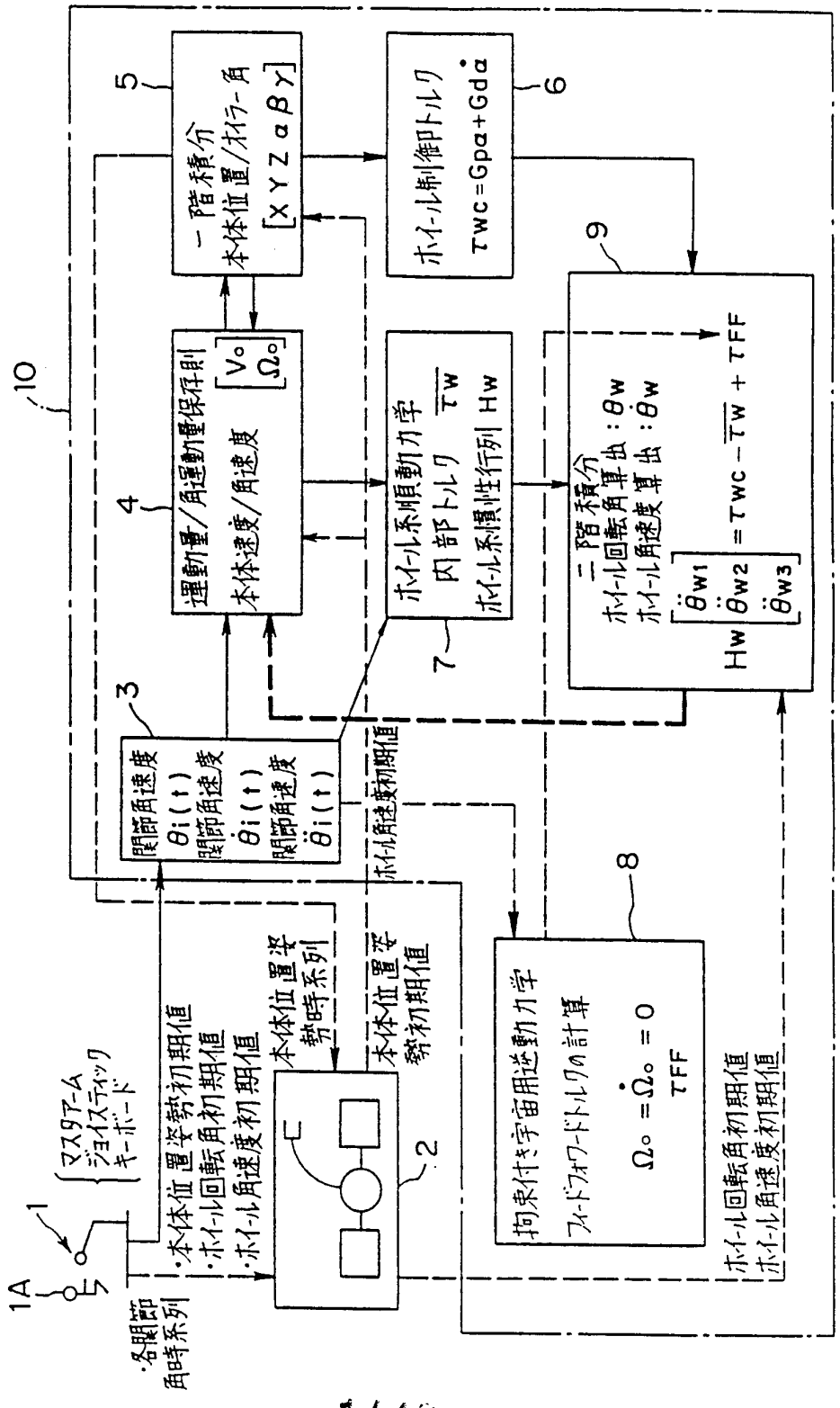

10
5
一階積分
本体位置/オイラー角
[X Y Z α β γ]
6
ホイール制御トルク
τwc=Gpα+Gdα
4
運動量/角運動量保存則
本体速度/角速度
[V₀ Ω₀]
9
二階積分
ホイール回転角算出 : θw
ホイール角速度算出 : θ̇w
Hw [θ̈w1 θ̈w2 θ̈w3] = τwc − τw + τFF
7
ホイール系順動力学
内部トルク τw
ホイール系慣性行列 Hw
3
関節角速度
θi(t)
関節角速度
θ̇i(t)
関節角速度
θ̈i(t)
ホイール角速度初期値
8
拘束付き宇宙用逆動力学
フィードフォワードトルクの計算
Ω̇₀ = Ω₀ = 0
τFF
2
本体位置姿勢時系列
本体位置姿勢初期値
1
マスタアーム
ジョイスティック
キーボード
1A
・各関節角時系列
・本体位置姿勢初期値
・ホイール回転角初期値
・ホイール角速度初期値
ホイール回転角初期値
ホイール角速度初期値

FIG. 2

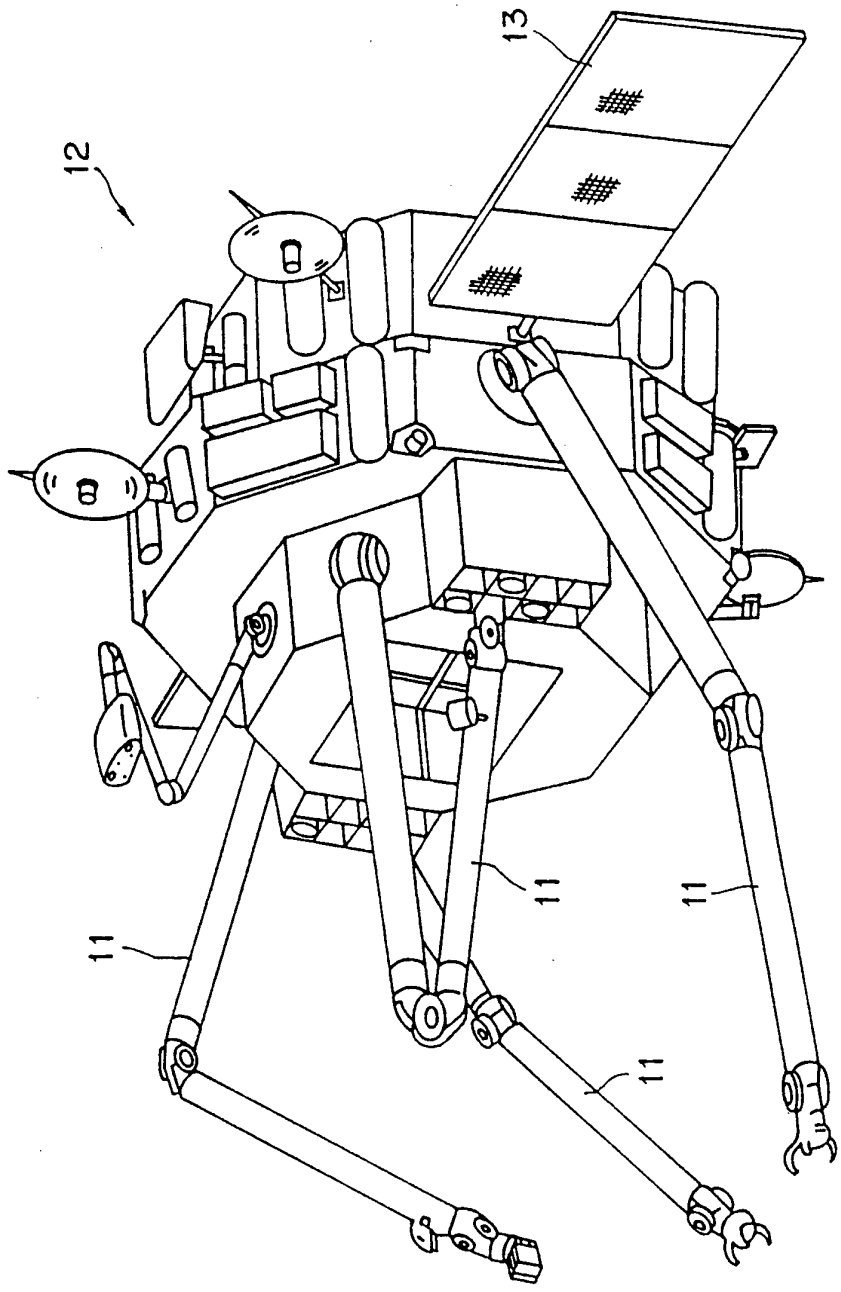


FIG. 3

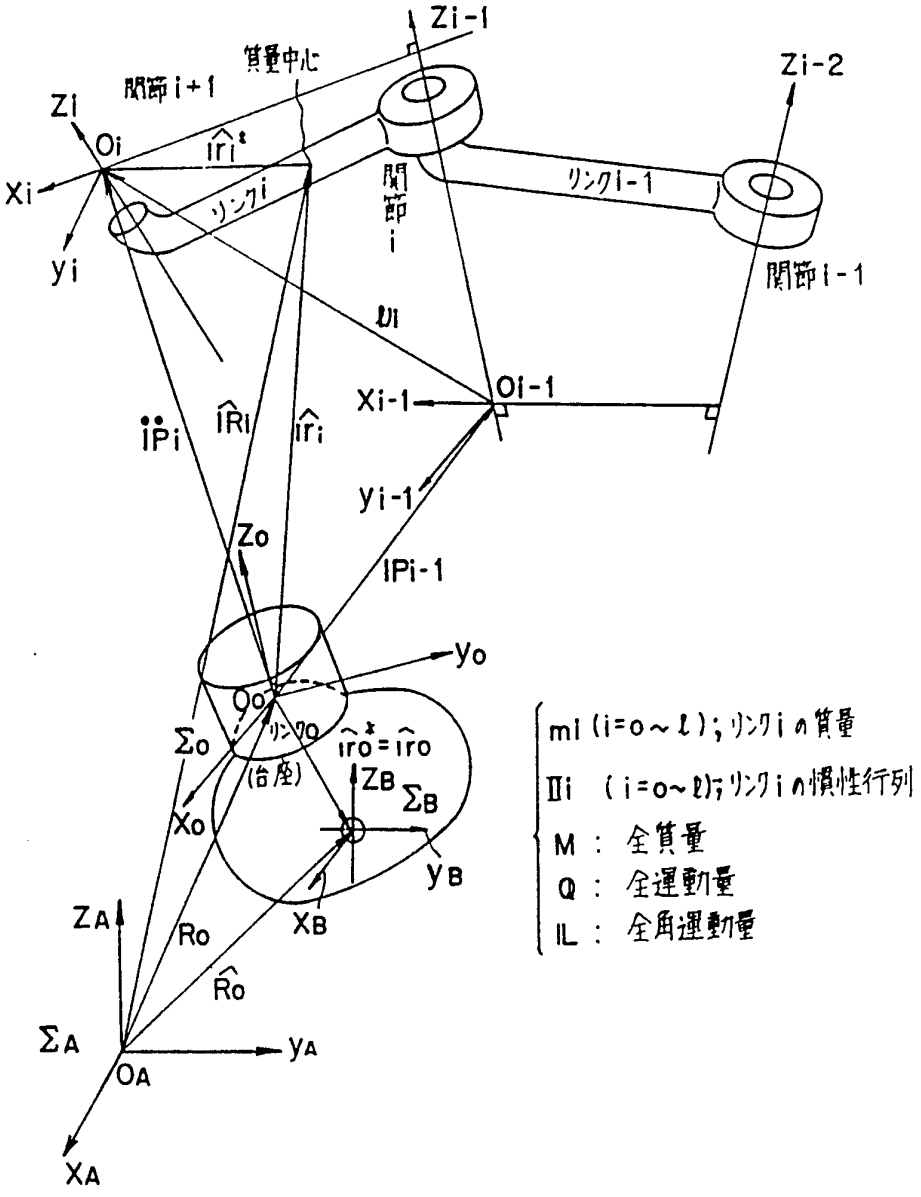

Zi-1
質量中心
関節 i+1
Zi-2
Zi
Oi
Xi
yi
リンクi
関節 i
リンクi-1
関節 i-1
Oi-1
Xi-1
yi-1
Zo
yo
Oo
リンクo
(台座)
Σo
Xo
ZB
ΣB
yB
XB
ZA
Ro
ΣA
yA
OA
XA
ml (i=o~ℓ); リンクiの質量
Ⅱi (i=o~ℓ); リンクiの慣性行列
M : 全質量
Q : 全運動量
IL : 全角運動量

FIG. 4

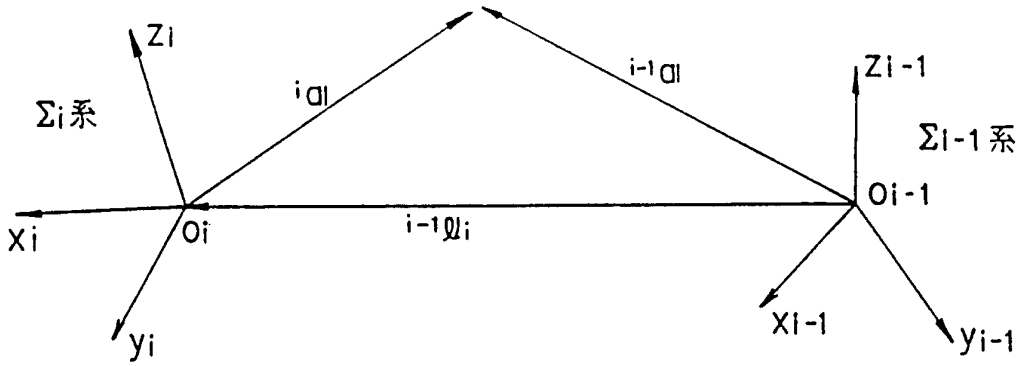


FIG. 5

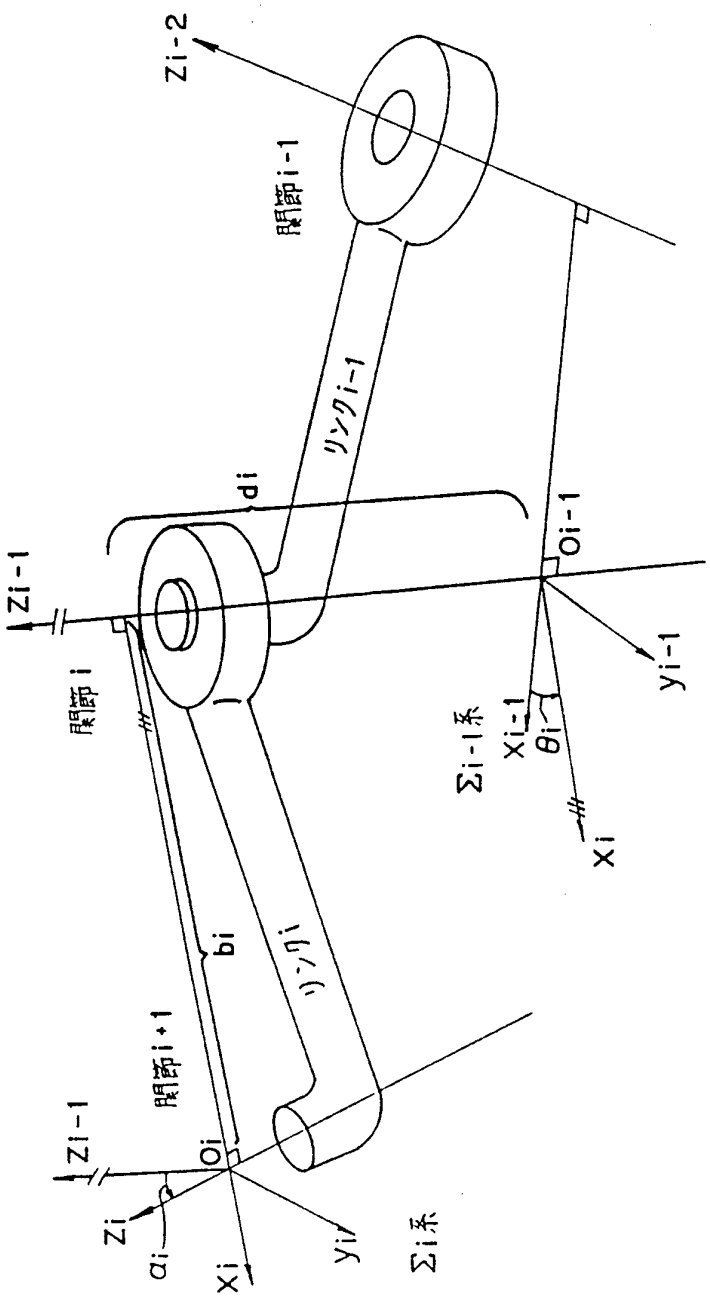

Zi-2
関節i-1
リンクi-1
di
Zi-1
Oi-1
yi-1
関節i
Σi-1系
Xi-1
θi
Xi
bi
リンクi
関節i+1
Zi-1
Oi
Zi
αi
Xi
yi
Σi系

FIG. 6

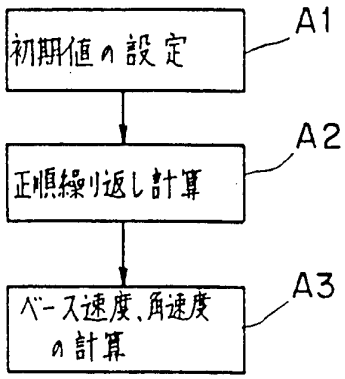

初期値の設定
A1
正順繰り返し計算
A2
ベース速度、角速度の計算
A3

FIG. 7

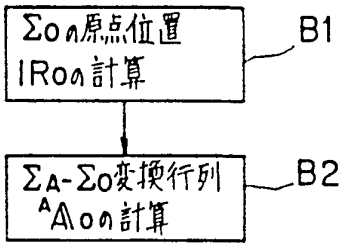

Σoの原点位置 IRoの計算
B1
ΣA-Σo変換行列 AAoの計算
B2

FIG. 8

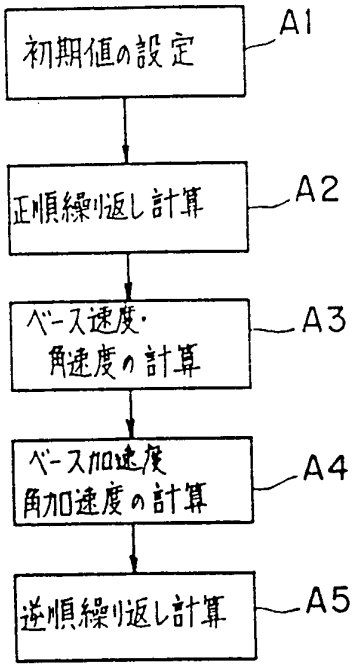

初期値の設定
A1
正順繰り返し計算
A2
ベース速度・
角速度の計算
A3
ベース加速度
角加速度の計算
A4
逆順繰り返し計算
A5

FIG. 9

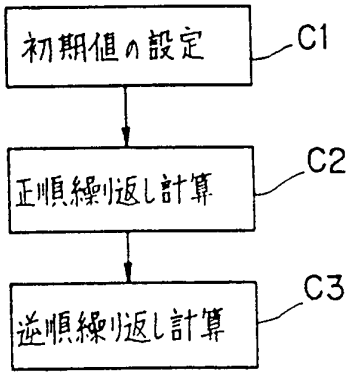

初期値の設定
C1
正順繰り返し計算
C2
逆順繰り返し計算
C3

FIG. 10

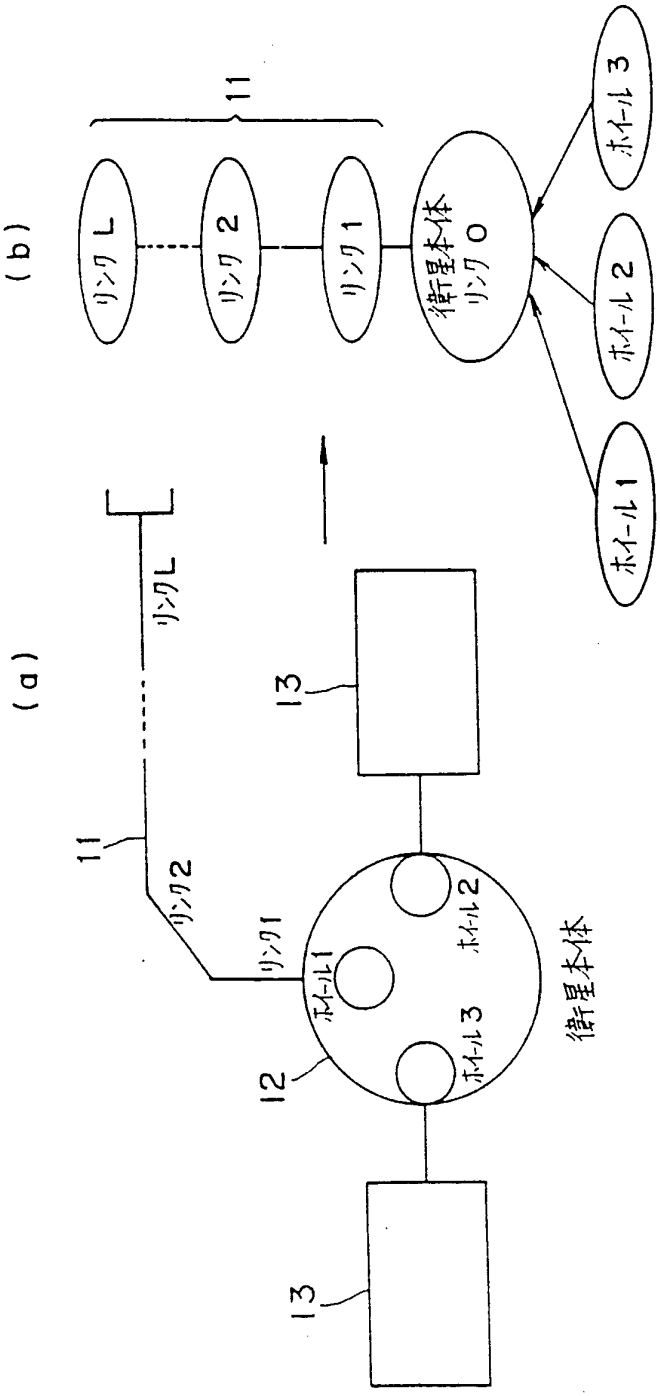

(a)
リンクL
11
リンク2
リンク1
ホイール1
ホイール2
ホイール3
12
13
13
(b)
リンクL
リンク2
リンク1
衛星本体
リンク0
11
ホイール3
ホイール2
ホイール1
衛星本体

FIG. 11

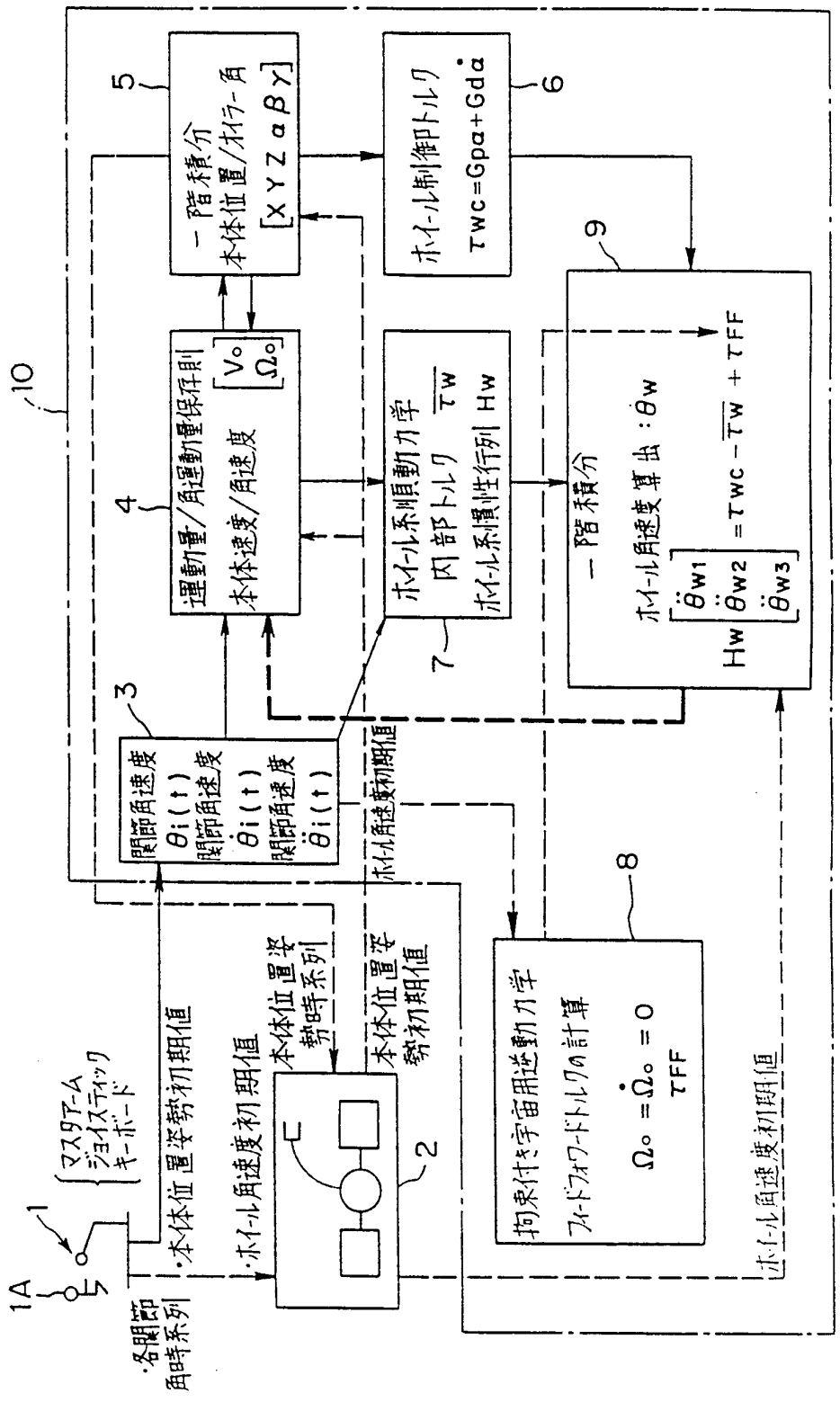

10
1
1A
マスタアーム
ジョイスティック
キーボード
・各関節角時系列
・本体位置姿勢初期値
・ホイル角速度初期値
2
本体位置姿勢時系列
本体位置姿勢初期値
3
関節角速度 θi(t)
関節角速度 θ̇i(t)
関節角速度 θ̈i(t)
ホイル角速度初期値
4
運動量/角運動量保存則
本体速度/角速度
V₀
Ω₀
5
一階積分
本体位置/オイラー角
[X Y Z α β γ]
6
ホイル制御トルク
τwc=Gpα+Gdα̇
7
ホイル系順動力学
内部トルク τw
ホイル系慣性行列 Hw
8
拘束付き宇宙用逆動力学
フィードフォワードトルクの計算
Ω̇₀ = Ω̇₀ = 0
τFF
9
一階積分
ホイル角速度算出 : θ̇w
Hw [θ̈w1 θ̈w2 θ̈w3] = τwc − τw + τFF
ホイル角速度初期値

FIG. 12

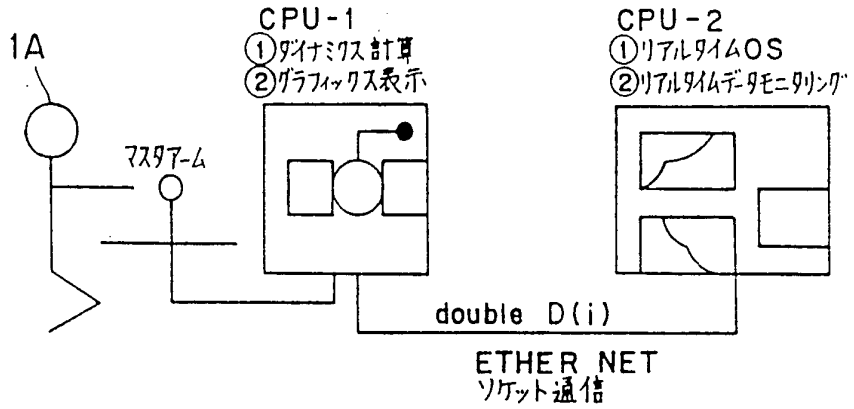

1A
CPU-1
①ダイナミクス計算
②グラフィックス表示
CPU-2
①リアルタイムOS
②リアルタイムデータモニタリング
マスタアーム
double D(i)
ETHER NET
ソケット通信

FIG. 13

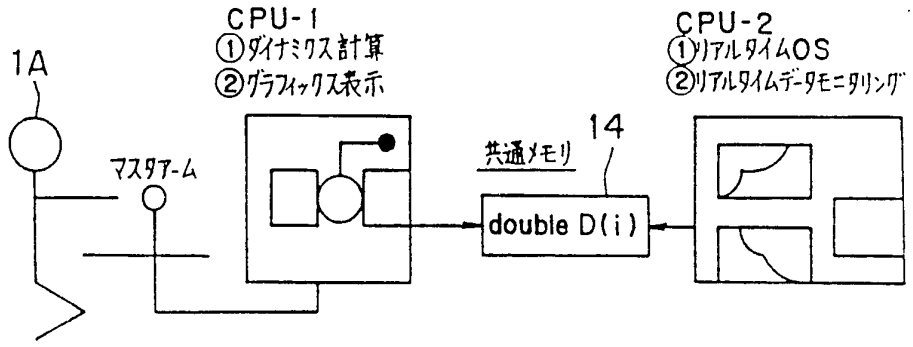

1A
CPU-1
①ダイナミクス計算
②グラフィックス表示
CPU-2
①リアルタイムOS
②リアルタイムデータモニタリング
マスタアーム
共通メモリ
14
double D(i)

FIG. 14

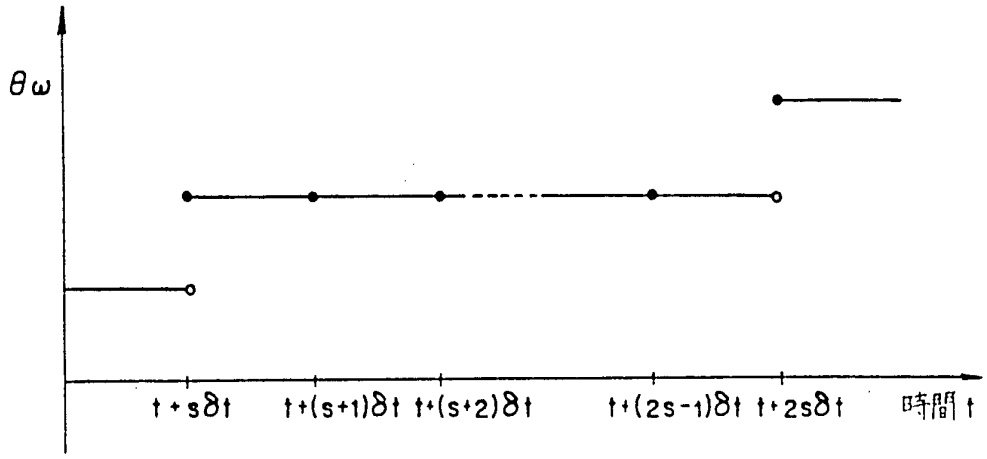

θω
t+sδt
t+(s+1)δt
t+(s+2)δt
t+(2s-1)δt
t+2sδt
時間t

FIG. 15

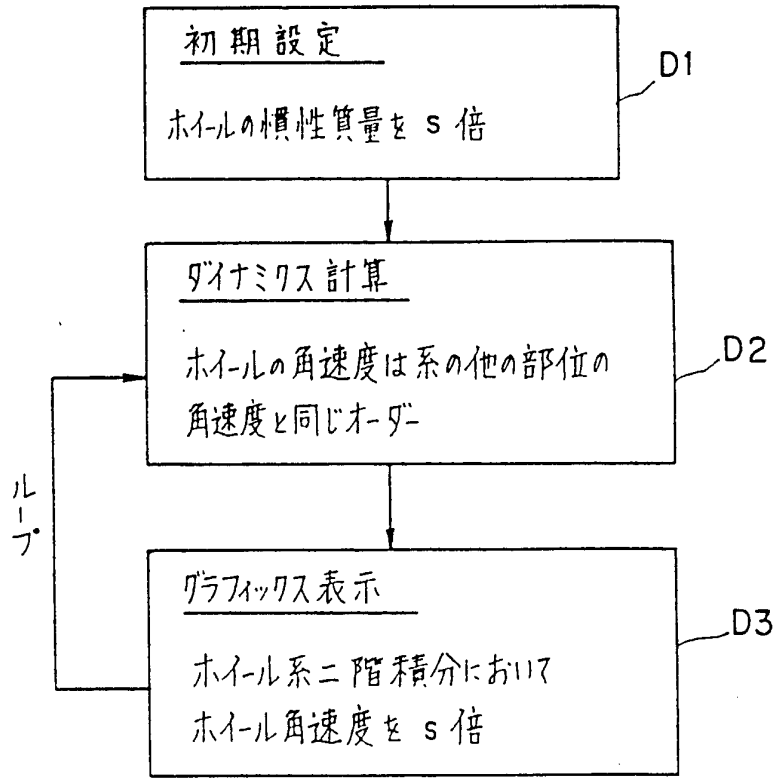
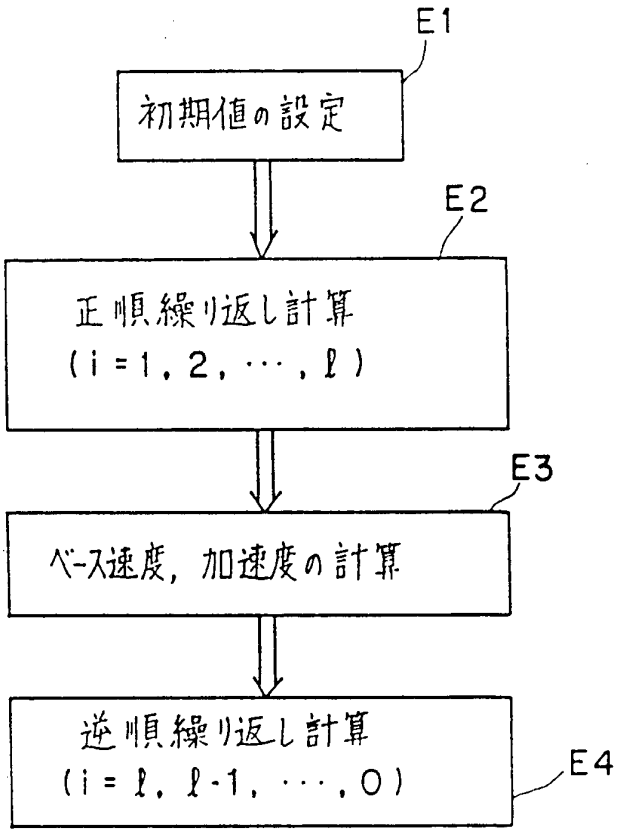

初期設定
ホイールの慣性質量をs倍
D1
ダイナミクス計算
ホイールの角速度は系の他の部位の
角速度と同じオーダー
D2
ループ
グラフィックス表示
ホイール系二階積分において
ホイール角速度をs倍
D3

FIG. 16



○ 拘束条件

(角速度) : ${}^{A}\Omega_0 = {}^{A}C_{\mathcal{M}}\omega_0$ (定数)

(角加速度) : $\dot{\Omega}_0 = 0$

FIG. 17

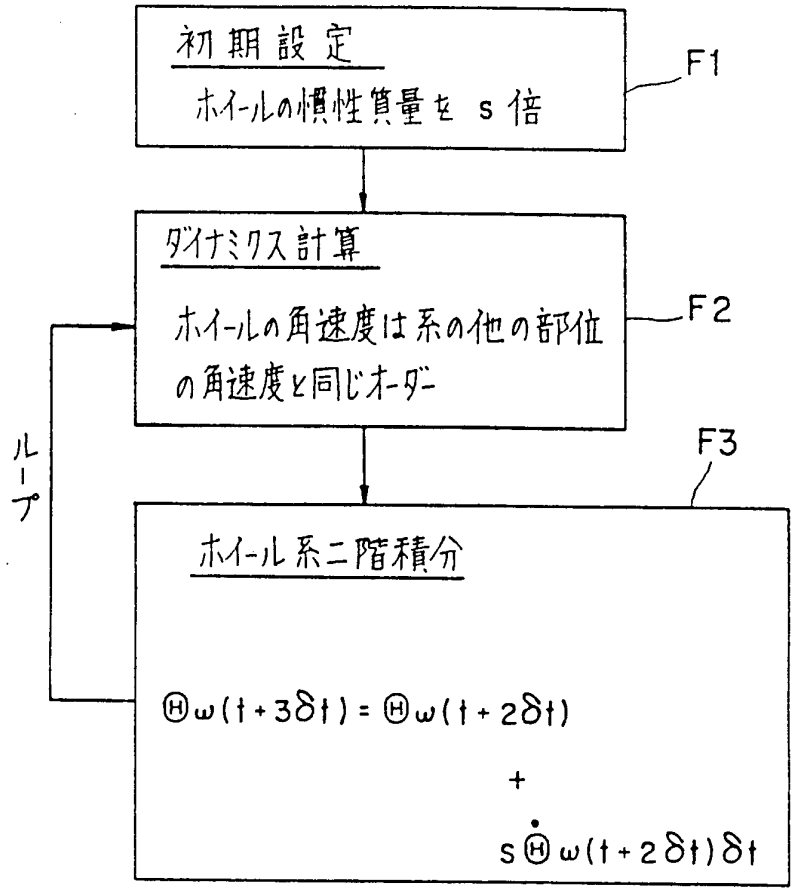

初期設定
ホイールの慣性算量を s 倍
F1
ダイナミクス計算
ホイールの角速度は系の他の部位の角速度と同じオーダー
F2
ループ
F3
ホイール系二階積分
Ⓗω(t+3δt) = Ⓗω(t+2δt)
+
sⒽω(t+2δt)δt

FIG. 18

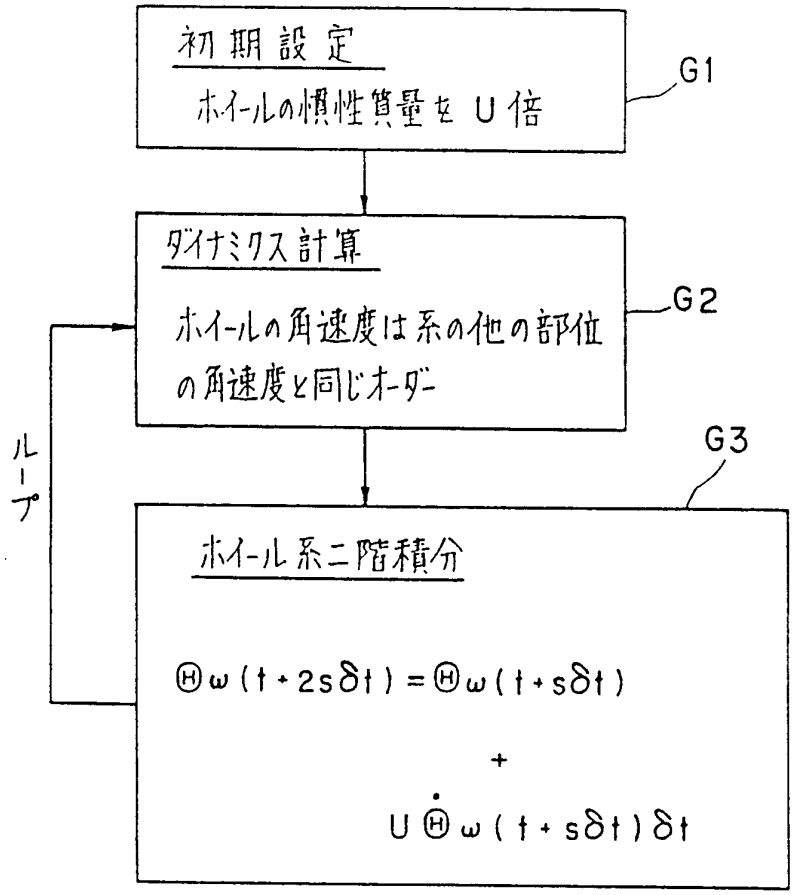

初期設定
ホイールの慣性質量をU倍
G1
ダイナミクス計算
ホイールの角速度は系の他の部位の角速度と同じオーダー
G2
ループ
G3
ホイール系二階積分
Ⓗω(t+2sδt)=Ⓗω(t+sδt)
+
U Ⓗω̇(t+sδt)δt

FIG. 19

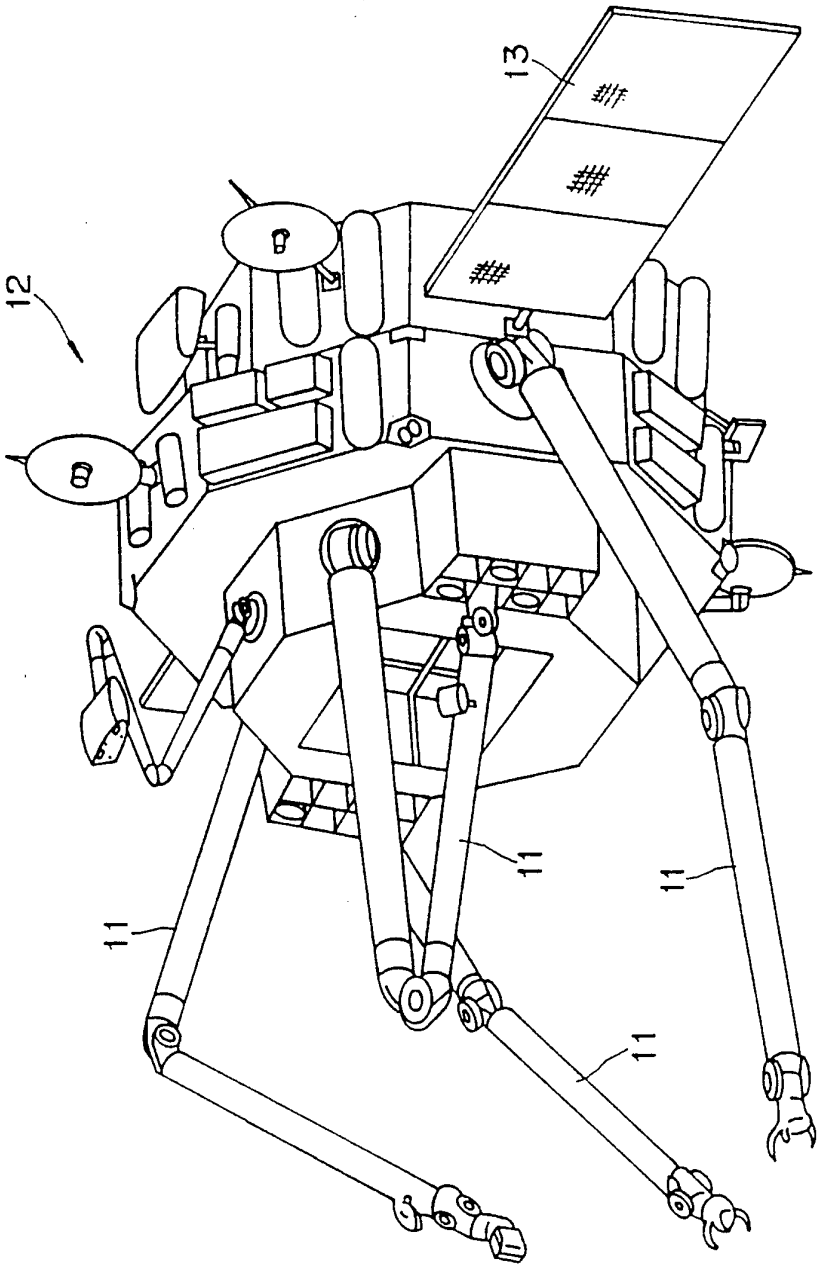
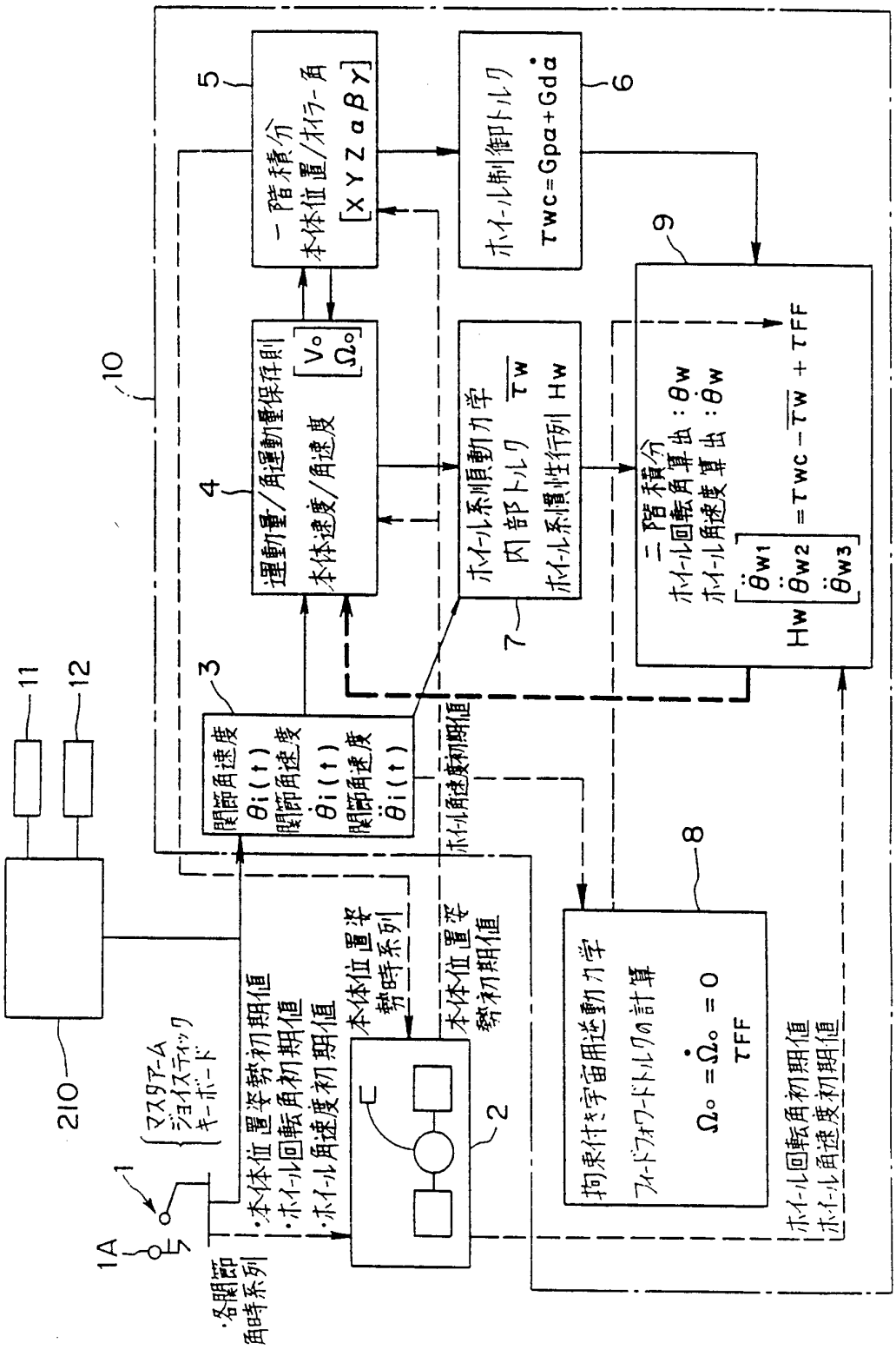


FIG. 20


10
5
一階積分
本体位置/オイラー角
[X Y Z α β γ]
6
ホイール制御トルク
τwc=Gpα+Gdα̇
4
運動量/角運動量保存則
本体速度/角速度
[V₀ Ω₀]
ホイール系順動力学
内部トルク τw
ホイール系慣性行列 Hw
7
9
二階積分
ホイール回転角算出 : θw
ホイール角速度算出 : θ̇w
Hw [θ̈w1 θ̈w2 θ̈w3] = τwc − τw + τFF
3
関節角速度
θi(t)
関節角速度
θ̇i(t)
関節角速度
θ̈i(t)
ホイール角速度初期値
11
12
210
マスタアーム
ジョイスティック
キーボード
1
1A
・各関節
角時系列
・本体位置姿勢初期値
・ホイール回転角初期値
・ホイール角速度初期値
本体位置姿勢時系列
本体位置姿勢初期値
2
8
拘束付き宇宙用逆動力学
フィードフォワードトルクの計算
Ω̇₀ = Ω̇₀ = 0
τFF
ホイール回転角初期値
ホイール角速度初期値

新たな用紙

FIG. 21

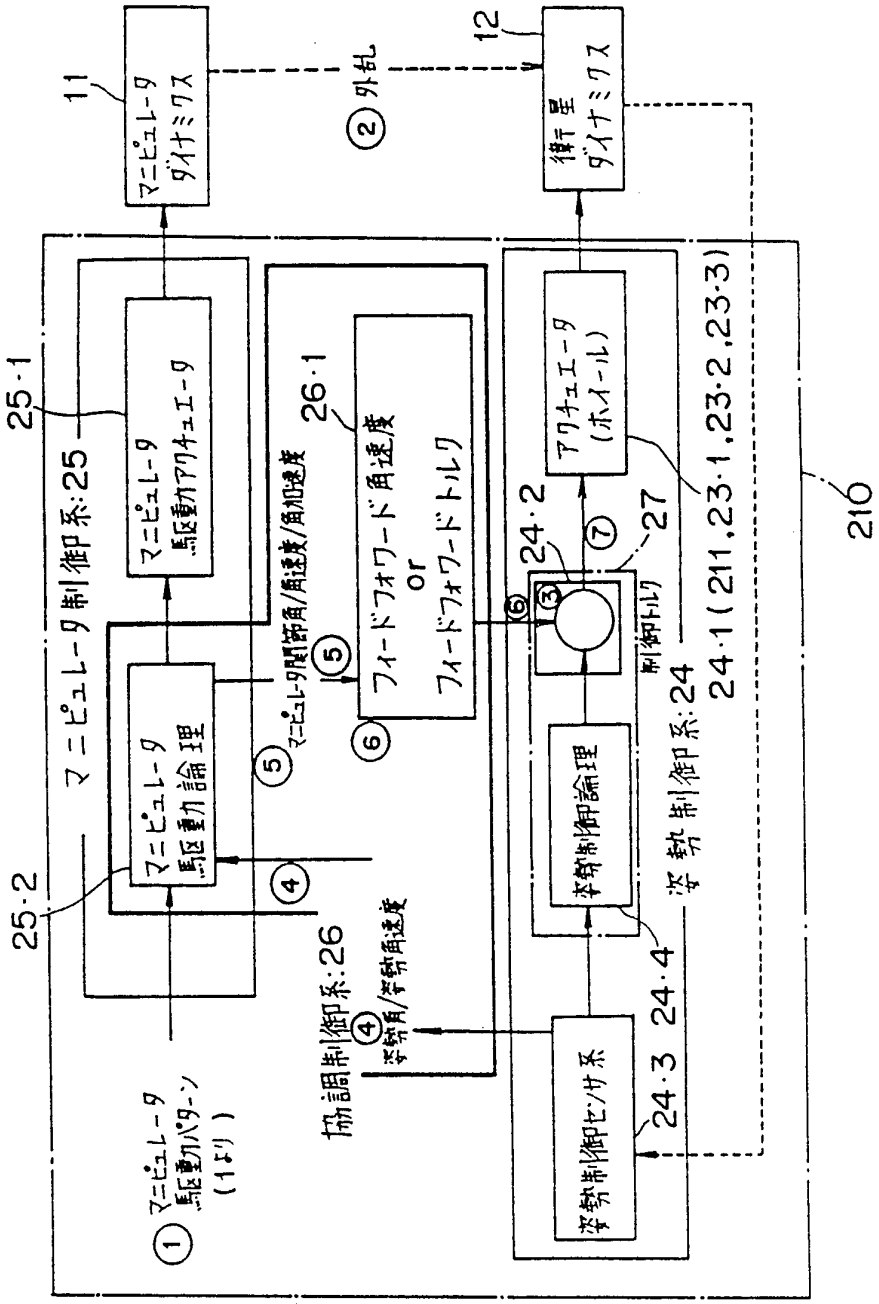

11
マニピュレータ ダイナミクス
② 外乱
12
衛星 ダイナミクス
25·1
マニピュレータ制御系:25
マニピュレータ 駆動アクチュエータ
26·1
マニピュレータ関節角/角速度/角加速度
⑤
フィードフォワード角速度 or フィードフォワードトルク
⑥
アクチュエータ (ホイール)
⑦
27
24·2
③
制御トルク
25·2
マニピュレータ 駆動論理
④
姿勢制御論理
24·1 (211, 23·1, 23·2, 23·3)
姿勢制御系:24
① マニピュレータ 駆動パターン (1ビット)
協調制御系:26
④ 姿勢角/姿勢角速度
24·4
24·3
姿勢制御センサ系
210

FIG. 22

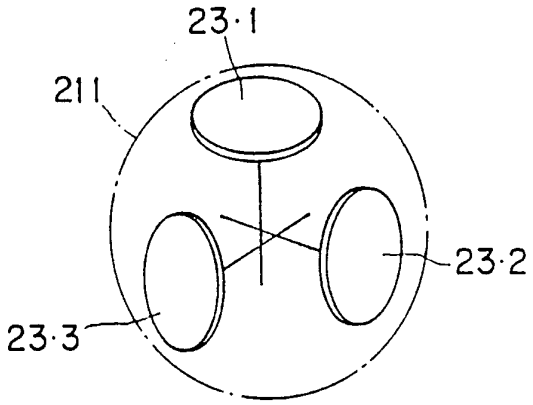

23·1
211
23·2
23·3

FIG. 23

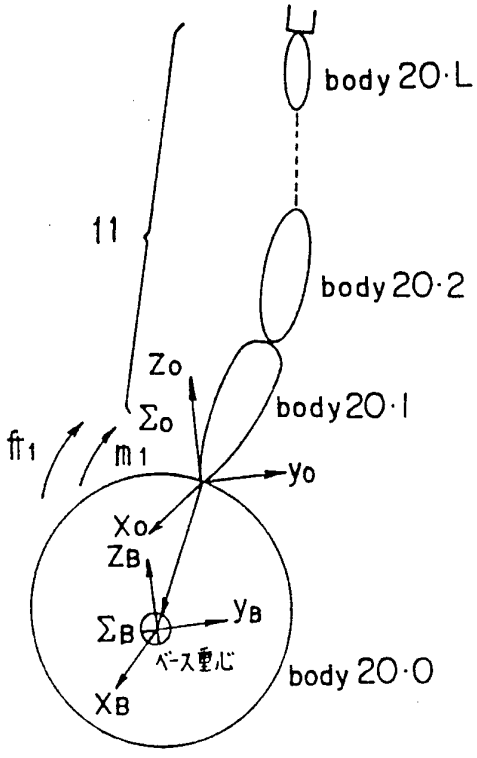

body 20·L
11
body 20·2
Zo
Σo
body 20·1
ff1
m1
yo
Xo
ZB
yB
ΣB
ベース重心
body 20·0
XB

FIG. 24

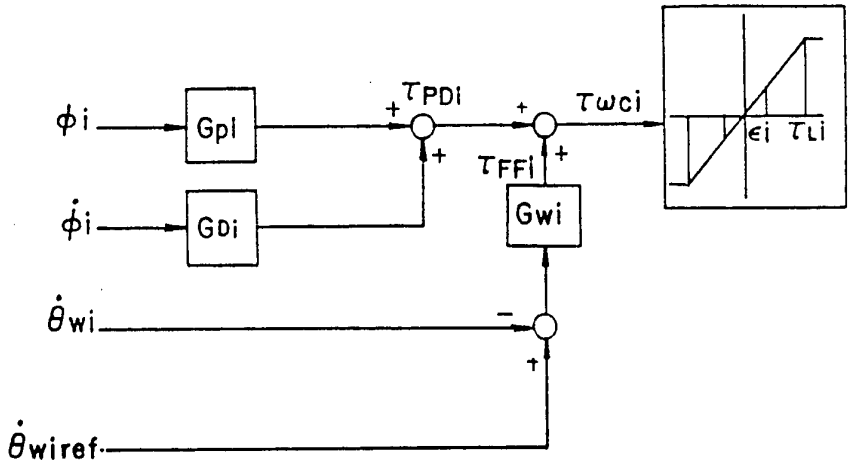

φi
Gpi
τPDi
τωci
φ̇i
GDi
τFFi
Gwi
θ̇wi
θ̇wiref
εi
τLi

FIG. 25

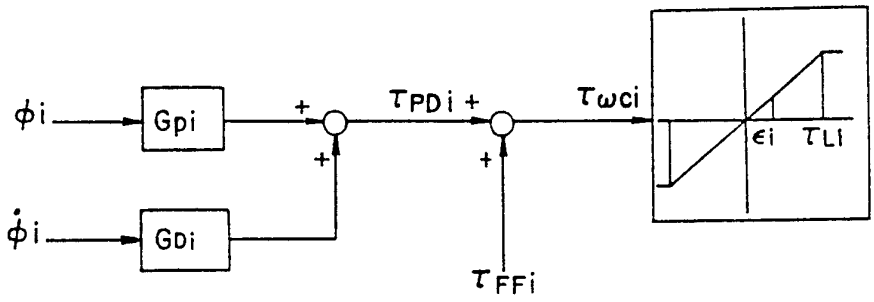

φi
Gpi
τPDi
τωci
φ̇i
GDi
τFFi
εi
τLi

FIG. 26

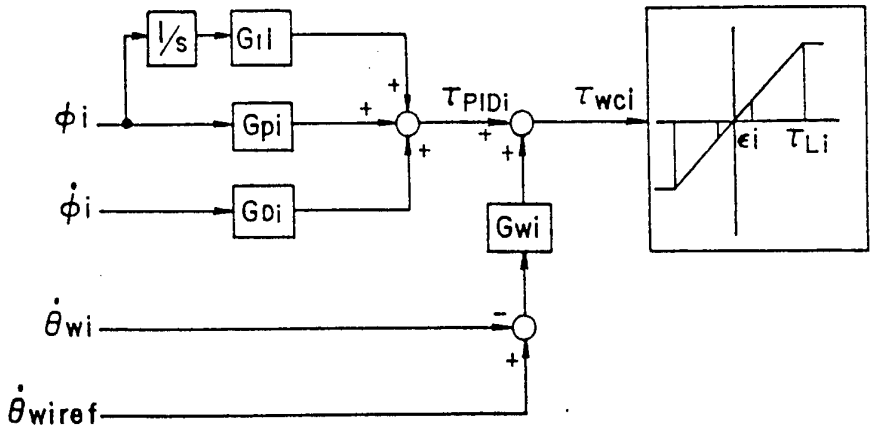

1/s
GIi
Gpi
GDi
Gwi
φi
φ̇i
θ̇wi
θ̇wiref
τPIDi
τwci
εi
τLi
+
+
+
+
+
-

FIG. 27

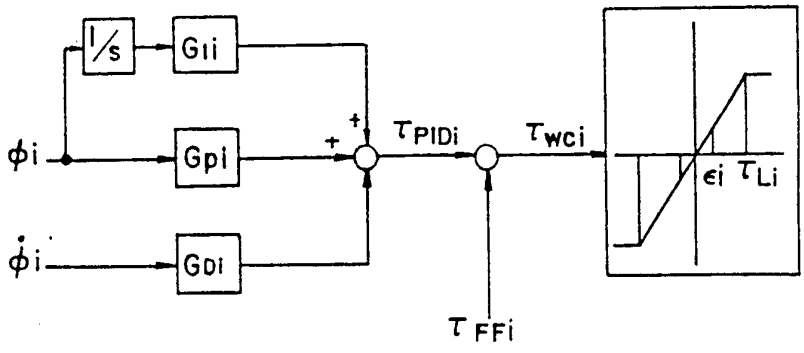

1/s
GIi
Gpi
GDi
φi
φ̇i
τPIDi
τwci
τFFi
εi
τLi
+
+

FIG. 28

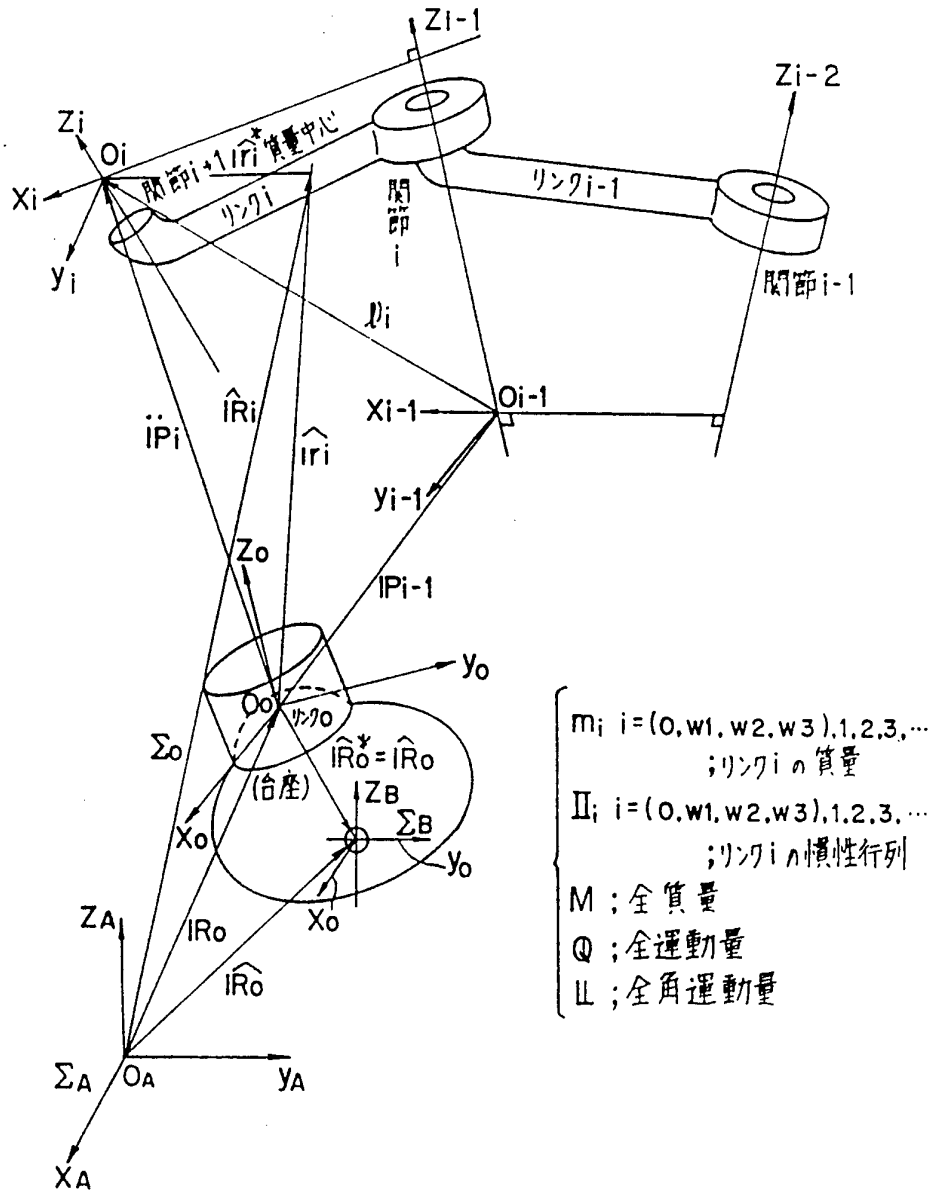

Zi-1
Zi-2
Zi
Oi
Xi
yi
関節i+1
質量中心
リンクi
関節i
リンクi-1
関節i-1
li
Oi-1
Xi-1
yi-1
Zo
lPi-1
yo
Oo
リンクo
Σo
(台座)
ZB
ΣB
Xo
yo
ZA
lRo
ΣA
OA
yA
XA
mi i=(0,w1,w2,w3),1,2,3,…
;リンクiの質量
Ii i=(0,w1,w2,w3),1,2,3,…
;リンクiの慣性行列
M ;全質量
Q ;全運動量
L ;全角運動量

FIG. 29

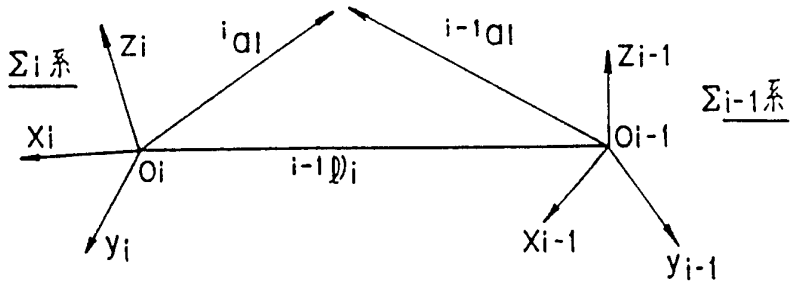

Σi系
Zi
iαi
i-1αi
Zi-1
Σi-1系
Xi
Oi
i-1βi
Oi-1
yi
Xi-1
yi-1

FIG. 30

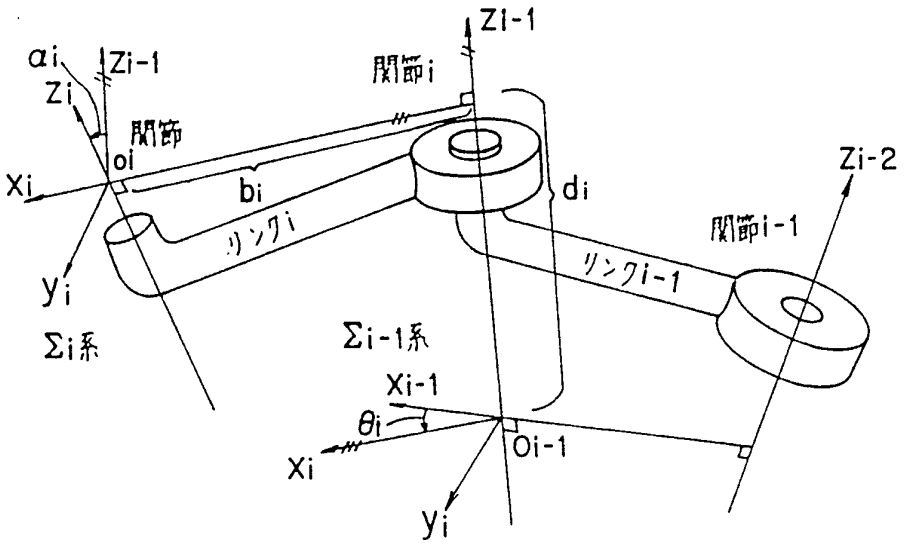

αi
Zi-1
Zi
関節
oi
Xi
bi
リンクi
yi
Σi系
Zi-1
関節i
di
Zi-2
関節i-1
リンクi-1
Σi-1系
Xi-1
θi
Xi
Oi-1
yi

FIG.31

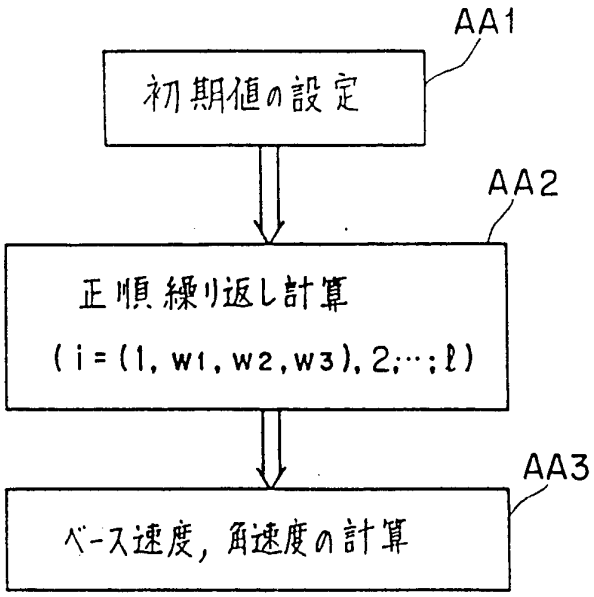


FIG. 32

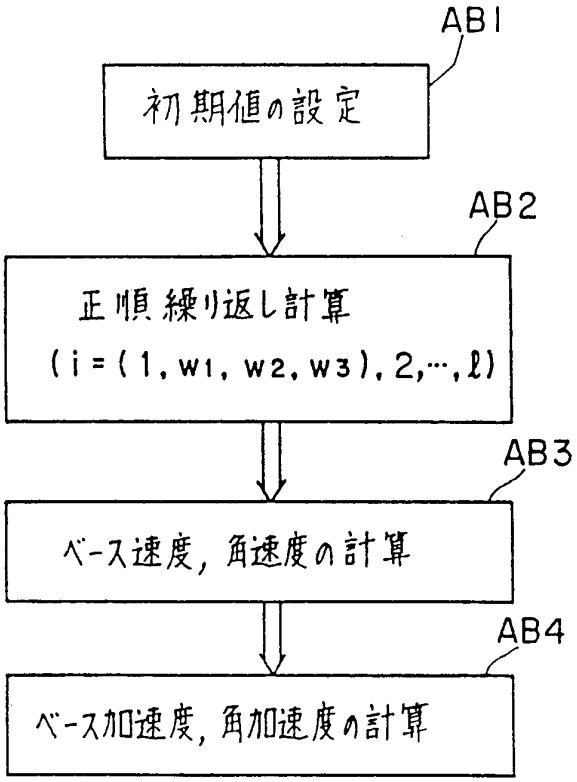

AB1
初期値の設定
AB2
正順繰り返し計算
(i=(1, w1, w2, w3), 2, ···, ℓ)
AB3
ベース速度, 角速度の計算
AB4
ベース加速度, 角加速度の計算

FIG. 33

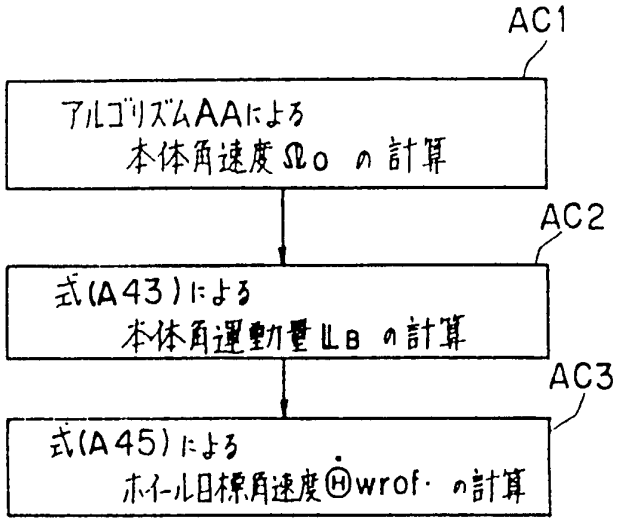

AC1
アルゴリズムAAによる
本体角速度Ωo の計算
AC2
式(A43)による
本体角運動量LB の計算
AC3
式(A45)による
ホイール目標角速度Ⓗwrof· の計算

FIG. 34

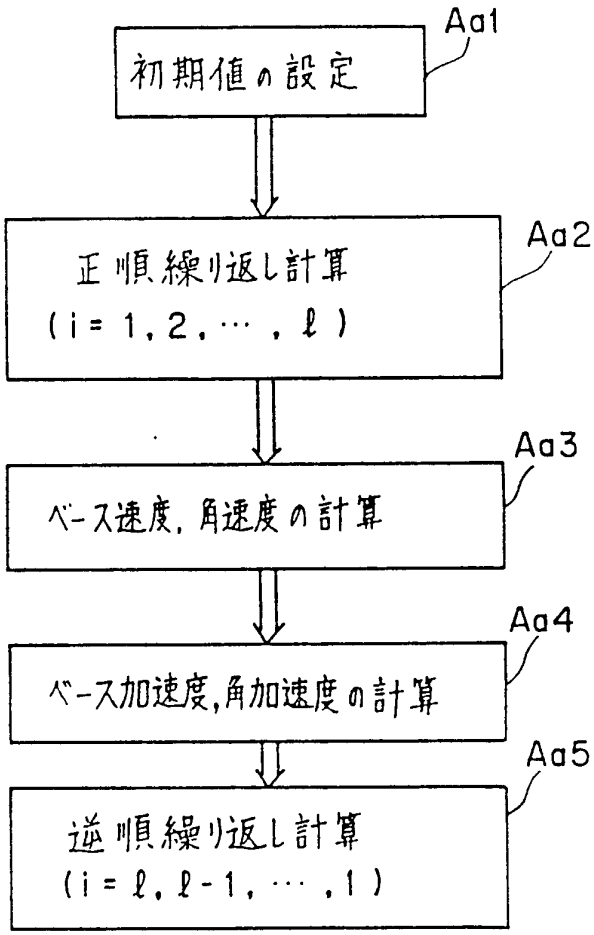
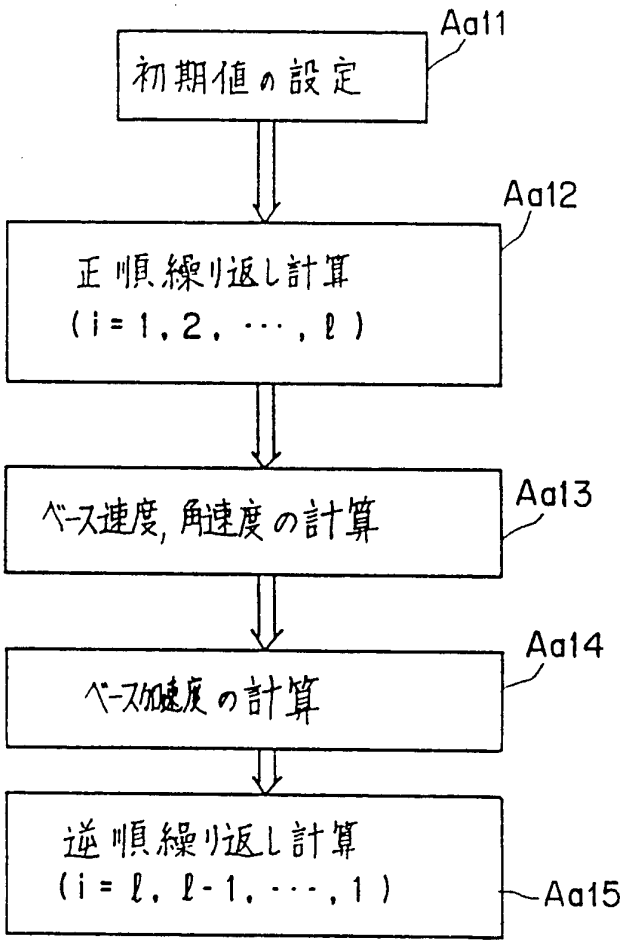

Aa1
初期値の設定
Aa2
正順繰り返し計算
(i = 1, 2, ··· , ℓ)
Aa3
ベース速度, 角速度の計算
Aa4
ベース加速度, 角加速度の計算
Aa5
逆順繰り返し計算
(i = ℓ, ℓ-1, ··· , 1)

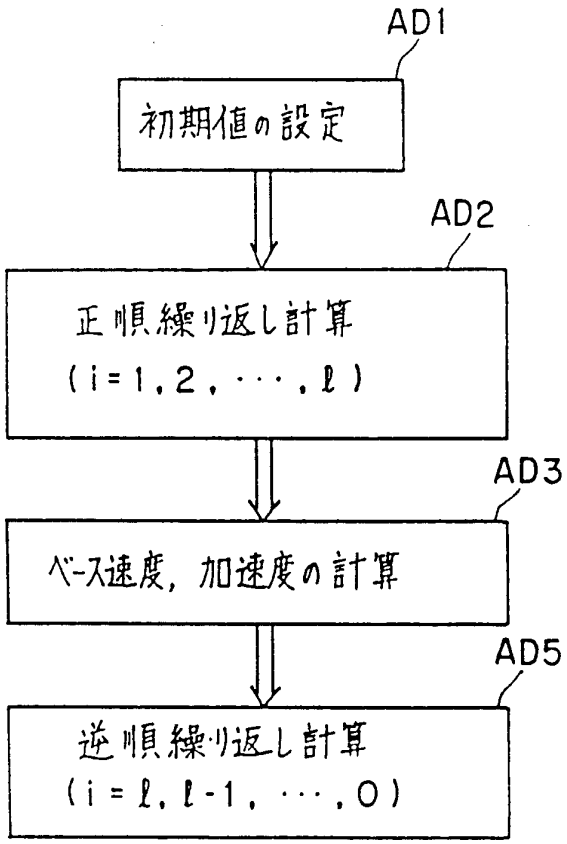
FIG. 35



○ 拘束条件

$\dot{\Omega}$ (角加速度) = 0

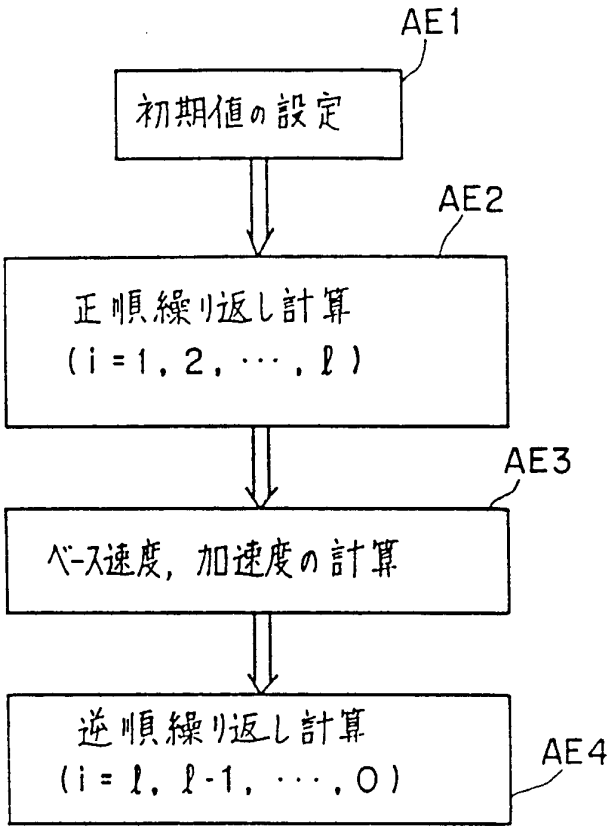
FIG. 36



○拘束条件

Ω_0(角速度) = $\dot{\Omega}_0$ (角加速度) = 0

FIG. 37

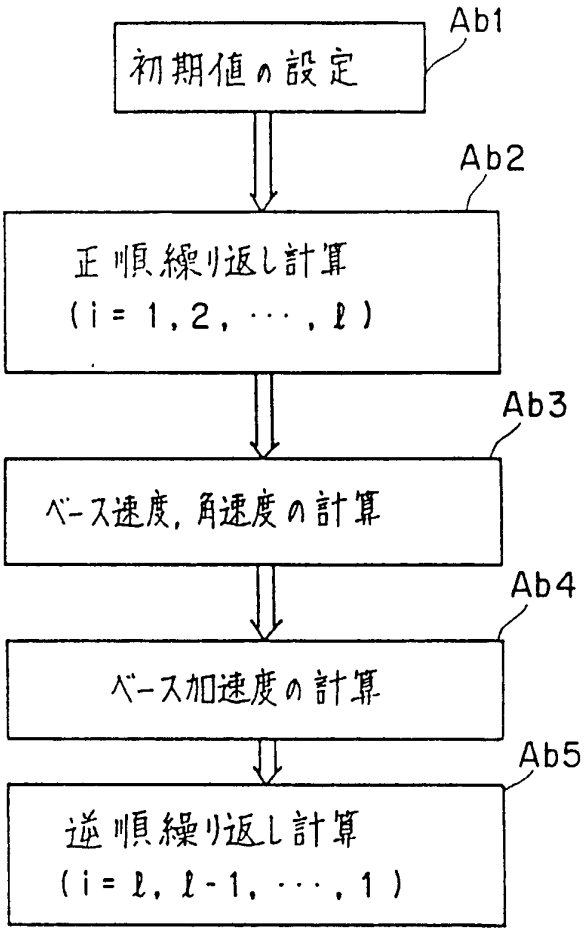


○拘束条件

(角速度) : ${}^{A}\Omega_0 = {}^{A}C_{\mathcal{R}}\,\Omega_0$ (定数)

(角加速度) : $\dot{\Omega}_0 = 0$

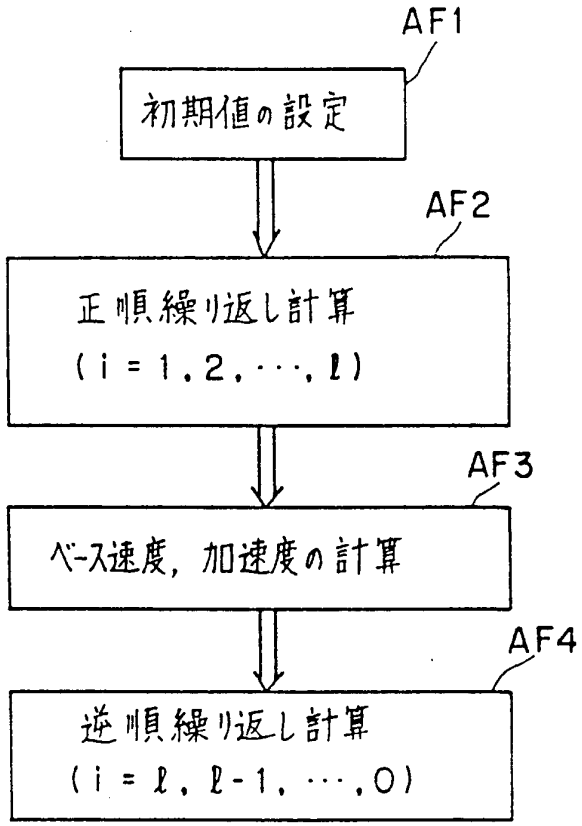
FIG. 38



○ 拘束条件：${}^{A}\dot{\Omega}_{0}$ (角加速度)

$= {}^{A}\Psi(t)$ (時間の任意関数)

FIG. 39



○ 拘束条件

${}^{A}\Omega_{0}$ (角速度) = ${}^{A}\Psi(t)$ (時間の任意関数)

${}^{A}\dot{\Omega}_{0}$ (角加速度) = ${}^{A}\Psi(t)$ (時間の任意関数の微分)

FIG. 40

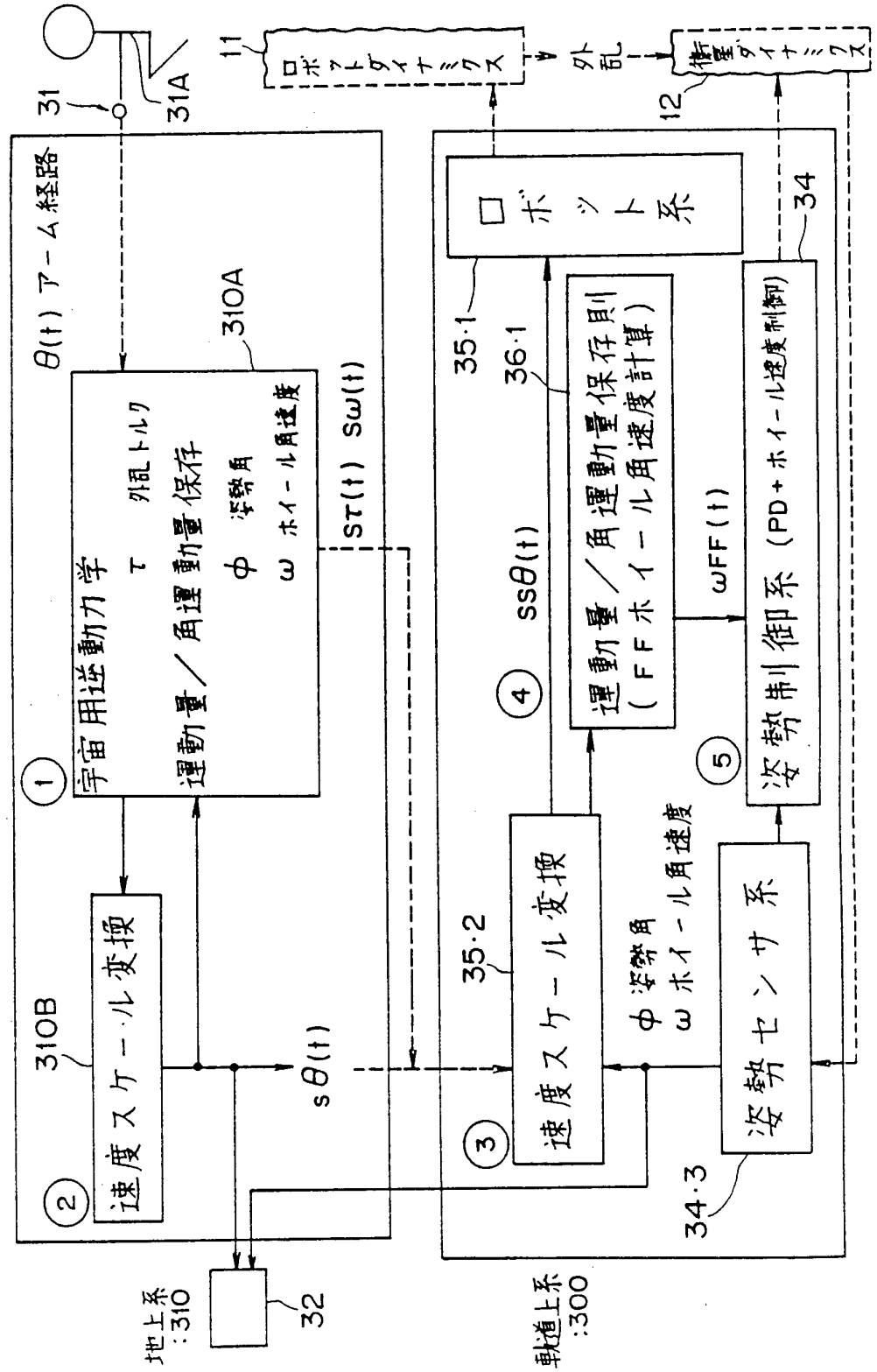

31
31A
11
ロボットダイナミクス
外乱
12
衛星ダイナミクス
θ(t) アーム経路
310A
宇宙用逆動力学
τ 外乱トルク
運動量／角運動量保存
φ 姿勢角
ω ホイール角速度
sT(t) sω(t)
①
310B
速度スケール変換
②
sθ(t)
35·1
ロボット系
36·1
ssθ(t)
④
運動量／角運動量保存則
(FFホイール角速度計算)
ωFF(t)
35·2
③
速度スケール変換
φ 姿勢角
ω ホイール角速度
⑤
姿勢制御系 (PD+ホイール速度制御)
34
34·3
姿勢センサ系
地上系
:310
32
軌道上系
:300

FIG. 41

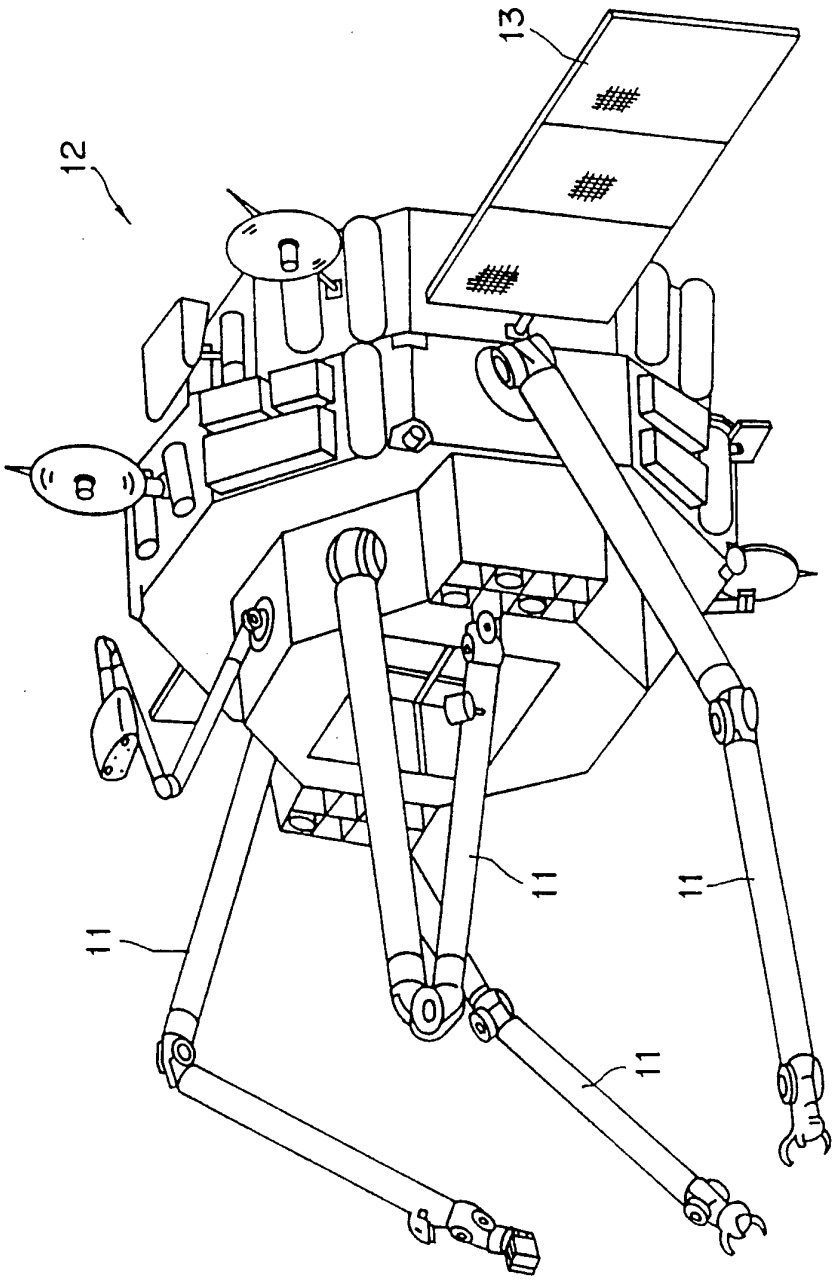


FIG. 42

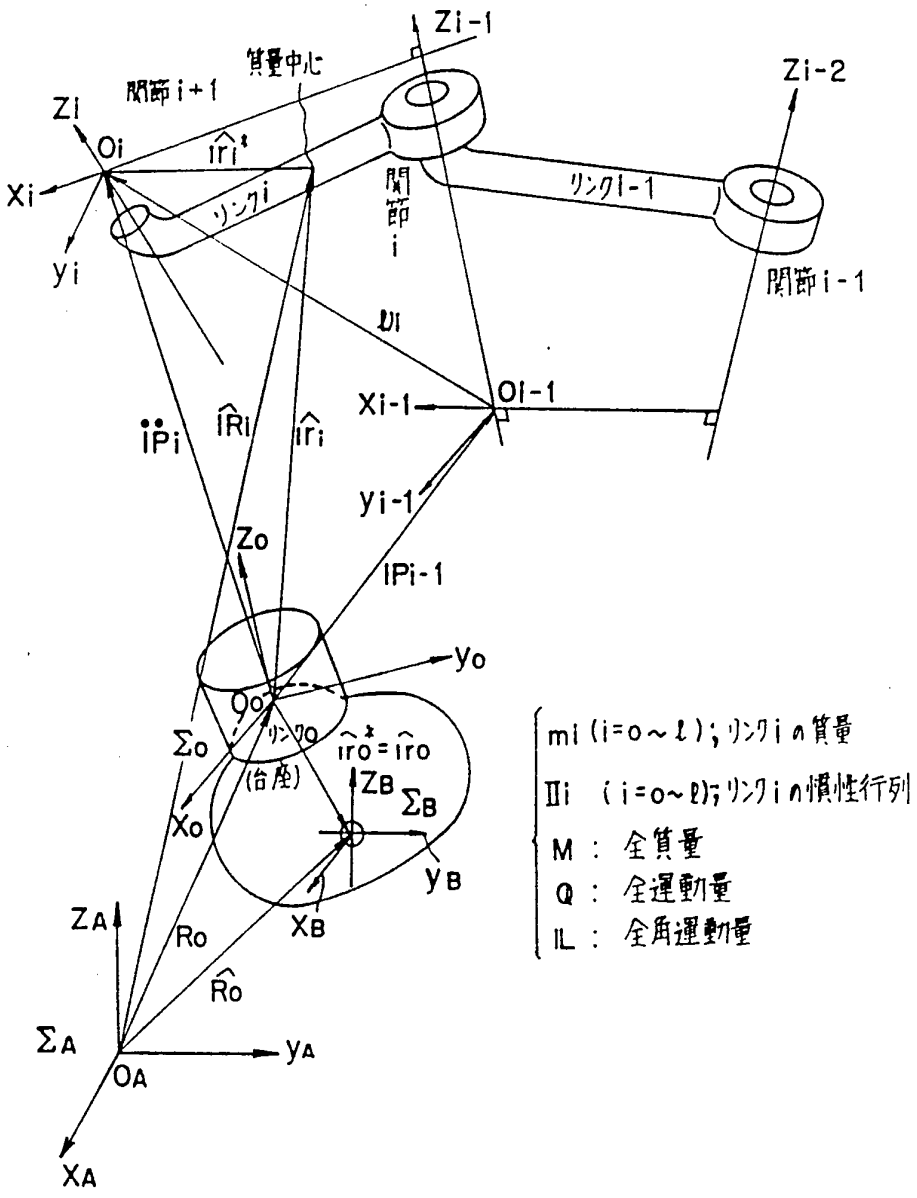

Zi-1
質量中心
関節 i+1
Zi-2
Zi
Oi
Xi
yi
リンクi
関節 i
リンクi-1
関節 i-1
Xi-1
Oi-1
yi-1
Zo
yo
Oo
リンクo
(台座)
Σo
Xo
ZB
ΣB
yB
XB
ZA
Ro
ΣA
yA
OA
XA
mi (i=o~ℓ); リンクiの質量
Ii (i=o~ℓ); リンクiの慣性行列
M : 全質量
Q : 全運動量
L : 全角運動量

FIG. 43

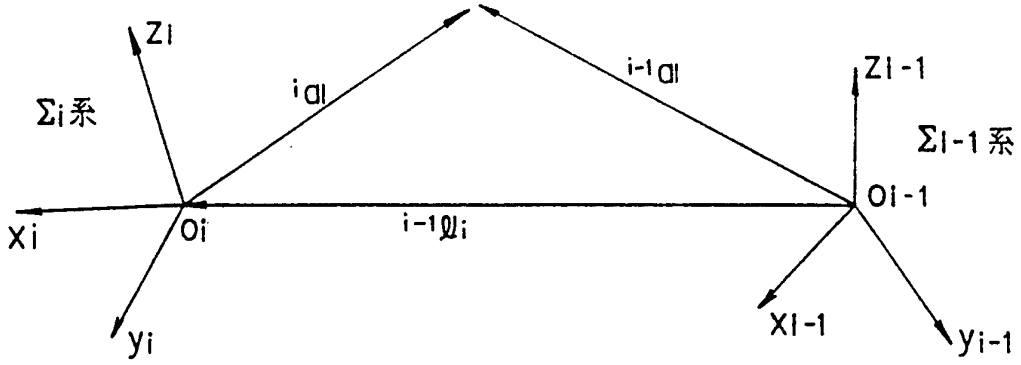


FIG. 44

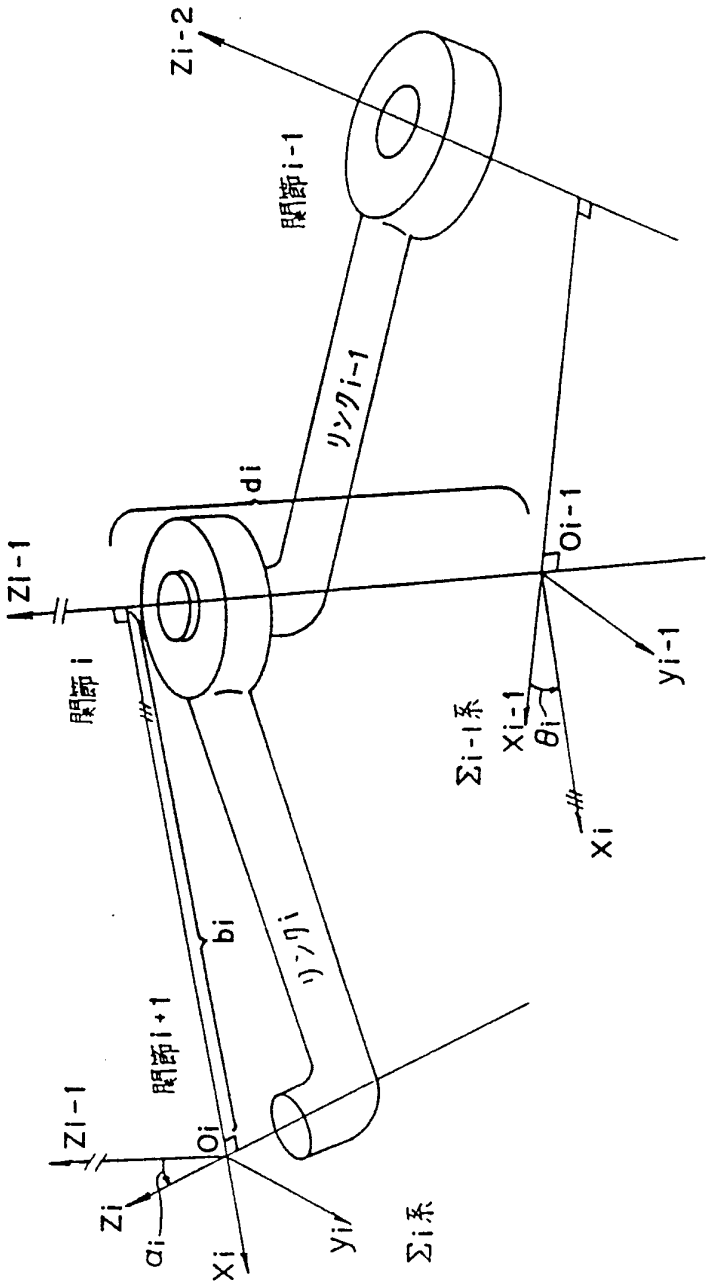

Zi-2
関節i-1
リンクi-1
di
Zi-1
関節i
Oi-1
yi-1
Σi-1系
Xi-1
θi
Xi
bi
リンクi
関節i+1
Zi-1
Oi
Zi
αi
Xi
yi
Σi系

FIG. 45

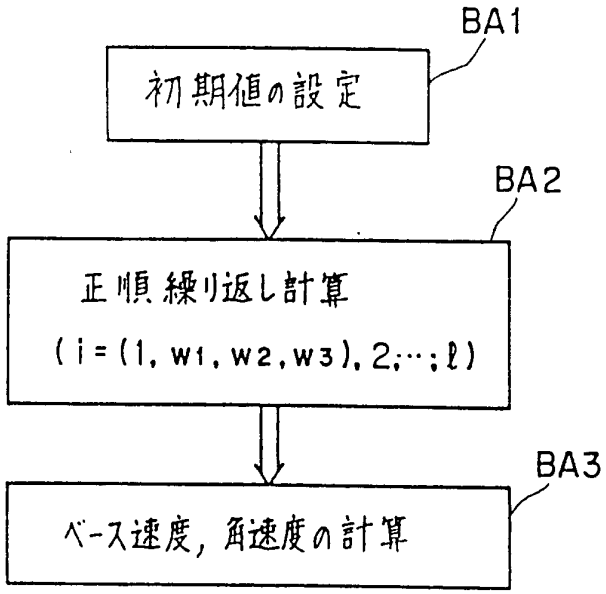


FIG. 46

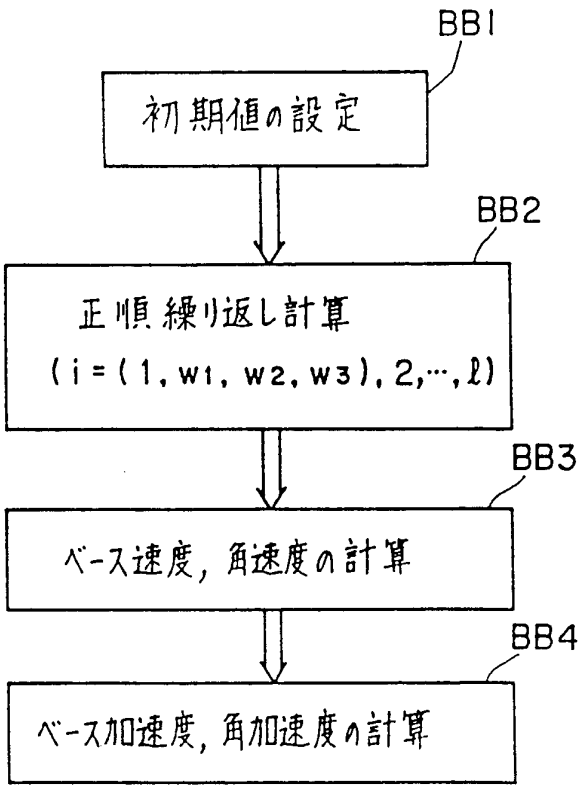

BB1
初期値の設定
BB2
正順繰り返し計算
(i=(1, w1, w2, w3), 2, ···, l)
BB3
ベース速度, 角速度の計算
BB4
ベース加速度, 角加速度の計算

FIG. 47

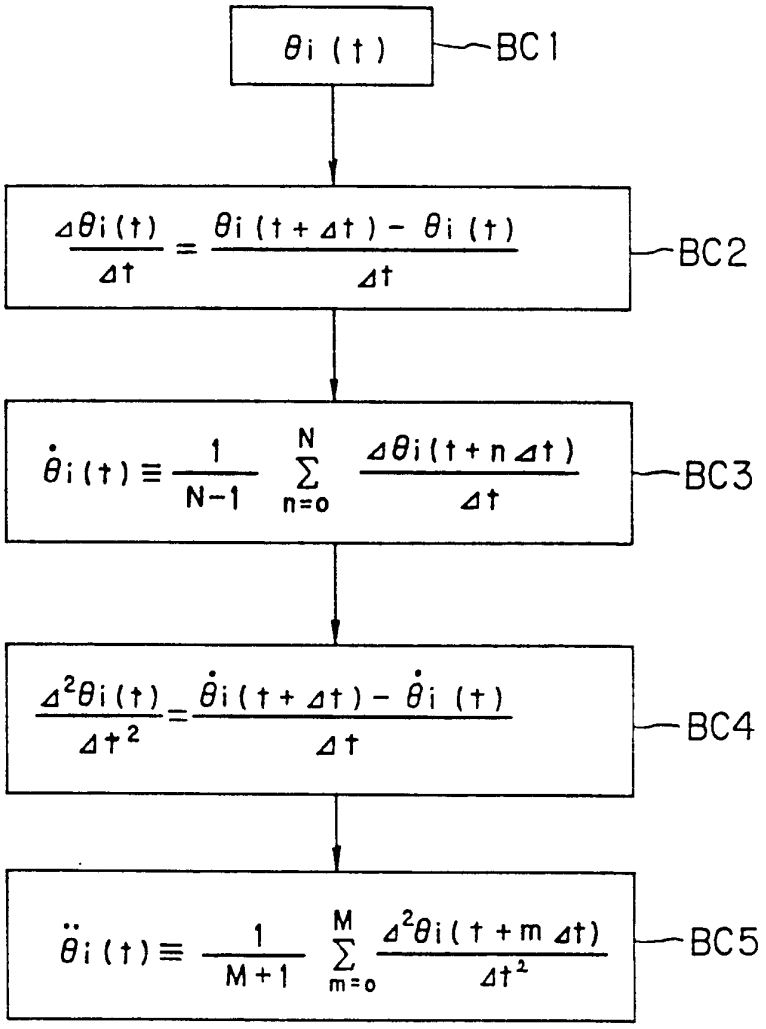

θi (t)
BC1
$\frac{\Delta\theta i(t)}{\Delta t} = \frac{\theta i(t+\Delta t) - \theta i(t)}{\Delta t}$
BC2
$\dot{\theta} i(t) \equiv \frac{1}{N-1} \sum_{n=0}^{N} \frac{\Delta\theta i(t+n\Delta t)}{\Delta t}$
BC3
$\frac{\Delta^2\theta i(t)}{\Delta t^2} = \frac{\dot{\theta} i(t+\Delta t) - \dot{\theta} i(t)}{\Delta t}$
BC4
$\ddot{\theta} i(t) \equiv \frac{1}{M+1} \sum_{m=0}^{M} \frac{\Delta^2\theta i(t+m\Delta t)}{\Delta t^2}$
BC5

FIG. 48

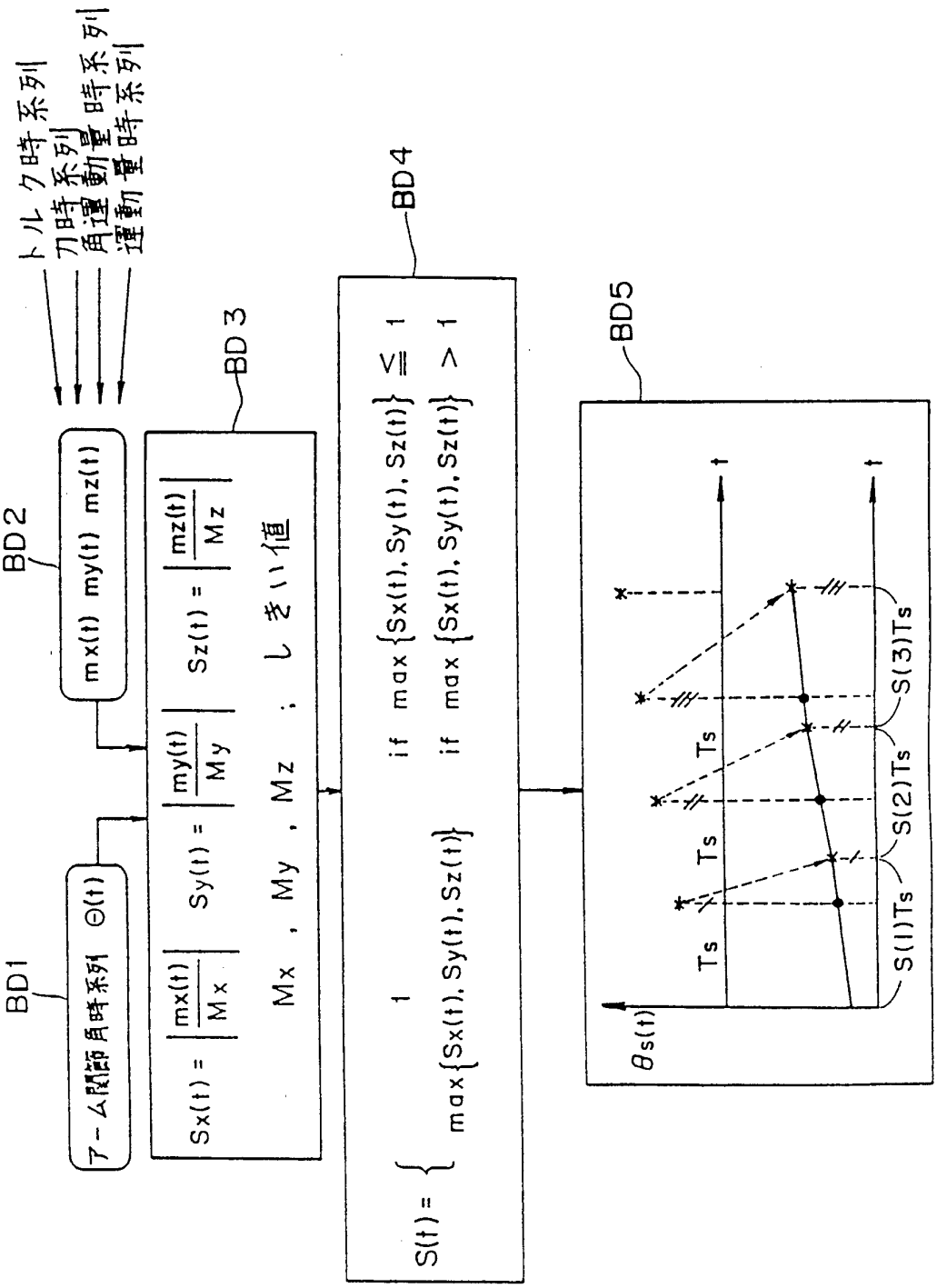

トルク時系列
力時系列
角運動量時系列
運動量時系列
BD1
アーム関節角時系列 Θ(t)
BD2
mx(t) my(t) mz(t)
BD3
Sx(t) = |mx(t)/Mx| Sy(t) = |my(t)/My| Sz(t) = |mz(t)/Mz|
Mx , My , Mz : しきい値
BD4
S(t) = 1 if max{Sx(t), Sy(t), Sz(t)} ≦ 1
max{Sx(t), Sy(t), Sz(t)} if max{Sx(t), Sy(t), Sz(t)} > 1
BD5
θs(t)
Ts
Ts
Ts
S(1)Ts
S(2)Ts
S(3)Ts
t
t

FIG. 49

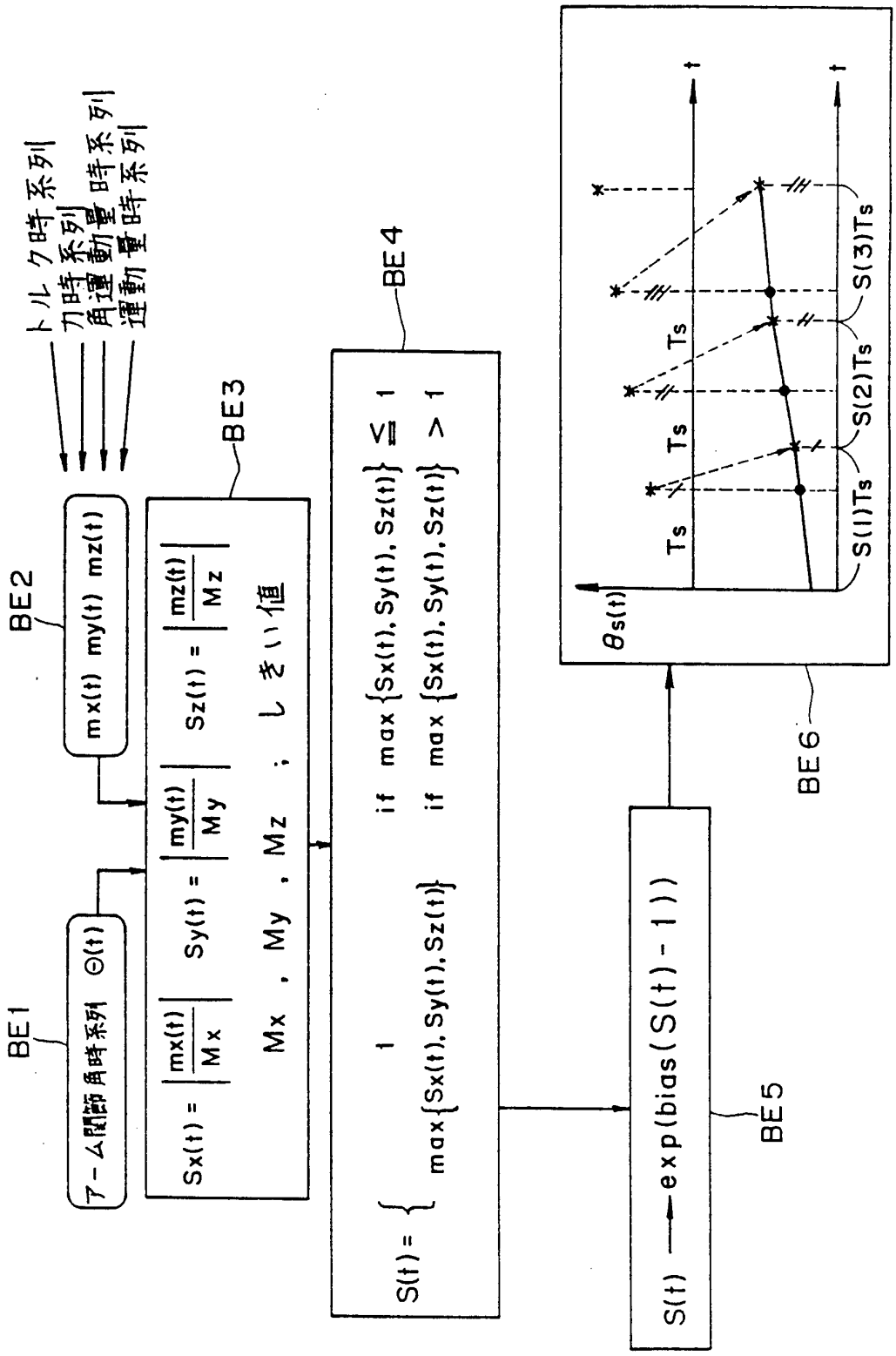

トルク時系列
力時系列
角運動量時系列
運動量時系列
BE1
アーム関節角時系列 Θ(t)
BE2
mx(t) my(t) mz(t)
BE3
Sx(t) = |mx(t)/Mx| Sy(t) = |my(t)/My| Sz(t) = |mz(t)/Mz|
Mx , My , Mz ; しきい値
BE4
S(t) = { 1 if max{Sx(t), Sy(t), Sz(t)} ≦ 1
max{Sx(t), Sy(t), Sz(t)} if max{Sx(t), Sy(t), Sz(t)} > 1
BE5
S(t) → exp(bias(S(t) - 1))
BE6
θs(t)
Ts
Ts
Ts
S(1)Ts
S(2)Ts
S(3)Ts
t
t

FIG.50

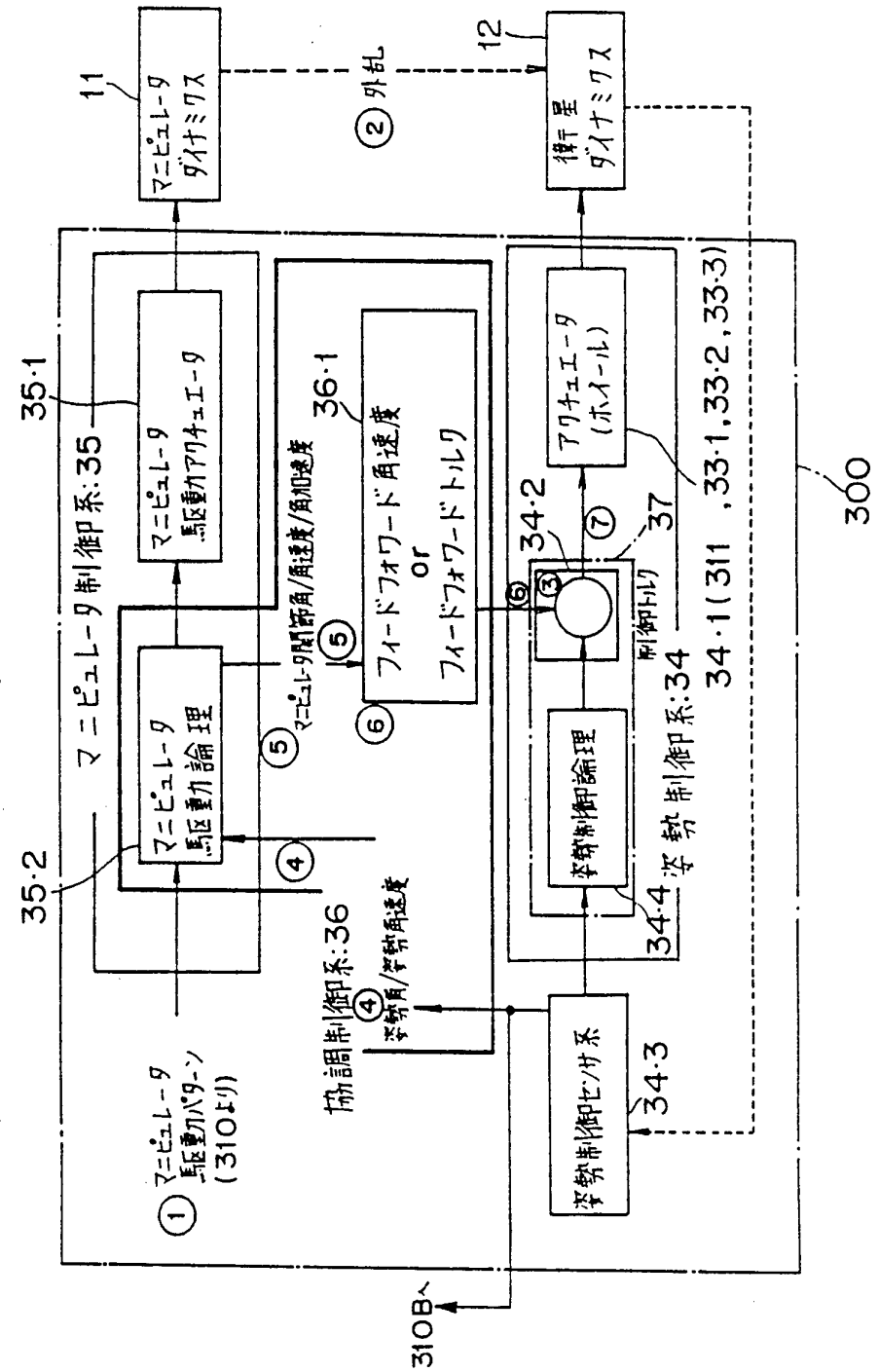

マニピュレータ制御系:35
35-1
35-2
マニピュレータ駆動アクチュエータ
マニピュレータ駆動力論理
マニピュレータダイナミクス
11
12
外乱
復元星ダイナミクス
マニピュレータ関節角/角速度/角加速度
36-1
フィードフォワード角速度 or フィードフォワードトルク
アクチュエータ(ホイール)
34-2
制御トルク
34-1(311, 33-1, 33-2, 33-3)
姿勢制御系:34
姿勢制御論理
34-4
姿勢制御センサ系
34-3
協調制御系:36
姿勢角/姿勢角速度
マニピュレータ駆動力パターン(310より)
310B
300

FIG. 51

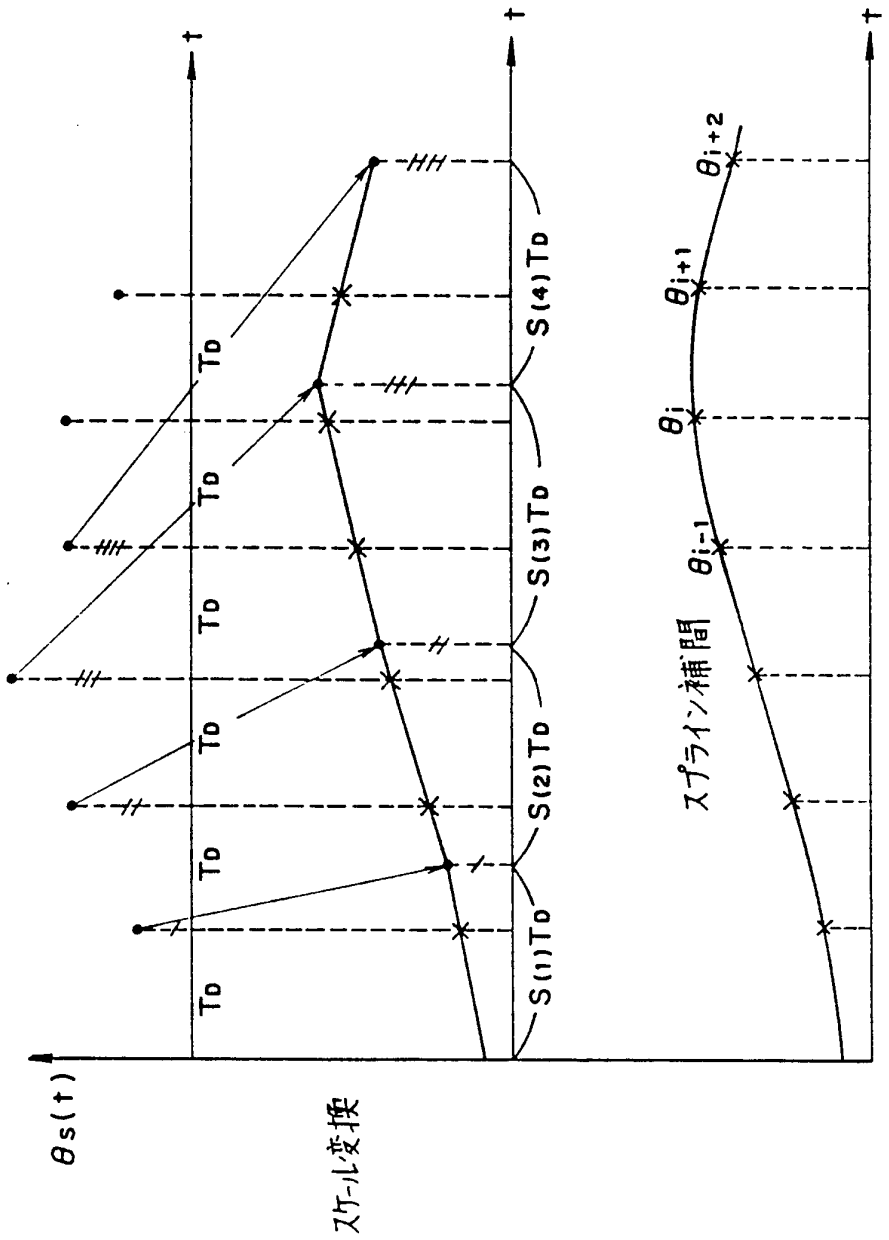


FIG. 52

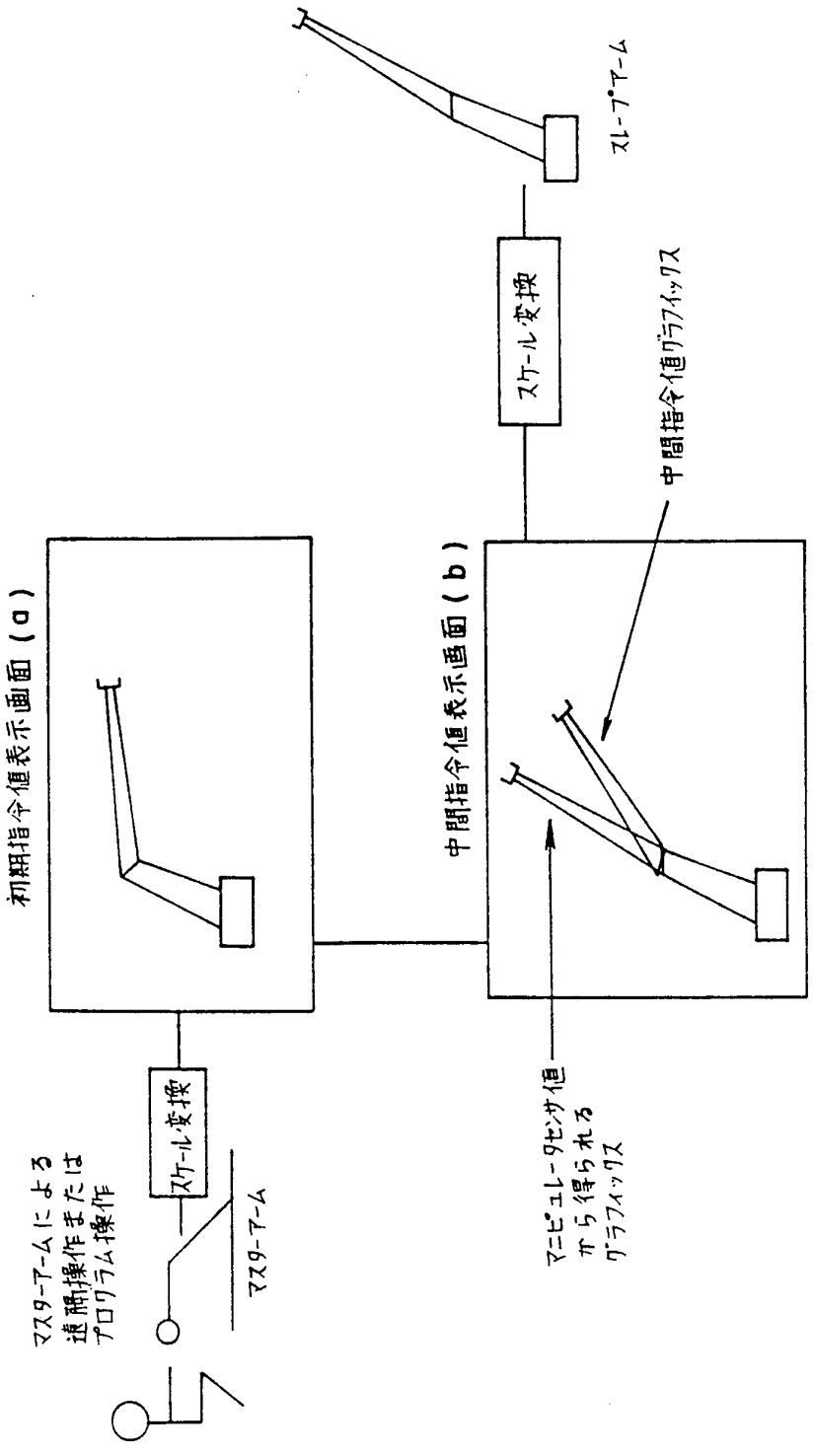

初期指令値表示画面(a)
中間指令値表示画面(b)
スレーブアーム
スケール変換
中間指令値グラフィックス
マスターアームによる
直接操作または
プログラム操作
スケール変換
マスターアーム
マニピュレータセンサ値
から得られる
グラフィックス

FIG. 53

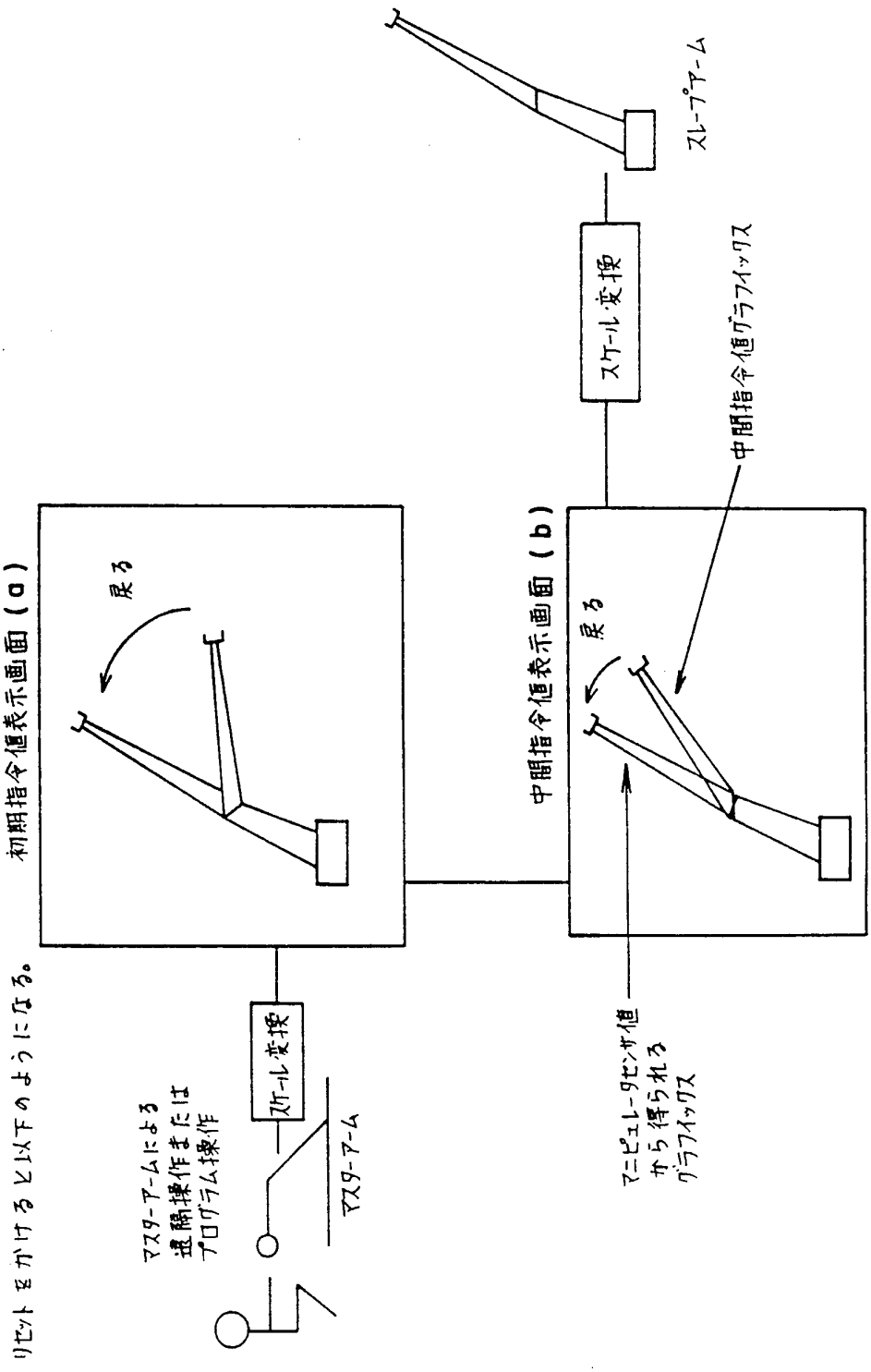

リセットをかけると以下のようになる。
初期指令値表示画面(a)
戻る
マスターアームによる
追随操作またはプログラム操作
スケール変換
マスターアーム
中間指令値表示画面(b)
戻る
マニピュレータセンサ値から得られるグラフィックス
中間指令値グラフィックス
スケール変換
スレーブアーム

FIG. 54

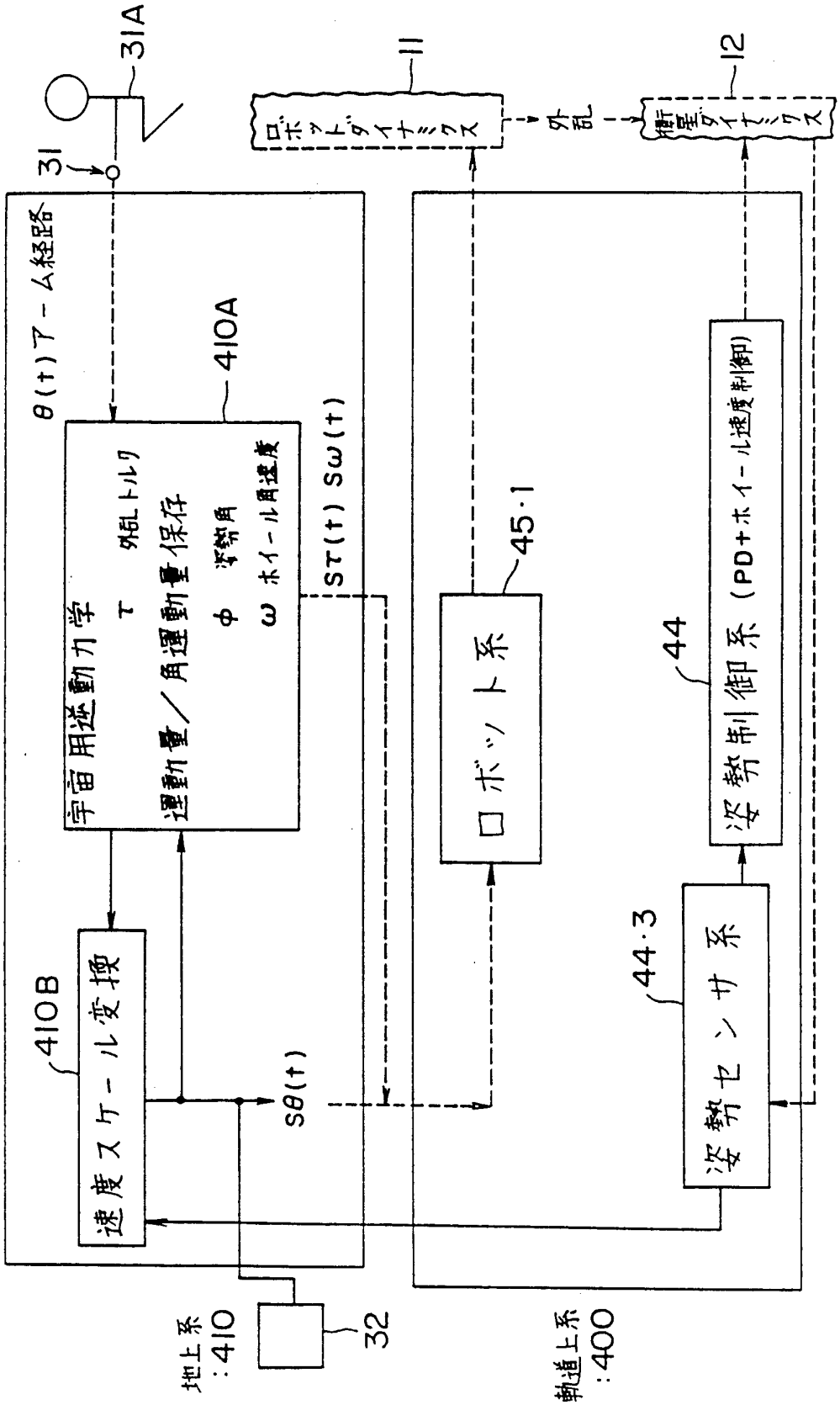

31A
31
11
12
ロボットダイナミクス
外乱
衛星ダイナミクス
θ(t)アーム経路
410A
宇宙用逆動力学
T 外乱トルク
運動量／角運動量保存
φ 姿勢角
ω ホイール角速度
ST(t) Sω(t)
45·1
ロボット系
44
姿勢制御系（PD+ホイール速度制御）
410B
速度スケール変換
Sθ(t)
44·3
姿勢センサ系
地上系
:410
32
軌道上系
:400

FIG. 55

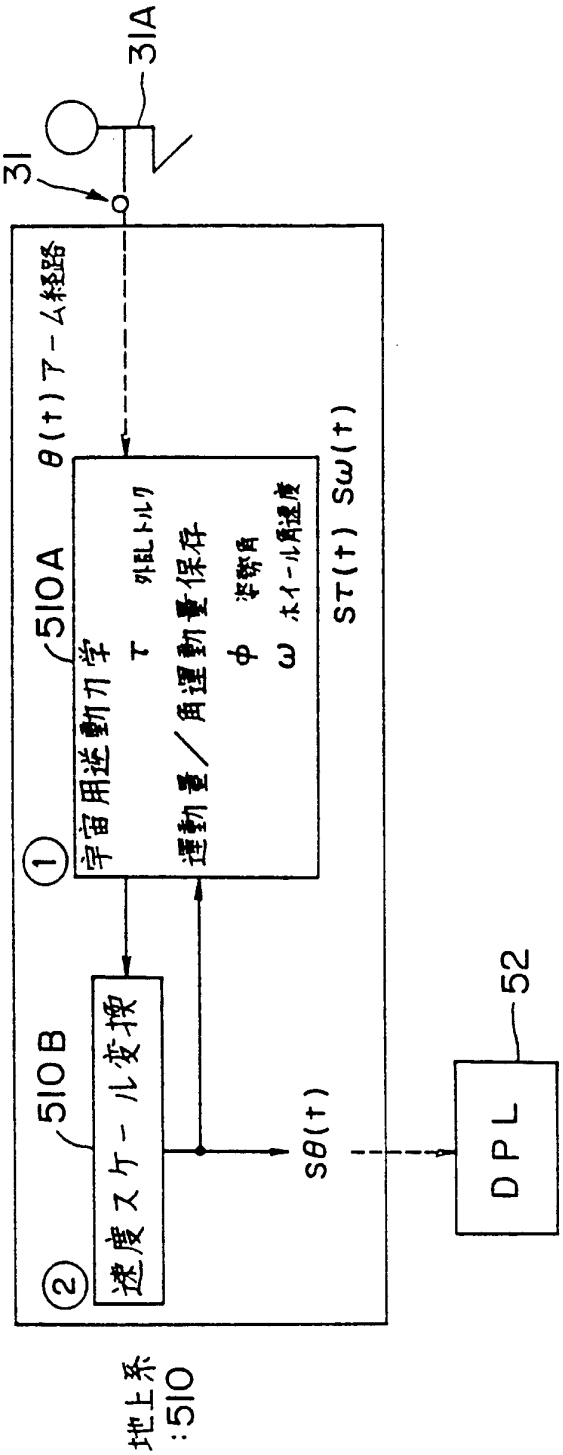
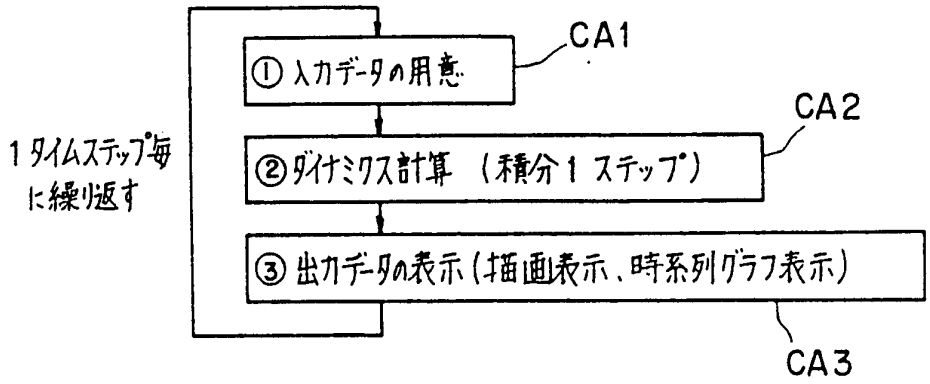

31A
31
θ(t) アーム経路
510A
①
宇宙用逆動力学
T 外乱トルク
運動量／角運動量保存
φ 姿勢角
ω ホイール角速度
ST(t) Sω(t)
510B
②
速度スケール変換
Sθ(t)
52
DPL
地上系
:510

FIG. 56


CA1
① 入力データの用意
CA2
1タイムステップ毎に繰り返す
②ダイナミクス計算 (積分1ステップ)
③出力データの表示(描画表示、時系列グラフ表示)
CA3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP93/00751

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int. Cl^5 B25J13/00

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int. Cl^5 B25J9/10-9/22, 13/00, G05B19/00, 02, 42, G05D1/00, 08

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho 1926 - 1992
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971 - 1992

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP, A, 63-196388 (Toshiba Corp.), August 15, 1988 (15. 08. 88), Lines 5 to 14, lower left column, page 1 & US, A, 4956790	1-44
A	JP, A, 63-66611 (Yokogawa Electric Co., Ltd.), March 25, 1988 (25. 03. 88), Lines 5 to 16, lower left column, page 1 (Family: none)	1-44
A	JP, A, 61-79589 (Toshiba Corp.), April 23, 1986 (23. 04. 86), Lines 5 to 15, lower left column, page 1 (Family: none)	1-44
Y	JP, A, 4-141388 (National Aerospace Laboratory, Science and Technology Agency and another), May 14, 1992 (14. 05. 92), Line 5, lower left column to line 16, upper right column, page 1 (Family: none)	1-44

[X] Further documents are listed in the continuation of Box C. [ ] See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier document but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
August 12, 1993 (12. 08. 93)	August 31, 1993 (31. 08. 93)
Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office	Authorized officer
Facsimile No.	Telephone No.

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 1992)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP93/00751

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP, A, 4-129688 (Fujitsu Ltd.), April 30, 1992 (30. 04. 92), Line 5, lower left column, page 1 to line 8, upper left column, page 2 (Family: none)	1-44
Y	JP, A, 2-274484 (Fujitsu Ltd.), November 8, 1990 (08. 11. 90), Line 5, lower left column to line 5, lower right column, page 1 (Family: none)	1-44
Y	JP, A, 2-176906 (Toyota Motor Corp.), July 10, 1990 (10. 07. 90), Line 5, lower left column, page 1 to line 5, upper right column, page 2 (Family: none)	1-44
Y	JP, A, 1-259401 (Mitsubishi Electric Corp.), October 17, 1989 (17. 10. 89), Lines 5 to 14, lower left column, page 1 & US, A, 4922281	3-10
Y	JP, A, 62-199385 (Toshiba Corp.), September 3, 1987 (03. 09. 87), Line 5, lower left column to line 1, lower right column, page 1 (Family: none)	3-10
Y	JP, A, 2-116494 (Fujitsu Ltd.), May 1, 1990 (01. 05. 90), Line 5, lower left column to line 4, lower right column, page 1 (Family: none)	25-27
Y	JP, A, 1-289683 (Mitsubishi Electric Corp.), November 21, 1989 (21. 11. 89), Lines 5 to 15, lower left column, page 1 (Family: none)	25-27
Y	JP, A, 63-196388 (Toshiba Corp.), August 15, 1988 (15. 08. 88), Lines 5 to 19, lower left column, page 1 & US, A, 4956790	25-27
A	JP, A, 63-95508 (Mitsubishi Electric Corp.), April 26, 1988 (26. 04. 88), Lines 5 to 18, lower left column, page 1 (Family: none)	25-42
Y	JP, A, 3-86484 (Fujitsu Ltd.), April 11, 1991 (11. 04. 91), Line 5, lower left column to line 8, lower right column, page 1 (Family: none)	25-42

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP93/00751

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP, A, 4-269185 (Fujitsu Ltd.), September 25, 1992 (25. 09. 92), Lines 3 to 39, column 1, page 1 (Family: none)	28-42
Y	JP, A, 61-239309 (Fujitsu Ltd.), October 24, 1986 (24. 10. 86), Lines 5 to 15, lower left column, page 1 (Family: none)	28-42

国 際 調 査 報 告

国際出願番号 PCT/JP 93/00751

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int. Cl[5] B25J13/00

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC））

Int. Cl[5] B25J9/10-9/22, 13/00, G05B19/00, 02, 42, G05D1/00, 08

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1926-1992年
日本国公開実用新案公報 1971-1992年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

C. 関連すると認められる文献

引用文献のカテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する請求の範囲の番号
A	JP, A, 63-196388（株式会社 東 芝） 15. 8月. 1988（15. 08. 88） 第1頁, 左下欄, 第5行-第14行 &US, A, 4956790	1-44
A	JP, A, 63-66611（横河電機株式会社） 25. 3月. 1988（25. 03. 88） 第1頁, 左下欄, 第5行-第16行（ファミリーなし）	1-44

☑ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー
「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」先行文献ではあるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献
「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日
12. 08. 93

国際調査報告の発送日
31.08.93

名称及びあて先
日本国特許庁（ISA/JP）
郵便番号100
東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）
酒井 進 印
3F 7331

電話番号 03-3581-1101 内線 3352

C（続き）．　関連すると認められる文献

引用文献のカテゴリー＊	引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する請求の範囲の番号
A	JP, A, 61-79589（株式会社　東　芝） 23. 4月. 1986（23. 04. 86） 第1頁, 左下欄, 第5行－第15行（ファミリーなし）	1－44
Y	JP, A, 4-141388（科学技術庁航空宇宙技術研究所 外1名） 14. 5月. 1992（14. 05. 92） 第1頁, 左下欄, 第5行－右上欄, 第16行 （ファミリーなし）	1－44
Y	JP, A, 4-129688（富士通株式会社） 30. 4月. 1992（30. 04. 92） 第1頁, 左下欄, 第5行－第2頁, 左上欄, 第8行 （ファミリーなし）	1－44
Y	JP, A, 2-274484（富士通株式会社） 8. 11月. 1990（08. 11. 90） 第1頁, 左下欄, 第5行－右下欄, 第5行（ファミリーなし）	1－44
Y	JP, A, 2-176906（トヨタ自動車株式会社） 10. 7月. 1990（10. 07. 90） 第1頁, 左下欄, 第5行－第2頁, 右上欄, 第5行 （ファミリーなし）	1－44
Y	JP, A, 1-259401（三菱電機株式会社） 17. 10月. 1989（17. 10. 89） 第1頁, 左下欄, 第5行－第14行 &US, A, 4922281	3－10
Y	JP, A, 62-199385（株式会社　東　芝） 3. 9月. 1987（03. 09. 87） 第1頁, 左下欄, 第5行－右下欄, 第1行（ファミリーなし）	3－10
Y	JP, A, 2-116494（富士通株式会社） 1. 5月. 1990（01. 05. 90） 第1頁, 左下欄, 第5行－右下欄, 第4行（ファミリーなし）	25－27
Y	JP, A, 1-289683（三菱電機株式会社） 21. 11月. 1989（21. 11. 89） 第1頁, 左下欄, 第5行－第15行（ファミリーなし）	25－27
Y	JP, A, 63-196388（株式会社　東　芝） 15. 8月. 1988（15. 08. 88） 第1頁, 左下欄, 第5行－第19行 &US, A, 4956790	25－27

C（続き）．　関連すると認められる文献

引用文献のカテゴリー＊	引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する請求の範囲の番号
A	JP, A, 63-95508（三菱電機株式会社） 26. 4月. 1988（26. 04. 88） 第1頁, 左下欄, 第5行－第18行（ファミリーなし）	25－42
Y	JP, A, 3-86484（富士通株式会社） 11. 4月. 1991（11. 04. 91） 第1頁, 左下欄, 第5行－右下欄, 第8行 （ファミリーなし）	25－42
Y	JP, A, 4-269185（富士通株式会社） 25. 9月. 1992（25. 09. 92） 第1頁, 第1欄, 第3行－第39行（ファミリーなし）	28－42
Y	JP, A, 61-239309（富士通株式会社） 24. 10月. 1986（24. 10. 86） 第1頁, 左下欄, 第5行－第15行（ファミリーなし）	28－42

続葉(2)