

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-575

飛行シミュレーション試験設備, モーション模擬装置の
構成および機能, 性能

川原弘靖・岡部正典・渡辺 顯
坂東俊夫・若色 薫

1987年6月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

開発企画・調整

岡部正典

開発担当

モーション模擬装置

川原弘靖、若色 薫

計算機システム

渡辺 顯、坂東俊夫

若色 薫、川原弘靖

評価パイロット

中村 勝、照井裕之

報告書執筆担当

川原弘靖

飛行シミュレーション試験設備, モーション模擬装置の* 構成および機能, 性能

川原 弘 靖 ・ 岡部 正 典 ・ 渡 辺 顯
坂 東 俊 夫 ・ 若 色 薫

1. はじめに

航空宇宙技術研究所の飛行シミュレーション試験設備は昭和55年度から第一期模擬操縦席装置, 第二期視界模擬装置, 第三期モーション模擬装置と3期4カ年にわたり整備された。図1に飛行シミュレーション試験設備の全体構成を示す。この図で太線で囲われた部分がモーション模擬装置であり, 本報告ではこの部分について記述する。

飛行シミュレーション試験設備におけるモーション模擬装置は,

- ・離着陸時における加減速時の前後加速度
- ・飛行中における機体運動による線および角加速度
- ・ガスト中の飛行における機体振動
- ・失速時におけるバフエット振動
- ・滑走中におけるランブル振動
- ・着陸時の接地振動

等を模擬することにより, 搭乗者(パイロット)に航空機操縦の現実感を与え, シミュレーション精度の向上を図るものである。

当研究所においては昭和38年度に汎用飛行シミュレータ設備¹⁾を設置し, モーション駆動装置としてピッチ, ロールの二自由度の装置を備えていたが, 最近の航空機開発において要求される飛行シミュレーション試験の精度の向上と規模の大きさに対応できなくなり, また設備の老朽化も進み新装置の導入に至った。多自由度モーション模擬装置としては,

- ・ジンバル方式
- ・共動型懸垂方式
- ・共動型サポート方式

- ・特殊駆動方式(例えばNASAのVertical Motion Simulator)

等各種のシステムが開発され使用されているが, 最近のモーション模擬装置は可動自由度と可動範囲が大幅に拡大され, 特殊なケースを除けばその殆どに共動型6自由度(可動軸の対応については図2に示す)モーション駆動装置が採用されている。

本設備は第一期, 第二期工事と合わせて低騒音STOL実験機の開発に直ちに対応するという計画の下に, 以下の方針により設計, 製作された。

- 1) 導入後直ちに当研究所が開発している低騒音STOL実験機「飛鳥」のシミュレーション試験に対応できる装置とする。
- 2) 信頼性の高い装置であること。
- 3) 動揺装置として特定試験研究目的のため単独での使用も可能とする。
- 4) 試験研究設備としての汎用性をもたせる。
- 5) 整備性の向上と入手の容易な部品を使用する。

以上の設計方針に従い, 装置は共動型6自由度サポート方式を採用した。

なお第三期工事は全体工事の最終フェーズに当たっているため全体調整とシステムの改善等にも留意して工事を進めた。

2章以降に本装置の構成, 機能, 性能について述べる。

2. 記号, 略号

- A : 電流 (Ampere)
Ai : アナログ入力
Ao : アナログ出力
BMC : Bust Multiplexor Channel
C/L : 操舵反力模擬負荷装置 (Control Loading)

* 昭和62年4月23日受付

- DCI : 10進 (Decimal)
- DCU : Data Control Unit
- Di : ディスクリット入力
- Do : ディスクリット出力
- EXT : 外部の (External)
- Hr : 時 (Hour)
- Hz : 周波数 (Hertz)
- I : 逆 (Invert)
- MIL : 米軍 (Military)
- MIT : Multi Interrupt Timer

- N/DAC : データ収録および制御
- OCT : 8進 (Octal)
- R : 実数 (Real)
- RTC : 実時間時計 (Real Time Clock)
- V : 電圧 (Volt)

3. モーション模擬装置の構成

モーション模擬装置の全体構成を図3に示す。
各構成品について機能、性能を以下に記す。

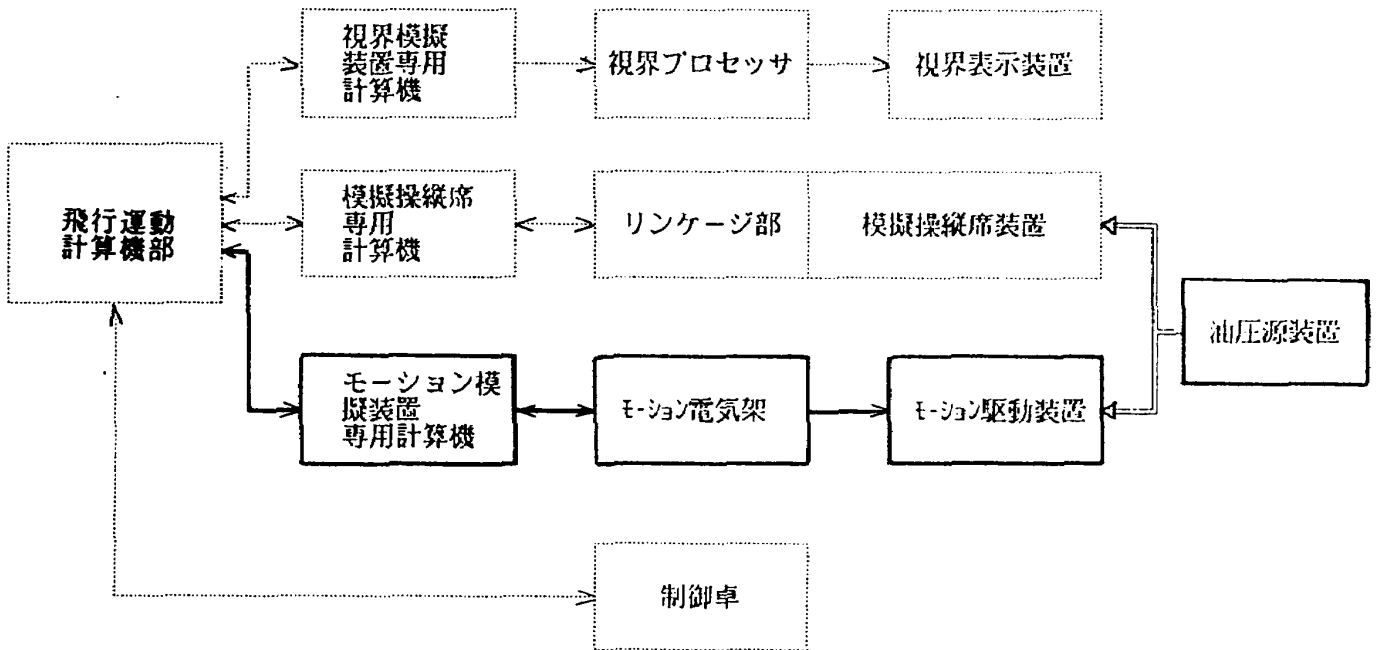


図1 飛行シミュレーション試験設備全体構成図

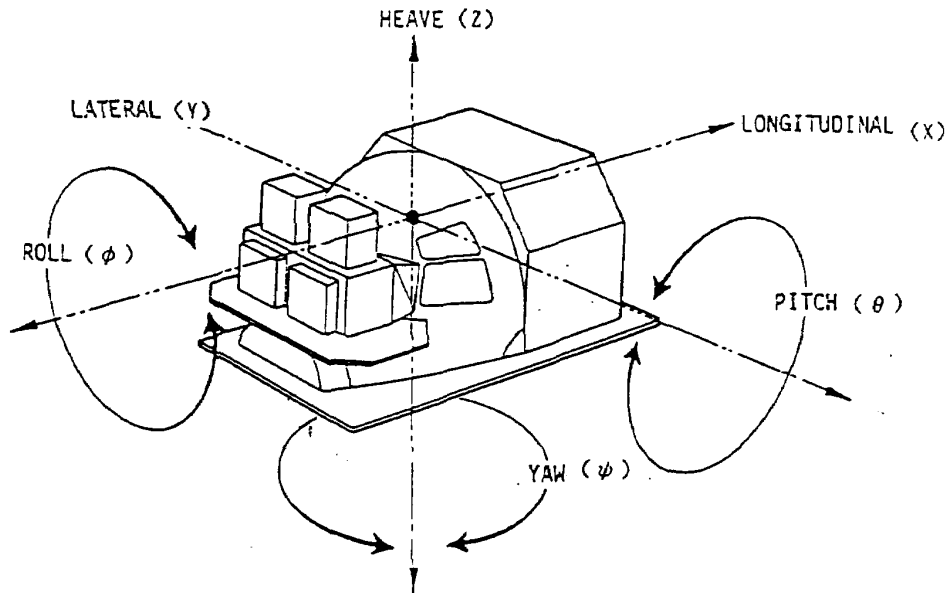


図2 6自由度モーション駆動装置の可動軸対応

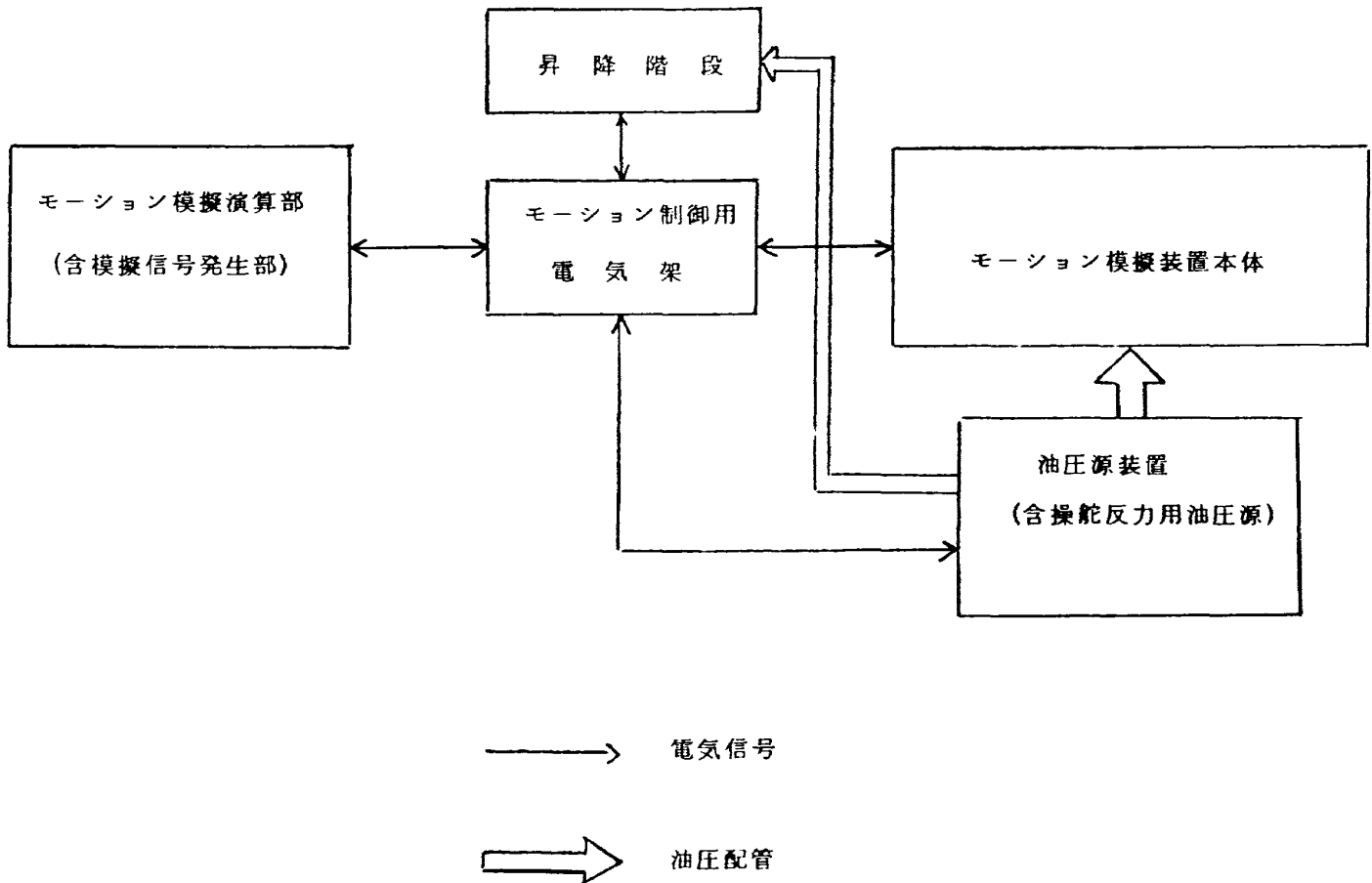


図3 モーション模擬装置全体構成図

3.1 モーション模擬装置本体

モーション模擬装置本体は先にも述べたように共動型6自由度サポート方式を採用した。本システムはklaus.L.Cappel のオリジナル・パテントにより開発されたシステムであり, 本システムは最近の大型フライト・シミュレータ装置のモーション装置として広く採用されており, 現時点では最も信頼できかつ高性能なモーションシステムと考える。以降に各構成要素について記述する。

3.1.1 油圧作動筒

油圧作動筒(アクチュエータ)の外形を図4に示す。また作動筒の性能を表1に示す。本システムの基本構成となるアクチュエータ(油圧作動筒)は信頼性の面から米国シンガー社が採用している Parker・Hannifin社の製品を輸入し使用した。

(1) 衝撃吸収機構

通称ピッコロオリフィスと呼ばれ, シリンダ両端に小さな穴(直径0.95~1.6mm)を数多く穴け, いわゆるオイル・ダンパ的に衝撃を吸収する機構であ

表1 油圧作動筒の諸元

項目	諸元
・最大ストローク	1,524mm
・内径	101.6φmm
・ロット径	76.2φmm
・出力 伸び側	6,846kgf
縮み側	2,995kgf
・最大速度	571.5mm/sec
・ピッコロオリフィス長	76.2mm
・ハイドロ・スタティック ・ヘアリング摩擦力	18kgf以下
メーカー、型名	PERKER HANNIFIN /CTCFSU30

り, ペイロード78,400N(8,000kgf) 負荷時の最大運動エネルギー6,203(63,295kgf・cm)をオリフィス長762cmで吸収する。

(2) ハイドロ・スタティック・ベアリング

通常シリンダの油漏れ防止にはオイル・シール, Oリング等を用いるが, 摩擦力の低減(スムーズネ

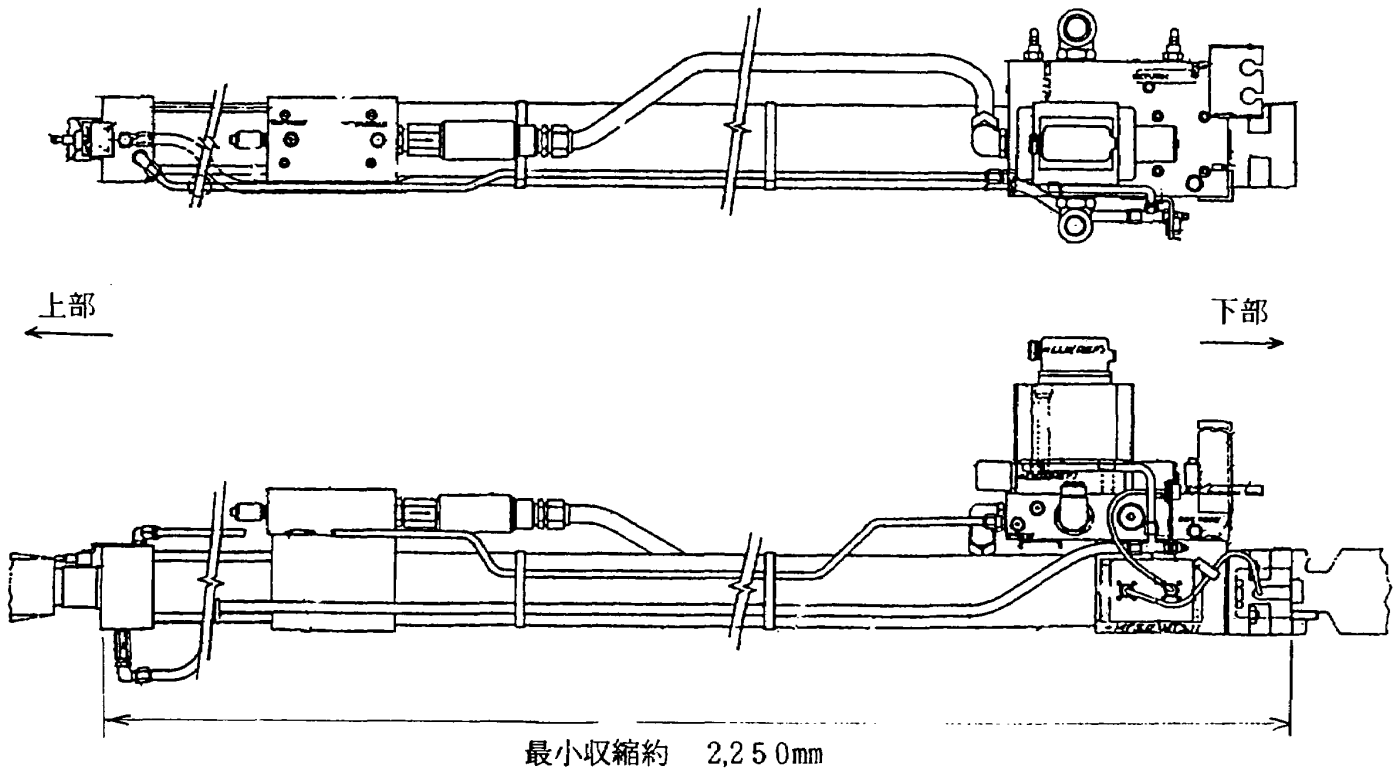


図4 油圧作動筒外形図

スの改良)のためにハイドロ・スタティック方式を採用している。この方式はシリンダとアクチュエータとの間に薄い油の層を設けることにより直接機械的接触を避け、摩擦力を低減する。本アクチュエータのような大口徑、長ストロークの場合最低作動圧力は通常のOリング方式では $(19.6\sim 39.2) \times 10,000\text{N/m}^2$ ($2\sim 4\text{kgf/cm}^2$)であるが、ハイドロスタティック・ベアリングでは約 $4.9 \times 10,000\text{N/m}^2$ (0.5kgf/cm^2)に減少することができる。

3.1.2 位置検出器

位置検出器としては、

- ポテンショメータ
- 差動トランス
- マグネスケール
- 超音波型

等が広く使われている。これらの特質を表2に示す。

本装置ではポテンショメータのような接触型位置検出器は接触不良等の不具合発生の原因となることが多いため、非接触型の位置検出器の採用を基本方針とした。一方、差動トランスの使用は作動筒ストロークが約1.5mと長尺であるため使用することが

できない。したがってマグネスケールおよび超音波型の採用を検討した結果、サーボ回路がアナログ方式であること、装置が小型軽量であること、直線性分解能に優れていること等により超音波位置検出器を採用することにした。かつ超音波センサーはシリンダ内に内装した方式を採用した。表3に本装置で用いた超音波位置検出器の性能を示す。

内装方式は、

- 外損を受けない。
- 定常運転状態で温度的に安定である(作動油温度一定)。
- 外部磁場に対し影響を受け難い。
- スペース的に有利である。

等の特長をもっている。

3.1.3 サーボ弁

駆動系は電気-油圧サーボ系により構成され、油量の制御により作動筒は駆動される。この油量の制御に用いるのがサーボ弁で、本装置の流量制御が大流量であり表4に示す性能のものを採用した。

表2 各種位置検出装置の特質

種 類	長 所	短 所
ポテンシヨメータ	<ul style="list-style-type: none"> ・安価 ・小型, 軽量 ・長尺もの (1~2 m) が可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・接触不良になり易い ・分解能が巻線の太さ (抵抗値) により変わる (0.3~1%)
	<ul style="list-style-type: none"> ・コンダクティグ型 ・多少巻線型より高価 ・分解能に優れる (無限小) 	<ul style="list-style-type: none"> ・直線性に多少劣る
差動トランス	<ul style="list-style-type: none"> ・直線性に優れている ・非接触タイプのため接触不良は皆無 	<ul style="list-style-type: none"> ・長尺ものがない ・励磁電源および復調器を必要とする ・出力電圧が微少
マグネスケール	<ul style="list-style-type: none"> ・直線性に優れる ・精度は $5 + \frac{5}{1000}L \text{ um}$; L: 有効長と優れている ・耐環境性に優れている (油, ほこり) ・デジタル処理が可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・専用検出アンプを必要とする。 ・高価 ・強力磁界, パルス等には多少弱い
超音波センサー	<ul style="list-style-type: none"> ・長尺ものが可能 ・直線性に優れる (フルスケール0.05%) ・分解能に優れる ・耐環境性に優れる 	<ul style="list-style-type: none"> ・発振器, 受信機等専用アンプが必要 ・高価

表3 超音波位置検出器の諸元

項 目	諸 元
・有効ストローク	1,524mm
・入力電圧	±15VDC
・消費電流	250mA以下
・出力電圧	±10VDC/フルストローク
・直線性	±0.05%(フルスケール)
・再現性	±0.03%(")
メーカー、型名	TEMPOSONICS/DCT115SP-2

表5 圧力変換器の諸元

項 目	諸 元
・計測範囲	0~210kgf/cm ²
・入力電圧	±15VDC
・消費電流	20mA以下
・出力電圧	0~5VDC(フルスケール)
・直線性	±0.25%(")
・ヒステリシス	±0.1%(")
メーカー、型名	SETRA-SYS/2022L-101

表4 サーボ弁の諸元

項 目	諸 元
・最大流量	0.3m ³ /min
・弁駆動電流	20mA
・ヒステリシス	4%以下
・ナルシフト(圧力)	70kgf/cm ² につき1%以下
・ナルシフト(温度)	38°Cにつき2%以下
メーカー、型名	PEGASUS-DIV /1282A-PLS2304

表6 アキュムレータの諸元

項 目	諸 元
・容積	0.038m ³
・最大許容圧力	210kgf/cm ²
・常用圧力	84kgf/cm ²
・与圧圧力	35kgf/cm ²
・封入ガス	窒素ガス

3.1.4 圧力変換器

電気-油圧サーボ系は周波数特性の改善を目的として圧力フィードバック方式を採用している。このフィードバック系に使用した圧力変換器の性能を表5に示す。

3.1.5 アキュムレータ

油圧源装置(後述)から吐出される圧力油の流量は一定である。作動流量の急変ないし油圧源能力以上の流量を必要とする場合、アキュムレータを使用することにより過渡的に必要な流量を確保している。本装置には油圧作動筒2本につき1個、合計3個のアキュムレータが設置されている。アキュムレータの諸元を表6に、外観を図5に示す。

3.1.6 動揺台、ベースおよび作動筒結合部

(1) 動揺台

模擬操縦席、視界模擬装置等を搭載し、また油圧

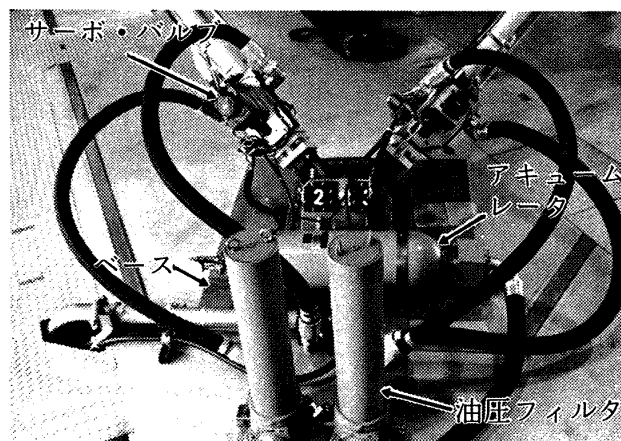


図5 アキュムレータ外観図

作動筒上部ジョイントに結合され、油圧作動筒の伸縮により6自由度の動揺を可能とする堅固な可動台とした。動揺台の質量は1,880kgであり、その強度はペイロード78,400N(8,000kgf)の荷重で加速度3.0g(MIL-STD-1558では2.5g)の運動に耐えうる構造強度とした。

(2) ベース

上述の動揺台に対し、床面(基礎)に固定され下

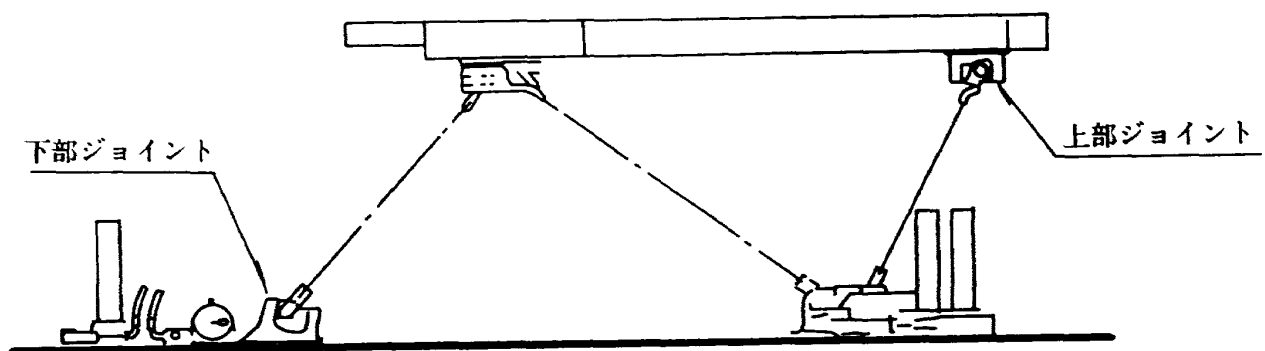
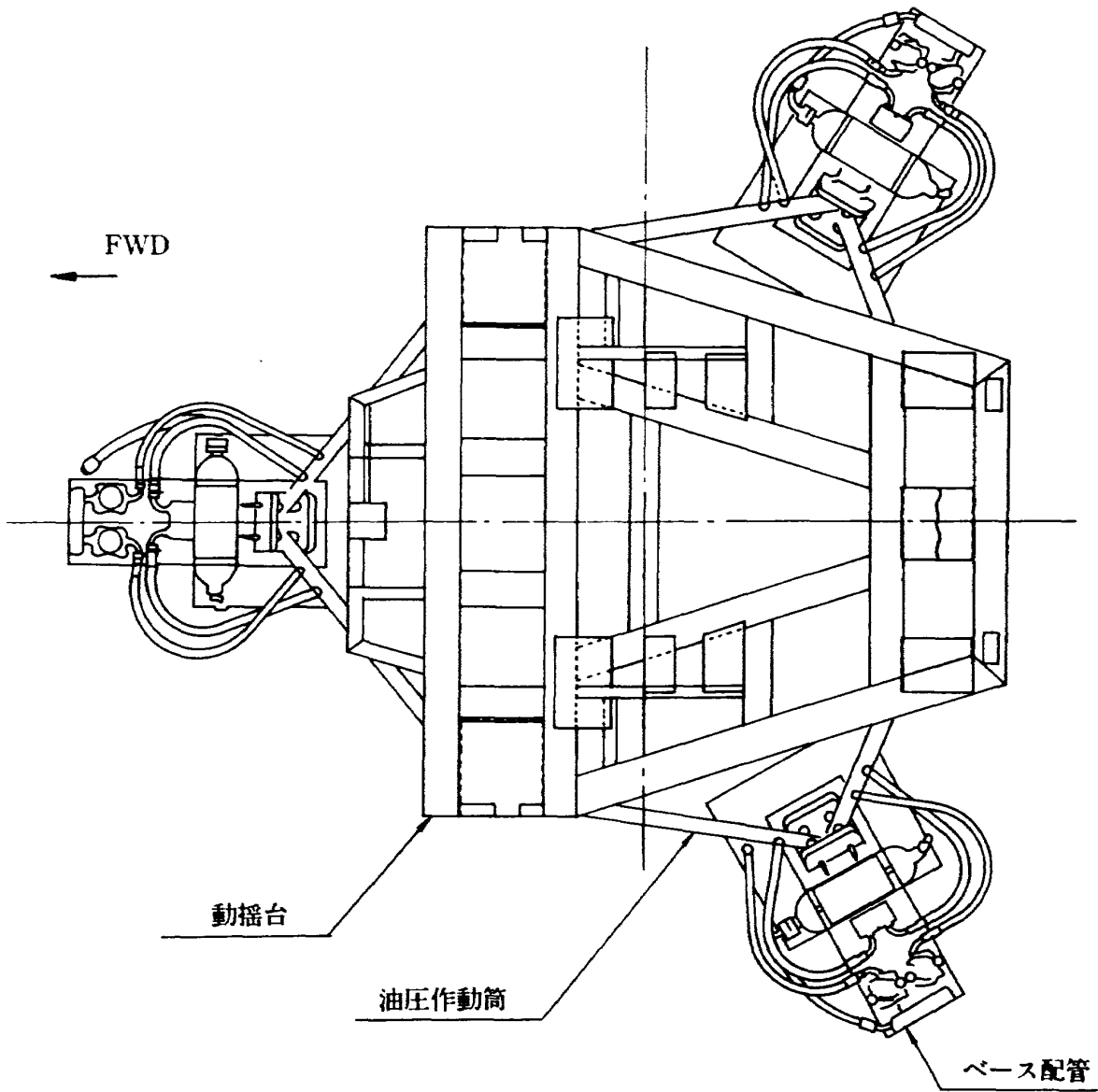


図6 動揺台, 上下ジョイント, ベース外観図

部ジョイントにより油圧作動筒をサポートする。ベース基礎の強度は引張り力76,440N(7,800kgf)、圧縮力(271,460N(27,700kgf)、剪断力は外側に対し211,680N(21,600kgf)、内側に対し82,320N(8,400kgf)である。

(3) ジョイント

6本の油圧作動筒を上部3個、下部3個のジョイントでサポートしている。上部ジョイントは動揺台に、下部ジョイントはベースに固定されている。3個のジョイントは正三角形を形成しその一辺は2.54mである。動揺台、上下ジョイント、ベースの外観を図6に示す。

3.2 モーション制御用電気架

モーション模擬装置本体をモーション模擬信号発生部(後述)からの信号により駆動し、制御する。また、メンテナンス・モード時にはモーション制御用電気架上での手動操作によりモーション模擬装置本体の制御が可能である。モーション制御用電気架(以下電気架という)の外観写真を図7に、制御パネル外観を図8に示す。

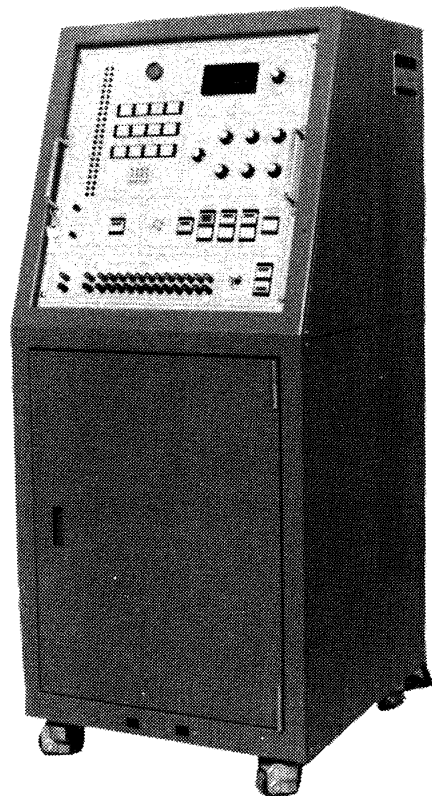


図7 モーション制御用電気架外観図

3.2.1 制御パネルの機能

電気架の機能はメンテナンス・モード等一部を除いてはモーション模擬信号発生装置の専用プログラムの実行の下で発揮される。以下に各制御/表示パネルのスイッチ、ランプ類の機能を表7に示す。

3.3 油圧源装置

油圧源装置はモーション模擬装置本体および後述する昇降階段へ必要な高圧油を供給するモーション用ポンプと操舵反力模擬負荷装置用ポンプおよび循環用ポンプ等から構成される。油圧源装置の外観写真を図9に示す。

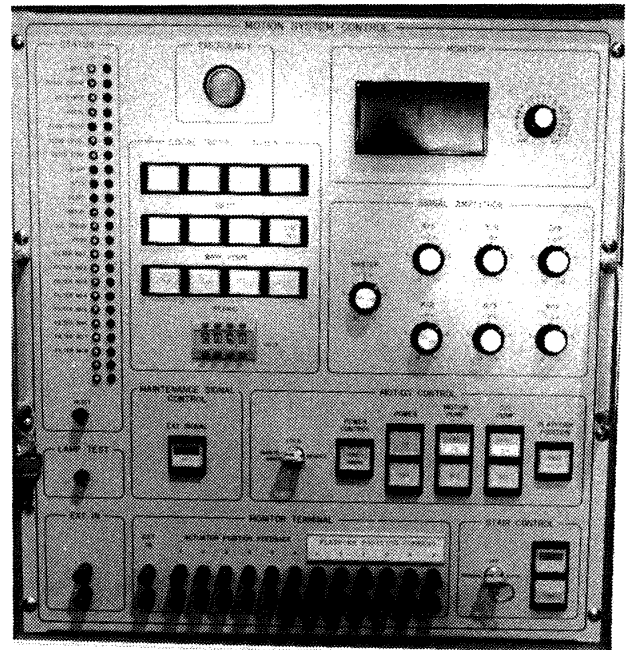


図8 制御架パネル外観図

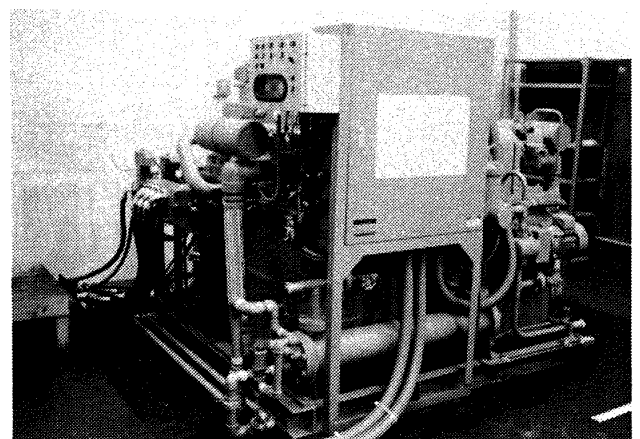


図9 油圧源装置外観図

表7 モーション制御パネルの機能

パネル名	スイッチ名	機能
MOTION CONTROL	POWER MOTION PUMP C/L PUMP POWER CONTROL PLATFORM POSITION	電気架の電源、油圧源の起動、動揺台の可動、制御モードの切り換え等の機能を持っている。 電気架の電源の オン - オフ モーション駆動装置用油圧源の電源の オン - オフ と油圧READYランプの表示 操舵反力模擬負荷装置用油圧源の電源の オン - オフ と油圧READYランプの表示 油圧源装置の電源制御権を示す表示ランプ REMOTE --- 電気架側 LOCAL --- 油圧源装置側 動揺台 (PLATFORM) の可動、停止の制御スイッチおよびランプ ELECT --- モーション オン SETTLE --- モーション オフ
モード切換キー	REMOTE LOCAL MAINTENANCE	モーション駆動モードの切り換えを行う。 飛行運動計算機を含む計算機システムからの駆動信号により駆動 モーション模擬信号発生部からの駆動信号により駆動 主として保守時に電気架単独で駆動
STAIR CONTROL キー	AUTO OFF MANUAL	モーション オン (ELECT) により自動的に可動 不可動 保守時等はね上げ橋単独で可動

表7 続き

パネル名	スイッチ名	機能
STATUS	RESET	モーション模擬装置全体に関する状態表示パネルで、システムが正常状態の場合にはGOランプが点灯、異常発生と共にNGランプが点灯しモーション駆動装置は停止する。状態表示の種類は21種類ある。 異常状態が回復した後このスイッチを押すことによりNG表示がリセットされ、モーションは可動状態に戻る。
MONITOR	X ~ ψ I ~ 6 X/1 ~ Y/6 EXT	動揺台可動軸 X、Y、Z、φ、θ、ψ への入力信号、6本の各作動筒への入力信号、外部入力信号の入力値のモニタができる。モニタには入力切り換え用の選択スイッチとデジタル電圧計を用意しており、電圧計の表示範囲は±19.99Vである。 動揺台入力モニタ 作動筒入力モニタ マニピュール入力信号のモニタ 外部入力信号のモニタ
MONITOR TERMINAL		作動筒の位置フィードバック信号、動揺台位置入力信号、モニタ電圧計用外部入力端子が設けてある。作動筒位置フィードバック信号は電気架の配線により固定されているが、動揺台位置入力信号については、模擬信号発生装置のプログラム（後述）により変更可能である。
EXT IN		ローカル・モード、保守モードの際に外部からの駆動信号により駆動することができる。その外部駆動信号の入力端子である。

表7 続き




パネル名	スイッチ名	機能
LOCAL SIGNAL CONTROL	<p>AUTO</p> <p>LOCAL SIGNAL START</p> <p>LOCAL SIGNAL STOP INPUT</p> <p>WAVE FORM</p>	<p>飛行運動計算機との結合を切り離し、モーション模擬装置単独による実験あるいは点検、整備等を行うための制御機能であり、ローカルモード時における駆動信号の選択と駆動の開始、停止を行う。</p> <p>予めプログラムされた駆動モードに従い、自動的にモーション駆動を行う。現設計では例えばば動揺台駆動ではX、Y、Z、φ、θ、ψの順に、作動筒伸縮についてはNo.1からNo.6の順に5周期づつ繰り返した後、元へ戻るプログラムを用意している。</p> <p>このスイッチをオンにすることにより予め用意されたプログラムが実行され、モーション駆動を開始する。</p> <p>モーション駆動を停止する。</p> <p>入力信号の印加と方式の選択</p> <p>PLATF ACCEL --- 駆動信号を加速度信号として印加</p> <p>PLATF POSI --- 駆動信号をポジション信号として印加</p> <p>SPECIAL WAVE --- 予めプログラムで用意した特殊な駆動信号を印加</p> <p> --- 正弦波</p> <p> --- 三角波</p> <p> --- 矩形波</p> <p>EXT --- 外部入力信号</p>

表7 続き

パネル名	スイッチ名	機能
SIGNAL AMPLITUDE	PERIOD	<p>前述 (EXT を除く) 波形の周期を設定するデジタル・スイッチで、設定時間は0.0 から999.9秒である。</p> <p>駆動信号の振幅を可変する可変抵抗器で主(MASTER) 可変抵抗器と各駆動軸あるいは作動筒に対応する個別の可変抵抗器に分かれている。振幅は主可変抵抗器と個々の掛け算できめられる。例えば主可変抵抗器が+5でX軸が+5ならば振幅は+25%となる。</p>
LAMP TEST		<p>表示ランプのランプ切れを確認するためのスイッチで、ランプ切れの無い場合はこのスイッチを押すことにより全てのランプが点灯する。</p>
EMERGENCY STOP		<p>モーション駆動を緊急停止するスイッチで、油圧源装置、模擬操縦席装置に設けている緊急停止(EMERGENCY STOP)スイッチと同機能である。</p>

3.3.1 油圧源装置の構成

以下に各構成品の機能, 性能を記す。

(1) モーション用ポンプ

モーション模擬装置本体および昇降階段の駆動用高圧油発生ポンプである。ポンプ形式は可変吐出圧力補償型ベーンポンプであり, 吐出圧力は $823 \times 10,000 \text{ N/m}^2$ (84 kgf/cm^2), 吐出流量は $0.0067 \text{ m}^3/\text{sec}$ ($0.2 \text{ m}^3/\text{min} \times 2$) である。また使用作動油はMIL-H-5606 を標準としている。

(2) 操舵反力模擬負荷装置用ポンプ

既設模擬操縦席の操舵反力模擬負荷装置用油圧ポンプである。吐出圧力は $686 \times 10,000 \text{ N/m}^2$ (70 kgf/cm^2), 吐出流量は $0.00067 \text{ m}^3/\text{sec}$ である。

(3) 循環用ポンプ

作動油冷却用循環およびろ過用ポンプである。ポンプ形式はギヤ型ポンプであり, 吐出圧力 $78.4 \times 10,000 \text{ N/m}^2$ (8 kgf/cm^2), 吐出流量 $0.00125 \text{ m}^3/\text{sec}$ である。

(4) オイルクーラ

油温冷却用クーラで, 循環水とで熱交換を行う。

冷却能力は $20,000 \text{ kcal/hr}$ である。

(5) 油溜め

容量 1.39 m^3 である。実作動油 1 m^3 , 配管内 1 m^3 の油があり, 全体として約 2 m^3 の作動油を使用している。

(6) アキュムレータ

モーションポンプ用として内容積 0.038 m^3 , 窒素予圧 $343 \times 10,000 \text{ N/m}^2$ (35 kgf/cm^2), 操舵反力用として内容積 0.01 m^3 , 窒素予圧 $294 \times 10,000 \text{ N/m}^2$ (30 kgf/cm^2) のアキュムレータを設けている。

(7) 冷却塔

オイルクーラにより熱交換された温水の放熱を行うとともに, 循環ポンプにより放熱後の水を油圧源装置に戻して冷却水として再利用する。

3.3.2 油圧源装置制御パネル

油圧源制御パネルの表面図を図10に示す。制御パネルには以下のスイッチ, セレクタ, 計器等が設けられている。

(1) リモート/ローカルのモード切換スイッチ

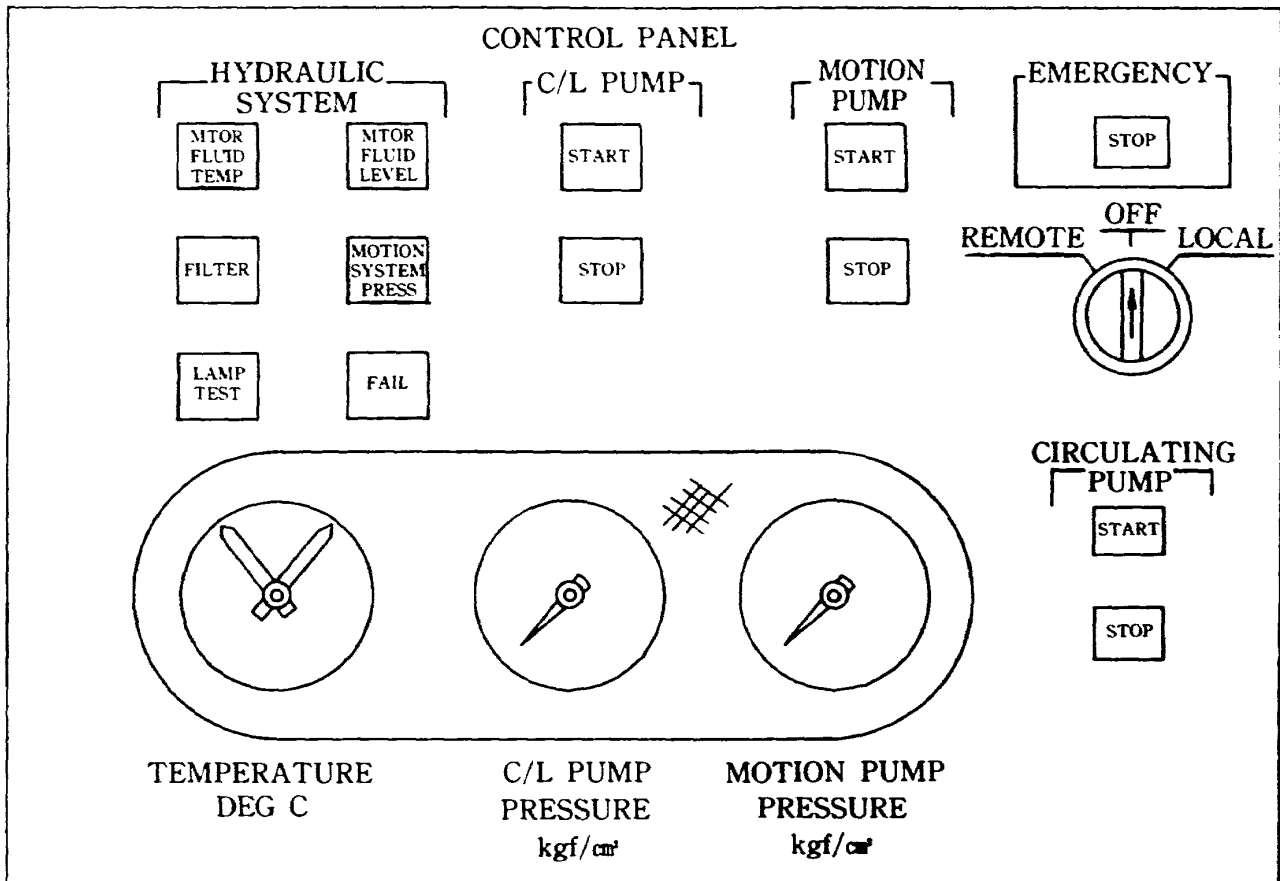


図10 油圧源装置制御パネル表面図

通常はリモート側（モーション電気架側）で使用する。油圧源単独での使用の際はローカル側とする。

(2) 各ポンプ・スタートスイッチ

各ポンプの起動-停止スイッチでこのスイッチはローカル側でのみ有効である。

(3) 異常表示灯

油圧源単独の異常表示とモーションシステムが準備未完状態の「F A I L」表示がある。また、ランプテスト・スイッチも設けている。

(4) 緊急停止スイッチ

リモート / ローカルに係わりなくこのスイッチを押すことにより油圧源は緊急停止する。このスイッチは先にも述べたようにモーション電気架および模擬操縦席内の緊急停止スイッチと同機能である。

3.4 昇降階段

模擬操縦席への乗降用にはね上げ式の昇降階段を設けた。昇降階段の外観を図11に示す。以下に構成および機能について記す。

(1) 壁面固定階段

模擬操縦席室床面から模擬操縦席迄の高さは約3mあり、この高さまで壁面に固定された階段により昇降する。

(2) はね上げ橋

壁面固定階段と模擬操縦席とを結ぶ橋で、モーションオン時にはね上がり、オフ時に降下する。

(3) 油圧作動筒

はね上がり橋用の油圧作動筒を設け伸展ではね上

がり、収縮で降下する。はね上がりに所要する時間は8~20秒の間で調節可能であり、降下については油圧系統故障時にはね上がり橋の自重で降下する機構としている。油圧源正常時の降下速度は最少で8秒以内である。

(4) 荷重スイッチ

壁面固定階段最上部およびはね上げ橋の上部に、人または測定器等が乗った状態ではね上げ橋を駆動することは甚だ危険である。そこで壁面固定階段最上部およびはね上げ橋の上部に $980 \times 100 \text{ N} / \text{m}^2$ ($10 \text{ kgf} / 100 \text{ cm}^2$) の荷重が加わると荷重を検知するスイッチを設けている。モーションが不可動状態ではモーションオンにできず、モーション駆動中（オン状態）では緊急停止する。

4. モーション模擬装置の性能

ジンバル機構を採用したモーション駆動装置の可動範囲、位置精度、他の軸への干渉等の計測は比較的容易であるが、共動型モーション駆動装置は各可動軸がジンバル機構のように独立でないため甚だ困難である。そこで各作動筒のポジション・フィードバック信号を用いて姿勢、位置を逆算（逆変換プログラム）することにより間接的に測定する方法を採用した。

この逆変換プログラムはNewton-Raphson法を用いて作動筒位置から各軸の運動位置を逆算するEdiedonne等の手法（文献7）を用いて作成した。まずこのプログラムの逆変換精度を予め実測値と比較して、変換精度が十分仕様（フルスケールの1%以下）の誤差内に入ることを確認し以降の測定を実施した。

4.1 性能検査に使用した測定器具等

本装置の性能検査に使用した測定器具の使用目的、規格、型番、精度等を表8に示す。また測定器具類の取付け位置関係を図12に示す。

4.2 ペイロード測定

本装置のペイロードは仕様で $78,400 \text{ N}$ ($8,000 \text{ kgf}$) 以上と規定している。つまり本仕様以上のペイロードで後に記述する諸特性の仕様を満足せねばな



図11 昇降階段外観図

表8 使用測定器具一覧表

No	機器名	メーカー、型番	規格
1	関数発生器	YHP、 3311A	出力波形 : 三角波、矩形波、正弦波 周波数レンジ : 0.1Hz~1MHz 出力電圧 : 10VPP(600Ω)
2	ペン書オシログ ラフ	グラフテック、 WTR-331-8L	チャンネル数 : 8チャンネル 測定レンジ : 10mV/cm~100V/cm
3	周波数応答解析 器	Solartron、 1172	解析対象 : 利得、位相 (デジタル値) 解析レンジ : 0.0001Hz~9.999KHz 出力電圧 : 9.99V 出力波形 : 三角波、矩形波、正弦波
4	加速度計	SCHAEVITZ、 LSBC-0.25G	測定レンジ : 0.25G 感度 : 20V/G
5	加速度計	MPC、 C007-0000	測定レンジ : 0.5G 感度 : 2V/G
6	加速度計	共和電業 AS-2GB	測定レンジ : 2G 感度 : 2.5V/G
7	クリノメータ	HILGERWATTS、 TB-108	測定レンジ : ±180° 最小目盛 : 1°
8	ストップ・ウォ ッチ	SEIKO、 7J-885060	積算時間 : 15分 最小目盛 : 0.1秒
9	その他 ・鋼尺 ・巻尺 ・錘	YAMATO、2m、1m 田島製作所	測定長 : 2m、1m クラス : JIS1級 最小目盛 : 1mm 測定長 : 5m

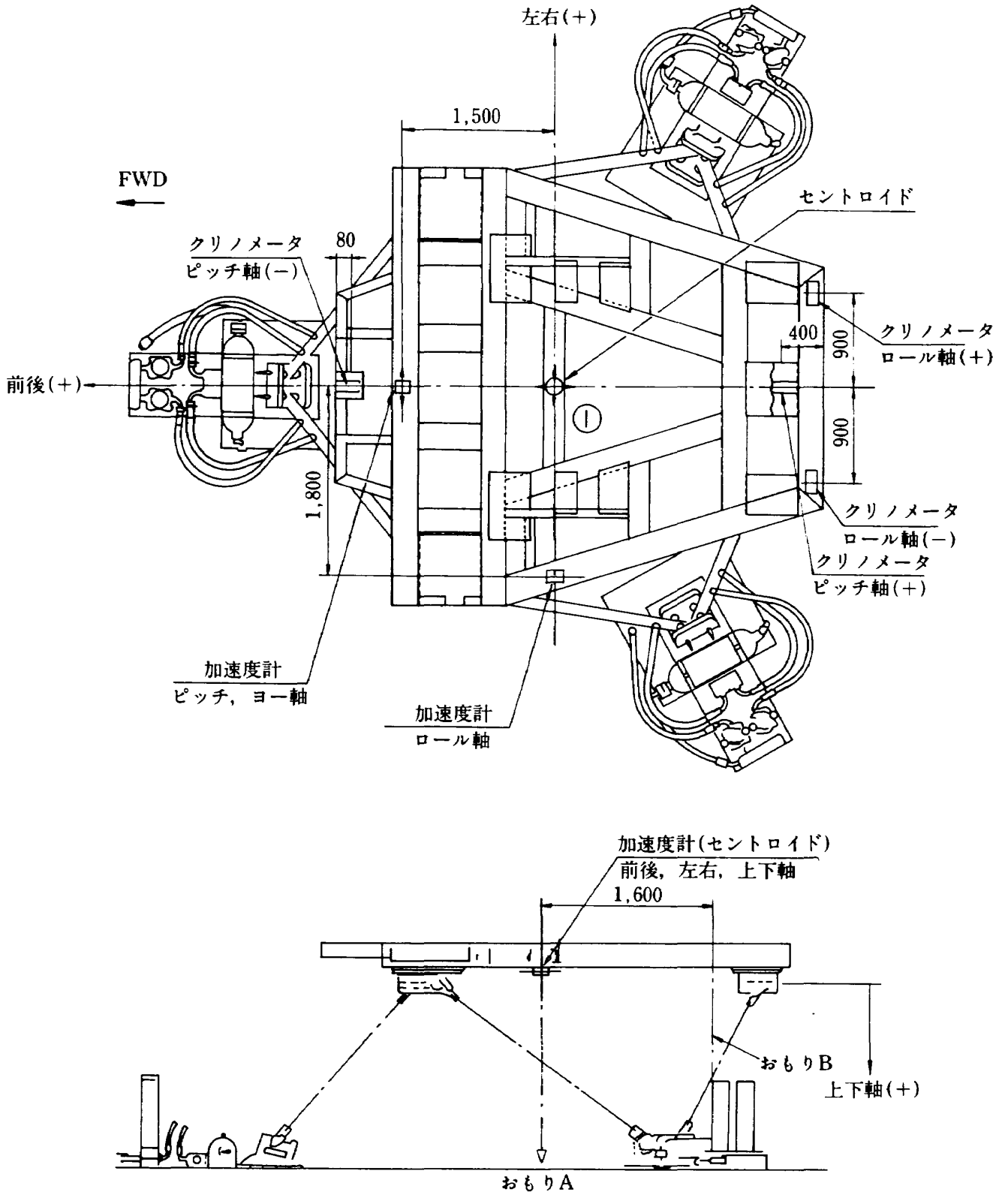


図12 錘, 加速度計取付け位置およびクリノメータ測定位置

表9 逆変換プログラムの精度

前			後			軸			左			右			軸			上			下			軸					
実測値	逆変換値	誤差	実測値	逆変換値	誤差	実測値	逆変換値	誤差	実測値	逆変換値	誤差	実測値	逆変換値	誤差	実測値	逆変換値	誤差	実測値	逆変換値	誤差	実測値	逆変換値	誤差	実測値	逆変換値	誤差			
538 mm	538 mm	0.0 %	538 mm	538 mm	0.0 %	563 mm	562 mm	0.18 %	563 mm	562 mm	0.18 %	352 mm	351 mm	0.20 %	812	811	0.12	352 mm	351 mm	0.20 %	812	811	0.12	-483	-484	0.21	-483	-484	0.21
1069.9	1071.0	0.10	1069.9	1071.0	0.10	1163.0	1162.0	0.09	1163.0	1162.0	0.09	-547	-548	0.18	-547	-548	0.18	-986	-988	0.20	-986	-988	0.20	-986	-988	0.20	-986	-988	0.20
-537	-538	0.19	-537	-538	0.19	-547	-548	0.18	-547	-548	0.18	-986	-988	0.20	-986	-988	0.20	-986	-988	0.20	-986	-988	0.20	-986	-988	0.20	-986	-988	0.20
-1076	-1075	0.09	-1076	-1075	0.09	-1159	-1160	0.09	-1159	-1160	0.09	-1159	-1160	0.09	-1159	-1160	0.09	-1159	-1160	0.09	-1159	-1160	0.09	-1159	-1160	0.09	-1159	-1160	0.09
ロ			ル			軸			ピ			ツ			軸			ヨ			一			軸					
実測値	逆変換値	誤差	実測値	逆変換値	誤差	実測値	逆変換値	誤差	実測値	逆変換値	誤差	実測値	逆変換値	誤差	実測値	逆変換値	誤差	実測値	逆変換値	誤差	実測値	逆変換値	誤差	実測値	逆変換値	誤差	実測値	逆変換値	誤差
11.0 mm	11.0 mm	0.0 %	11.0 mm	11.0 mm	0.0 %	10.8 mm	10.6 mm	1.85 %	10.8 mm	10.6 mm	1.85 %	13.3 mm	13.3 mm	0.0 %	13.3 mm	13.3 mm	0.0 %	13.3 mm	13.3 mm	0.0 %	13.3 mm	13.3 mm	0.0 %	29.7	29.6	0.34	29.7	29.6	0.34
22.6	22.6	0.0	22.6	22.6	0.0	21.0	21.0	0	21.0	21.0	0	29.7	29.6	0.34	29.7	29.6	0.34	29.7	29.6	0.34	29.7	29.6	0.34	-13.1	-13.2	0.76	-13.1	-13.2	0.76
-11.1	-11.1	0.0	-11.1	-11.1	0.0	14.6	14.4	1.37	14.6	14.4	1.37	-13.1	-13.2	0.76	-13.1	-13.2	0.76	-13.1	-13.2	0.76	-13.1	-13.2	0.76	-29.9	-29.8	0.33	-29.9	-29.8	0.33
-22.87	-22.82	0.22	-22.87	-22.82	0.22	29.4	29.4	0	29.4	29.4	0	-29.9	-29.8	0.33	-29.9	-29.8	0.33	-29.9	-29.8	0.33	-29.9	-29.8	0.33	-29.9	-29.8	0.33	-29.9	-29.8	0.33

らない。本装置では各作動筒に取付けられている圧力センサの出力による計測値を採用した。計測結果は 84,084N(8,580kgf) である。

4.3 逆変換プログラム

先にも述べたように本システムの位置、姿勢の実測は基だ手数がかかり、各作動筒の位置情報から位置、姿勢を逆算する「逆変換プログラム」により測定することにした。

測定に先立って逆変換プログラムの変換精度の確認を行った。

本設備の製作仕様で規定した静的精度はフルスケールの 1% 以下であり、この精度を十分カバーするだけの変換精度を有する必要がある。逆変換精度の結果を表 9 に示す。表中の誤差平均とは同じ測底点を 4 回計測した場合の平均を示し、上下、前後、左右軸においてはフルスケールで 0.13%，ピッチ、ロール、ヨー軸では 0.37% であり測定精度を十分備えていると判断した。よって以後のデータは逆変換による測定値を採用し、実測可能な場合には実測値も合せて計測した。実測値には添字で R (Real) 逆変換値には I (Invert) を明記した。なお実測におけるスケール、クリノメータ等の位置関係は図 12 に示した通りである。

4.4 最大可動範囲、最大速度、最大加速度

各軸独立に駆動した場合の可動範囲、速度、加速度の最大値を表 10、11 および 12 にそれぞれ示す。

4.5 周波数応答

周波数応答については MIL 規格 (文献 4) が現在最も一般的であるが、搭載荷重、入力振幅等が不明確であるので、本装置の仕様として以下の条件を規定した。

- ・荷重は 49,000N(5,000kgf) 以上 (実際には 8,500kgf の総荷重となる) であること。

- ・振幅は周波数 0.5 Hz まではフルストロークの 10%，0.5 Hz を越えて 5 Hz まではフルストロークの 1% とする。

周波数応答の計測にあたっては各可動軸に主として関与する作動筒、例えば左右軸の場合には No. 1 作

表10 最大可動範囲

可動軸	規格 (仕様)	計測値
上下	-960mm +800mm	-969mm +805mm
左右	±1,120mm	-1,129mm +1,130mm
前後	±1,065mm	+1,065mm -1,075mm
ピッチ 上下	-21deg +29deg	-21.1deg +29.4deg
ロール 左右	±22deg	-22.8deg +22.5deg
ヨー 左右	±28deg	-29.1deg +29.4deg

表11 最大速度

可動軸	規格 (仕様)	計測値 (R)
上下	+750mm/sec -640mm/sec	+800mm/sec -719mm/sec
左右	±890mm/sec	+952mm/sec -915mm/sec
前後	+885mm/sec -760mm/sec	+920mm/sec -790mm/sec
ピッチ 上下	±20deg/sec	+20deg/sec -20deg/sec
ロール 左右	±22deg/sec	+22.6deg/sec -24deg/sec
ヨー 左右	±24.5deg/sec	+25deg/sec -25deg/sec

表12 最大加速度

可動軸	規格 (仕様)	計測値 (R)
上下	±9.8m/sec ²	+14.7m/sec ² -11.8m/sec ²
左右	±9.8m/sec ²	+9.8m/sec ² -10.8m/sec ²
前後	±9.8m/sec ²	+11m/sec ² -10.8m/sec ²
ピッチ 上下	±105deg/sec ²	+455deg/sec ² -350deg/sec ²
ロール 左右	±215deg/sec ²	+307deg/sec ² -307deg/sec ²
ヨー 左右	±325deg/sec ²	+486deg/sec ² -486deg/sec ²

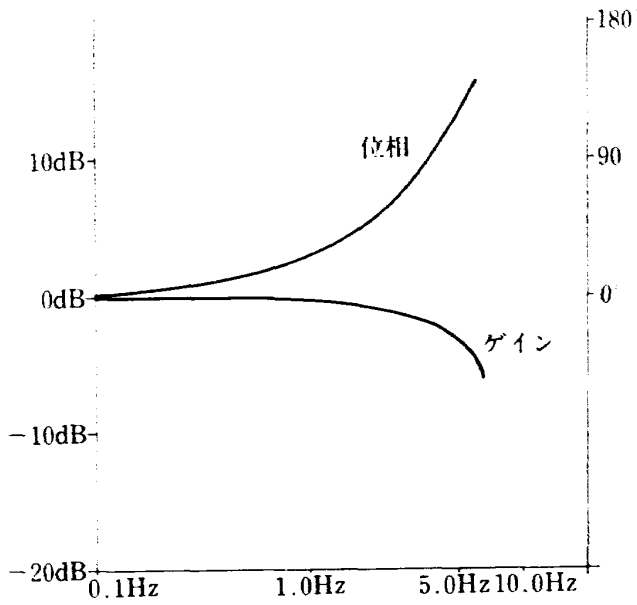


図13-1 周波数応答 上下軸 (LEG 4)

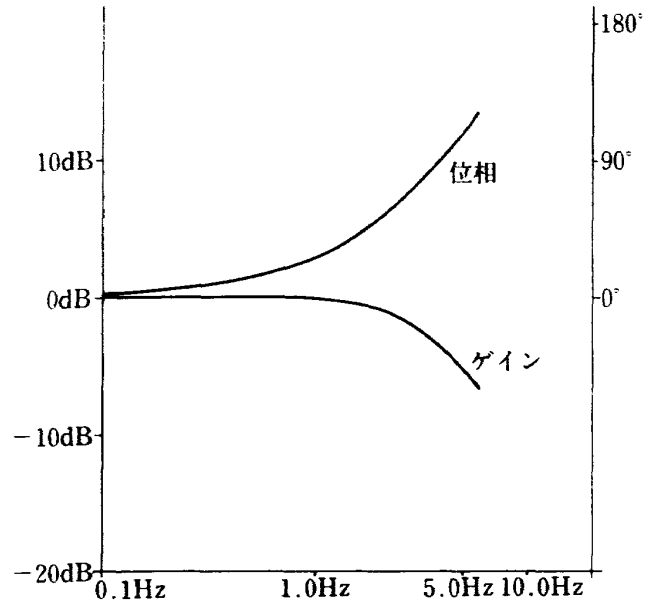


図13-4 周波数応答 ピッチ軸 (LEG 2)

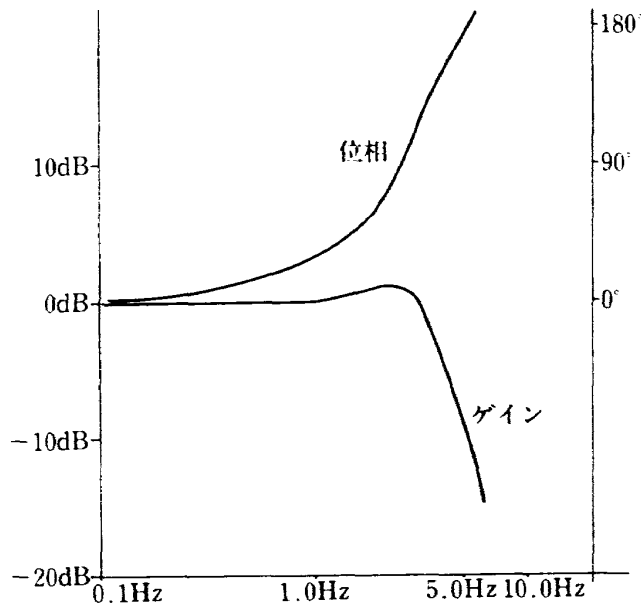


図13-2 周波数応答 左右軸 (LEG 1)

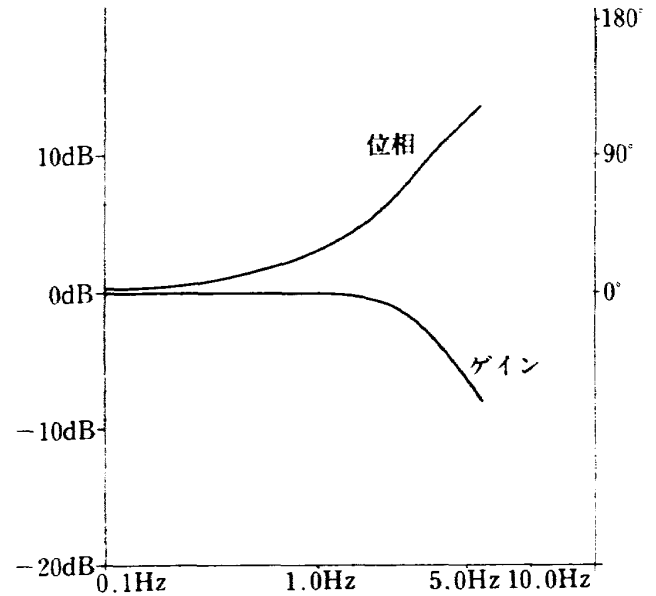


図13-5 周波数応答 ロール軸 (LEG 6)

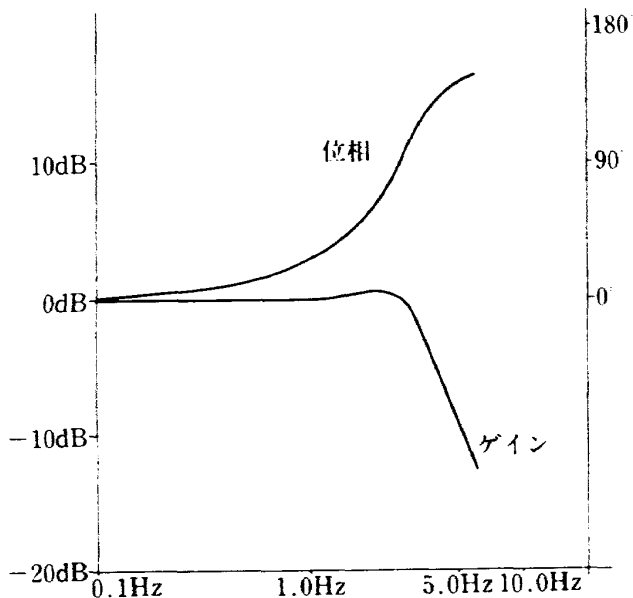


図13-3 周波数応答 前後軸 (LEG 3)

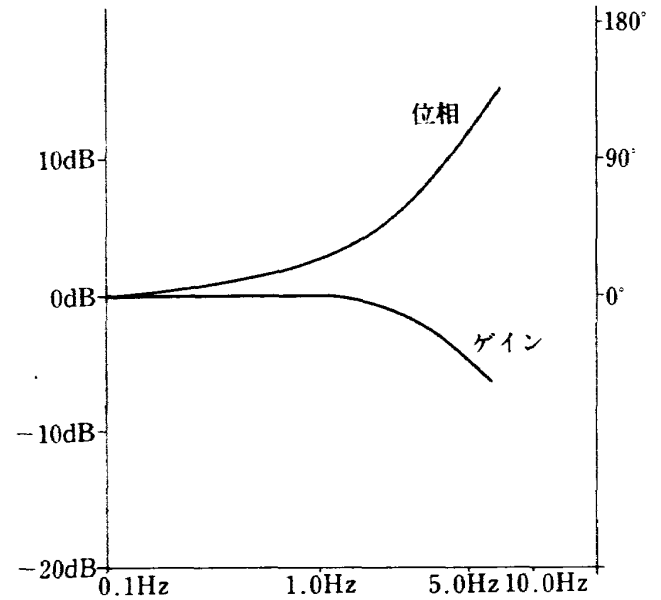


図13-6 周波数応答 ヨー軸 (LEG 5)

表13 周波数応答

(AXIS : Z Axis)

規格・項目 LEG	0.5 Hz		1.0 Hz		1.7 Hz		5.0 Hz	
	減衰比	位相遅れ	減衰比	位相遅れ	減衰比	位相遅れ	減衰比	位相遅れ
規格	± 2 dB	15° 以下	± 4 dB	40° 以下	± 8 dB	90° 以下	体感として 感知出来る こと	——
LEG 1	0	14.6	-0.3	27	-0.8	44.3	-4.7	116
LEG 2	0	14.4	-0.1	26	-0.5	44.2	-4.3	120
LEG 3	0	14.7	-0.3	27.6	-0.9	45.4	-5.0	115.7
LEG 4	0	14.5	-0.2	25.6	-0.7	43.0	-4.3	118.4
LEG 5	0	14.2	-0.1	25.5	-0.6	42.3	-4.1	117.3
LEG 6	0	14.7	-0.2	26.8	-0.7	45.1	-4.6	119.8
平均	0	14.52	-0.2	26.42	-0.68	44.1	-4.5	117.9

表14 静的精度

可動軸	仕様		測定結果	
	最大ストローク	許容値	測定値	誤差
上下	950 ^{mm}	9.6 ^{mm}	1.0 ^{mm}	0.1 %
左右	1.120 ^{mm}	11.2 ^{mm}	9.4 ^{mm}	0.83 %
前後	1.065 ^{mm}	10.6 ^{mm}	7.3 ^{mm}	0.69 %
ピッチ	29 ^{deg}	0.29 ^{deg}	0.2 ^{deg}	0.69 %
ロール	22 ^{deg}	0.22 ^{deg}	0.1 ^{deg}	0.45 %
ヨー	28 ^{deg}	0.28 ^{deg}	0.1 ^{deg}	0.36 %

動筒、前後軸の場合にはNo.3作動筒、ピッチ軸の場合にはNo.2作動筒の入出力信号をサーボアナライザに入力し解析した。図13-1～6に各軸の周波数特性を示す。また、Z軸（全作動筒の伸縮）について周波数とゲイン、位相遅れの仕様と測定結果を表13に示す。計測結果はいずれも仕様を満足している。

4.6 静的精度

静的精度の仕様はMILスペックに準拠し、フルスケールの1%以下と規定した。静的精度の測定は逆変換プログラムによる方法で行った。表14に静的精度の結果を示す。測定結果は各可動軸ともいずれも仕様を満足している。

4.7 その他の性能

(1) スムーズネス

フリクション、アクチュエータ間の干渉等により発生する振動（加速度）の大きさをスムーズネスと云

う。

スムーズネスの基準はMILスペックに準拠し、フルストロークの10%、周波数0.5Hzの正弦波入力に対し $\pm 0.392\text{m/sec}^2$ （ $\pm 0.04\text{g}$ ）以内とした。図14にスムーズネスの結果を示す。いずれも仕様を満足している。

(2) クロストーク

非可動軸への干渉についてもMILスペックに準拠し、特定軸への入力振幅に対し他の軸への干渉が $\pm 2\%$ 以下と規定した。測定は全可動軸の出力をペン書きレコーダに記録し計測した。結果は $\pm 0.02\%$ 以下であった。

(3) ダンピング

ダンピングについてもMILスペックに準拠し、フルストロークの5%、周波数0.2Hzの矩形波入力でもオーバーシュートのないこととされており、オーバーシュートの無いことを確認した。図15にダンピングの記録例を示す。

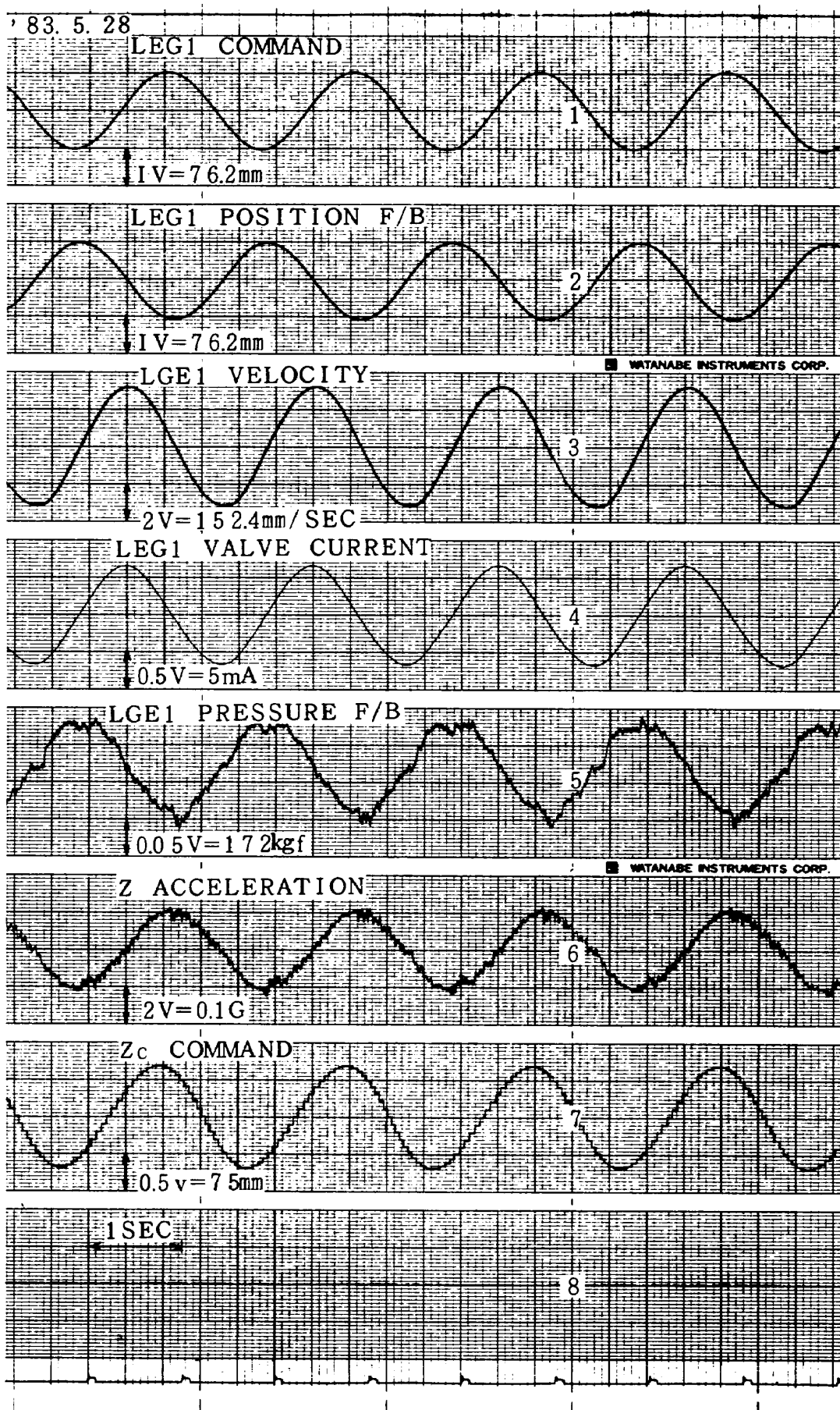
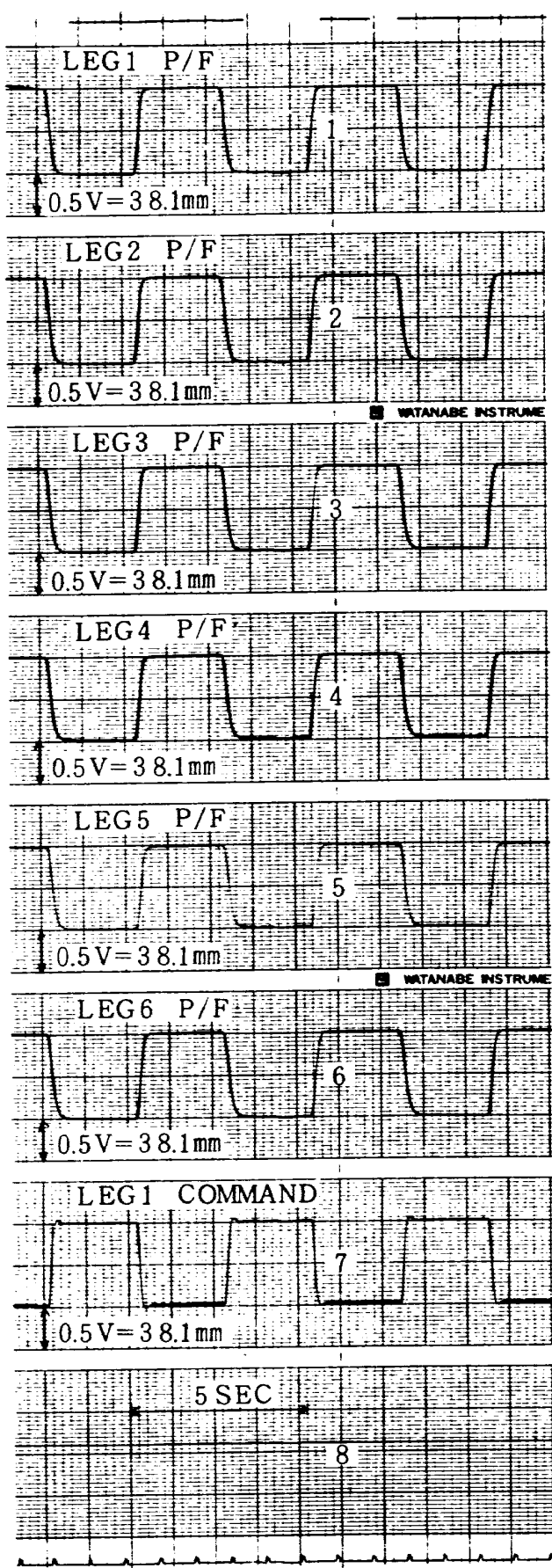
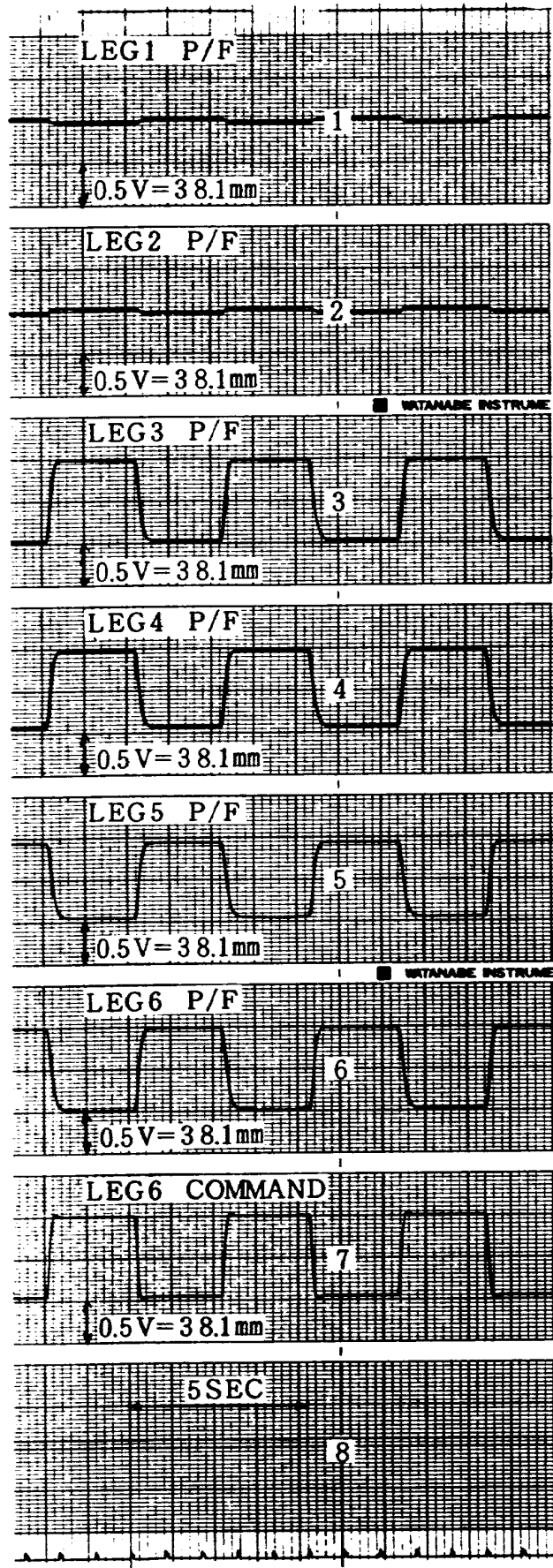


図14 スムーズネス特性の記録例(上下軸 $f: 0.5\text{Hz}$)



上下軸



ロール軸

図15 ダンピング特性の記録例(上下軸, ロール軸)

5. モーション模擬信号発生部

モーション模擬信号発生部は飛行運動計算機からの各種信号を受けてモーション駆動信号およびそれに伴って必要な各作動筒駆動入力信号を計算し発生する。本発生部は日本データゼネラル社製 ECLIPSE S/140 (以下S/140と略記する) 計算機システムを主として構成される。図16に外観写真を示す。以下に本計算機および関連する装置の性能とモーション駆動に関連するソフトウェアについて記す。

5.1 ハードウェアの構成と機能

(1) S/140 計算機

飛行運動計算機から表15に示す信号を受けてモーション駆動信号を計算し、さらに対応する作動筒の伸長を計算して電気架に出力する(リモート・モード)と、本計算機単独に電気架からの入力を受けてモーション駆動信号を発生する(ローカル・モード)とがある。以降の説明を容易にするため図17に本計

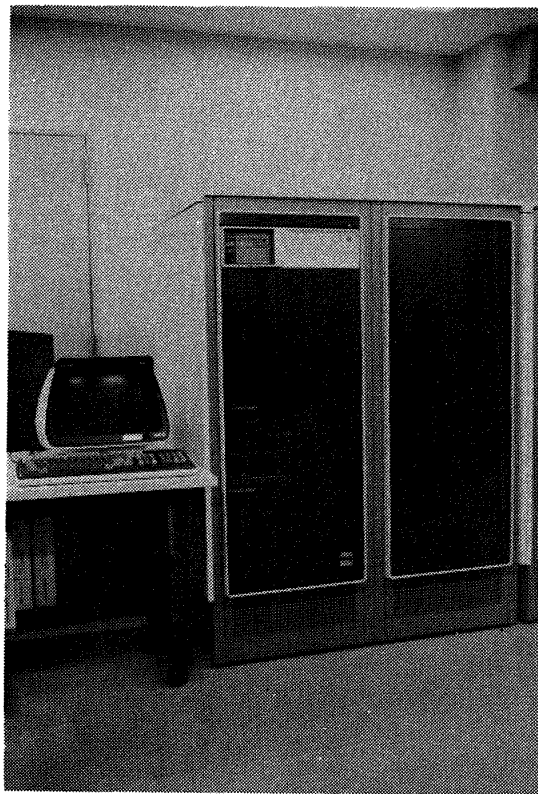


図16 モーション専用計算機(処理部)
S/140システム

算機における計算フローチャートを示す。

(2) ターミナル・コンソール

日本データゼネラル社製D-200型ディスプレイ・ターミナルを使用し、計算機起動、停止、プログラムの制御、開発等を行う。

(3) リンケージ部

各作動筒へのアナログ出力、モニタ用ペンレコーダ出力、ポジション入力、インタ・ロック関係のディスクリット入力、ランプ等のディスクリット出力のリンケージ部(N/DAC)を設けた。N/DACの性能を表16に示す。

5.2 ソフトウェア

ここではモーション駆動装置を駆動するソフトウェア全体を実時間処理プログラムと云うこととする。

以下に実時間処理プログラムの概略を記す。(詳細については文献2および文献3を参考にされたい)。

実時間処理プログラムの構成を図18に、機能ブロック図を図19に示す。以下に各構成ソフトウェアについて記す。

(1) 初期化プログラム

実時間処理プログラムの以下の初期化を行う。

(a) システム・パラメータ(RTC, MIT, タスクレベル)などの初期化

(b) MIT/BMCの起動を行う。この起動はモーション電気架のMAINTENANCE-LOCAL-REMOTEのスイッチの位置により異なる。

- REMOTEモード時：MITの遅れ時間をセットし、割り込み可能とする。割り込みが発生したら実時間タスク制御プログラムを起動する。続いてBMCを起動し飛行運動計算機とS/140計算機間のデータ転送を可能にする。

- REMOTEモード以外：RTCを制御し10m sec毎に割り込みが発生しうるようにし、割り込みが発生したならば実時間制御プログラムを起動する。飛行運動計算機とS/140計算機間のBMCデータ転送ラインの起動は行わない。

- ターミナル制御プログラムを起動する。

- N/DAC制御プログラムをDCU/200(リンケージ・コントローラ)にロードし起動する。

表 15 飛行運動計算機 --- モーション模擬信号発生部 転送信号一欄表

変数	記号	単位	タイプ	備考
IMSO (10)				
1 モーションエンゲージフラッグ (ユーザ用)	I U E N G	—	1 * 2	= 1 エンゲージ = 0 ディスエンゲージ
2 接 地	G R N D	—	1 * 2	接地 = 1 / 空中 = 0
3 モーションソフト切換フラッグ	I T S T N M	—	1 * 2	= 1 は, Rotational que に P D, Q D, R D を用いる。 = 0 は, Rotational que に P, Q, R を用いる。
4 " "	L V T S T M	—	1 * 2	= 1 は, モードの切換 (T E S T 用) = 0 (ユーザは 0 をセット)
5 ~ 10 予 備	—	-	1 * 2	
FMSO (40)				
1 重 心 並進加速度	A X	m / s ²	F	重力成分を含む
2 " "	A Y	"	"	
3 " "	A Z	"	"	
4 重 心 角加速度	P D	rad / s ²	F	
5 " "	Q D	"	"	
6 " "	R D	"	"	
7 重 心 角速度	P	rad / s	F	
8 " "	Q	"	"	
9 " "	R	"	"	
10 重 心 姿 勢	P H I	rad	F	
11 " "	T H E T A	"	"	
12 " "	P S I	"	"	
13 対地速度	V G P N D	m / sec	F	
14 高 度	H	m	F	
15 スラスト 1	F N (1)	kg	F	ブレーキをかけた状態でのエンジン推力の影響を模擬するため
16 " 2	F N (2)	"	F	
17 " 3	F N (3)	"	F	
18 " 4	F N (4)	"	F	
19 スラスト位置	Z F N	m	F	重心からスラスト発生位置 (Z 方向のみ)

表 15 続き

変数	記号	単位	タイプ	備考
20 ガスト	UGUST	m/s	F	加速度成分に入っている分の模擬が不足している時に用いる
21 "	VGUST	"	"	
22 "	WGUST	"	"	
23 "	PGUST	"	"	
24 "	QGUST	"	"	
25 "	RGUST	"	"	
26 重心しパイロット席との距離	XPC	m	F	機体軸
27 離	YPC	m	F	
28	ZPC	m	F	
29 脚振動位置	GPOS	—	F	0 (UP) ~ 1 (DOWN)
30 " " 大きさ	GAMP	—	"	0.0 ~ 1.0 (1.0 = 4.8mm)
31 " 振動位置セット	GPOSO	—	"	GPOSOとGPOSが一致した時点で振動させる。
32 ブレーキ ノーズ	FBN	kg	F	
33 " 左	FBL	"	"	
34 " 右	FBR	"	"	
35 パフュエット大きさ	BFTAMP	—	F	0 ~ 1.0 (1.0 = ± 0.5 cm)
36 " 周波数	BFTFRQ	Hz	F	0.0 ~ 5.0 (Hz)
37 (予備)	—	—	F	(24バイト)
40				

(2) 実時間タスク制御プログラム

RTC の割り込み回数をカウントし、指定された周期毎 (各実行プログラム毎にタスク周期を予め指定する) に対応するシミュレーション・プログラムを実行する。本プログラムには以下のプログラムが含まれている。

(a) N/DAC (リンケージ) 制御プログラム

リンケージ A_i, A_o, D_i, D_o の入出力を制御する。また整数 / 実数変換, パック / アンパック処理も行う。

(b) モーション模擬装置駆動プログラム

モーション駆動装置の性能については文献 4 ~ 6 に規定されていることは先にも述べたが、駆動方法については何ら規定されたものがない。現在はメー

カ各社のノウ・ハウとして一般にも公開されていない。

当研究所においても本装置のように大規模モーション駆動装置の導入は初めてであり、現時点ではメーカーより提供の駆動アルゴリズムを基本に文献 8 等を参考に、導入時に幾つかの定数を実験的に調整決定して使用している。

モーション模擬装置駆動プログラムは図 20 に示すように飛行運動計算機からの情報を受けてモーション駆動台を駆動する以下の要素プログラムから構成されている。

- 操縦席加速度発生プログラム
- 動揺台並進位置発生プログラム
- 動揺台角度発生プログラム

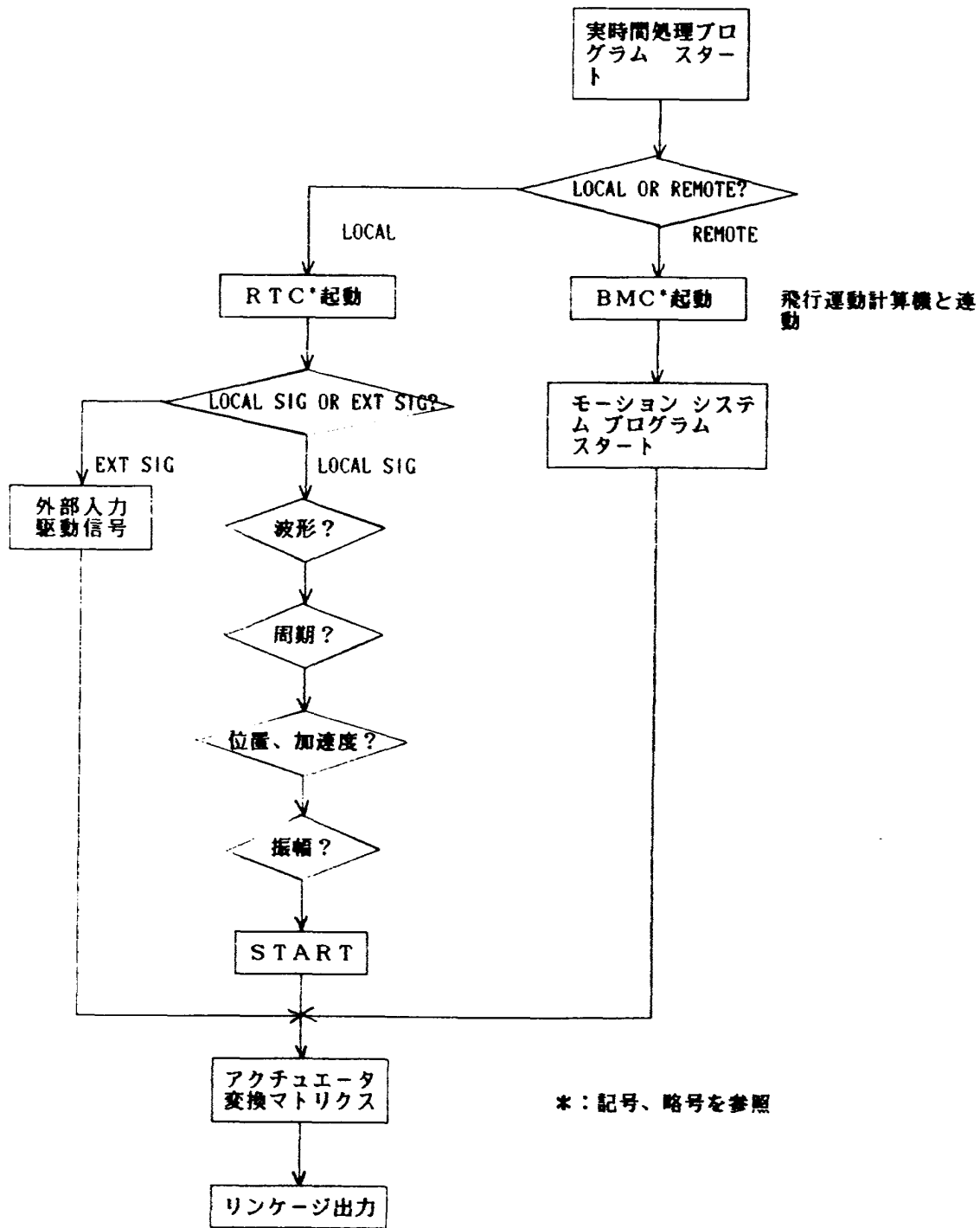


図17 モーション計算機計算フローチャート

- 油圧作動筒位置発生プログラム
- 衝撃, 振動効果発生プログラム

上記要素プログラムの基本的なところは各社ともほぼ同様な方法を採用しているものと思われる。これら内容の最適化は今後の研究課程であるが, 現時点における駆動アルゴリズムを参考的に付録1に記述する。

なお, 各定数については提供メーカーの意により

記述を控える。

- (c) モーション位置逆変換プログラム

各作動筒ポジション信号を用いて駆動台の位置, 姿勢を計算する。

- (d) モーション・システム制御盤処理プログラム

電気架の制御パネルの「MAINTENANCE -- LOCAL -- REMOTE」スイッチが「LOCAL」

表16 モーション専用計算機リンケージ部性能表

リンケージ	容 量	性 能
1. アナログ 出力(AO)	出力チャンネル 24	出力電圧 $\pm 10V$ 出力電流 10mA 分解能 12ビット(符号を含む) 確 度 $\pm 0.03\%$ of FS $\pm 1/2$ LSB セットリング時間 5 μ sec 出力インピーダンス 10 Ω
2. アナログ 入力(AI)	入力チャンネル 16	入力電圧範囲 $\pm 10V$ 分解能 12ビット(符号を含む) スループット 25KHz 変換時間 40 μ sec 収録時間 5 μ sec 確 度 $\pm 0.03\%$ of FS $\pm 1/2$ LSB 入力抵抗 1,000M Ω
3. ディスクリ ート出力 (DO)	出力チャンネル 32	タイプ GCスイッチ保持型(オープン・コレクター出力) 信号電圧範囲 -3V \sim 5.5V 信号電流 1A 信号電源 外部 論理 1 = 2.5V(max.) @1.0A 論理 0 = 1.0mA(max.)@5.5V
4. ディスクリ ート入力 (DI)	入力チャンネル 64	信号電源範囲 6V \sim 5.5V 信号電流 30mA 信号周波数 DC \sim 400Hz 信号電源 外部 論理 1 = 5mA, 6V DG(min.) 論理 0 = 200 μ A, 1V(max.) 入力遅延時間 OFF 15 \sim 100msec 出力遅延時間 OFF 30 \sim 200msec

の場合に以下の処理を行う。説明のために先に示した制御パネルの中、「LOCAL SIGNAL CONTROL」の部分を図21に示し、その機能を以下に記す。

(I) モードの選択

- AUTOスイッチ オン

「INPUT」スイッチが「ACTR POSI」の場合には作動筒No 1 \sim 6の順にそれ以外の場合には X, Y, Z, ϕ , θ , ψ の順に「WAVE FORM」で選択

された波形で5周期ずつ駆動信号を発生する。

- AUTOスイッチ オフ状態

「SIGNAL AMPLITUDE」で設定された信号が各軸あるいは各作動筒に対して発生される。

(II) 波形の選択

正弦波、三角波、矩形波はそれぞれ対応するスイッチをオンにすることにより発生する。また「SPECIAL WAVE」がオンでは予め特殊駆動信号発生プログラムを登録することにより、その駆動波形

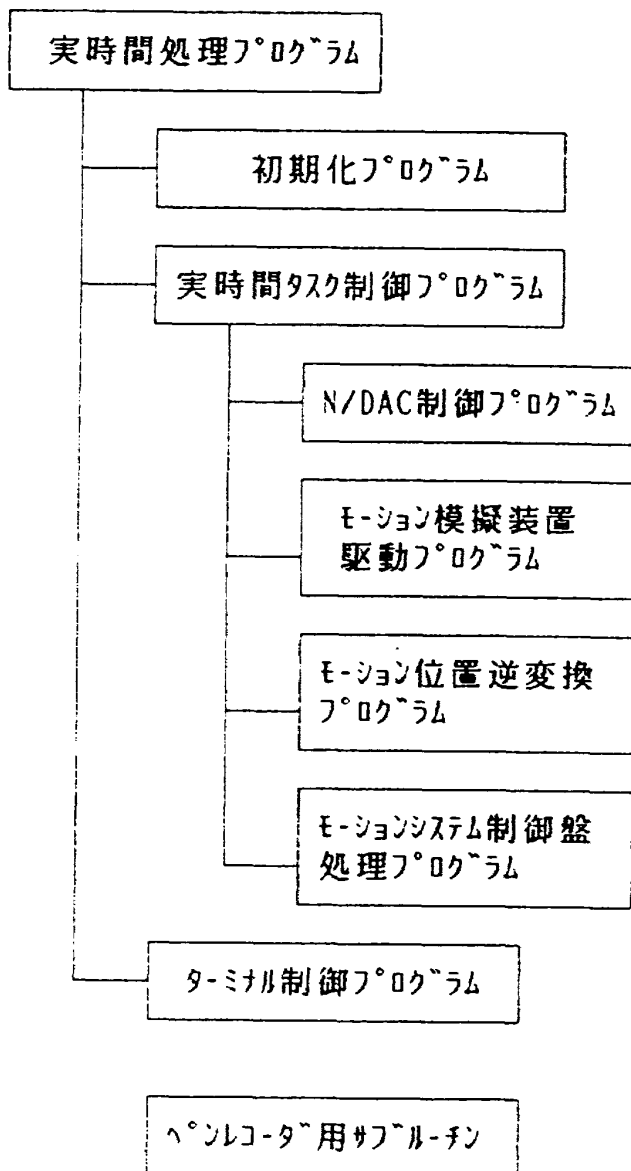


図18 実時間処理プログラムの構成

を出力する。SPECIAL WAVE の登録プログラム名は「SPWAVE」である。

(Ⅲ) 周期の設定

「PERIOD」のデジタル・スイッチを読みとり、周期 0.1～999.9 秒を設定する。

(Ⅳ) 印加信号の選択

• PLATF ACCEL

駆動信号を加速度信号として印加する。

• PLATF POSI

駆動信号を位置信号として印加する。

• ACTR POSI

作動筒のポジション信号として印加する。

(3) ターミナル制御プログラム

ターミナルからの終了コマンド「BY」を受けて、

実時間管理プログラムを終了する。

(4) ペン書きレコーダ用サブルーチン

任意の変数(ただし予め登録された変数)をペン書きレコーダに出力する。以下のコーリング・シーケンスに従う。

(a) テスト・ポイントの出力

CALL TPSET(VAR, SCAL, N)

VAR : 出力変数 (REAL)

SCAL : フルスケールの値 (REAL)

N : チャンネル (LAO 010～015)チャンネル対応 1～6
Ch (制御盤前面下部に出力される)

(b) ペンレコーダ出力

CALL PENSET(VAR, SCAL, N)

VAR : 出力変数 (REAL)

SCAL : フルスケールの値 (REAL)

N : チャンネル (LAO 017～024)チャンネル対応 1～8
Ch (制御盤裏面コネクタに出力される)

(5) 診断プログラム

モーション模擬信号発生部のリンケージ部診断用プログラムおよび電気架診断用として MAINTENANCE モードを設けている。

6. おわりに

本報告のモーション駆動装置を加え完成した飛行シミュレーション試験設備の外観を図22に示す。操縦席、視界模擬装置、モーション駆動装置さらに飛行運動計算機システムと関連する装置をもってフル・シミュレーション試験の実施が可能となり、既に低騒音STOL実験機「飛鳥」、次期民間輸送機「YXX」、さらには宇宙関連のシミュレーション試験等を実施している。

今後は各シミュレーションあるいは詳細評価試験を行い、モーション模擬装置の性能を有効に発揮させる手法を開発してゆく予定である。

最後に本装置製作にあたった三菱プレジジョン株式会社の方々と、導入時の評価パイロットをお願いした川崎重工株式会社の原田実氏、長谷部聡氏、さ

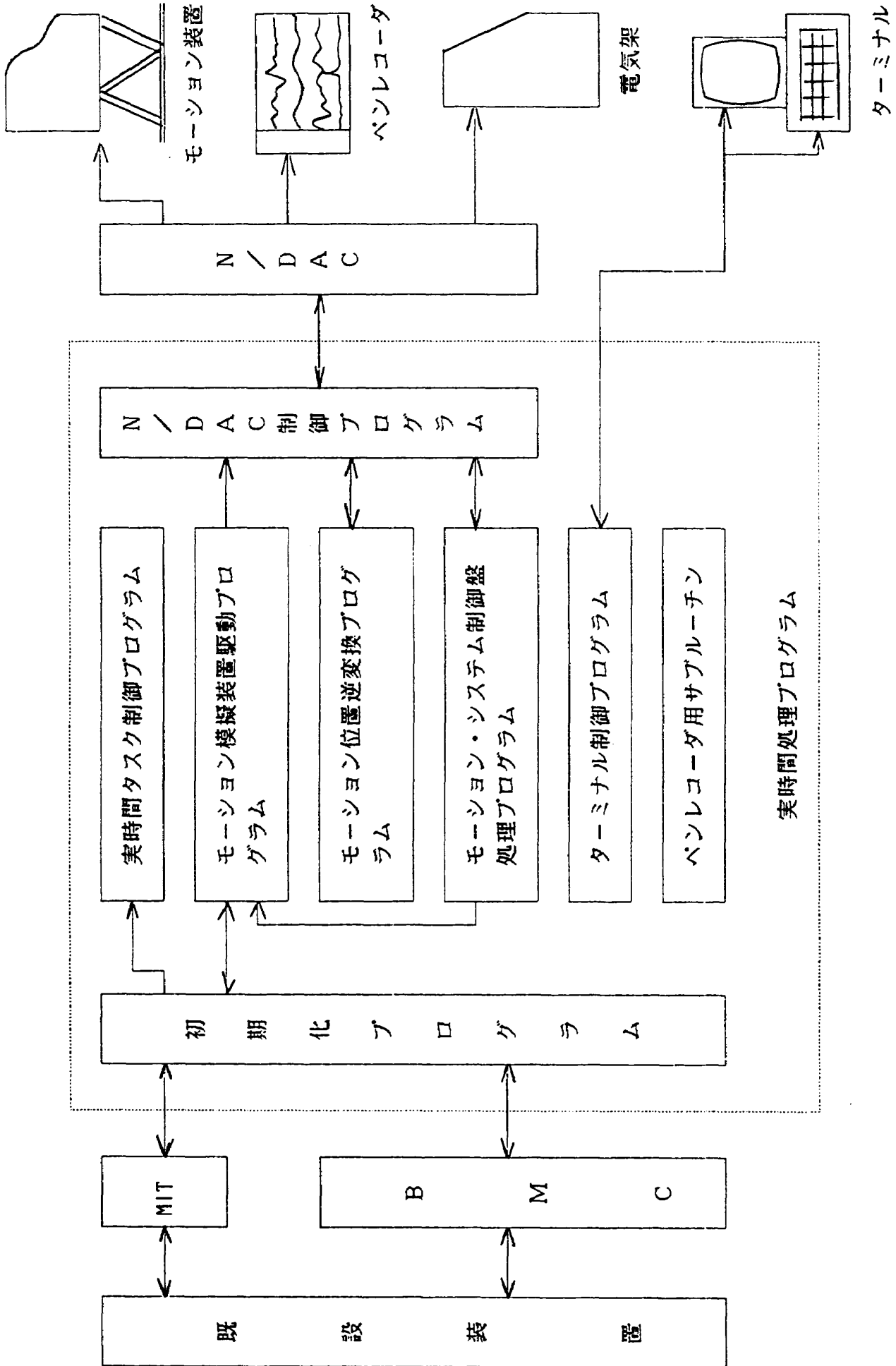
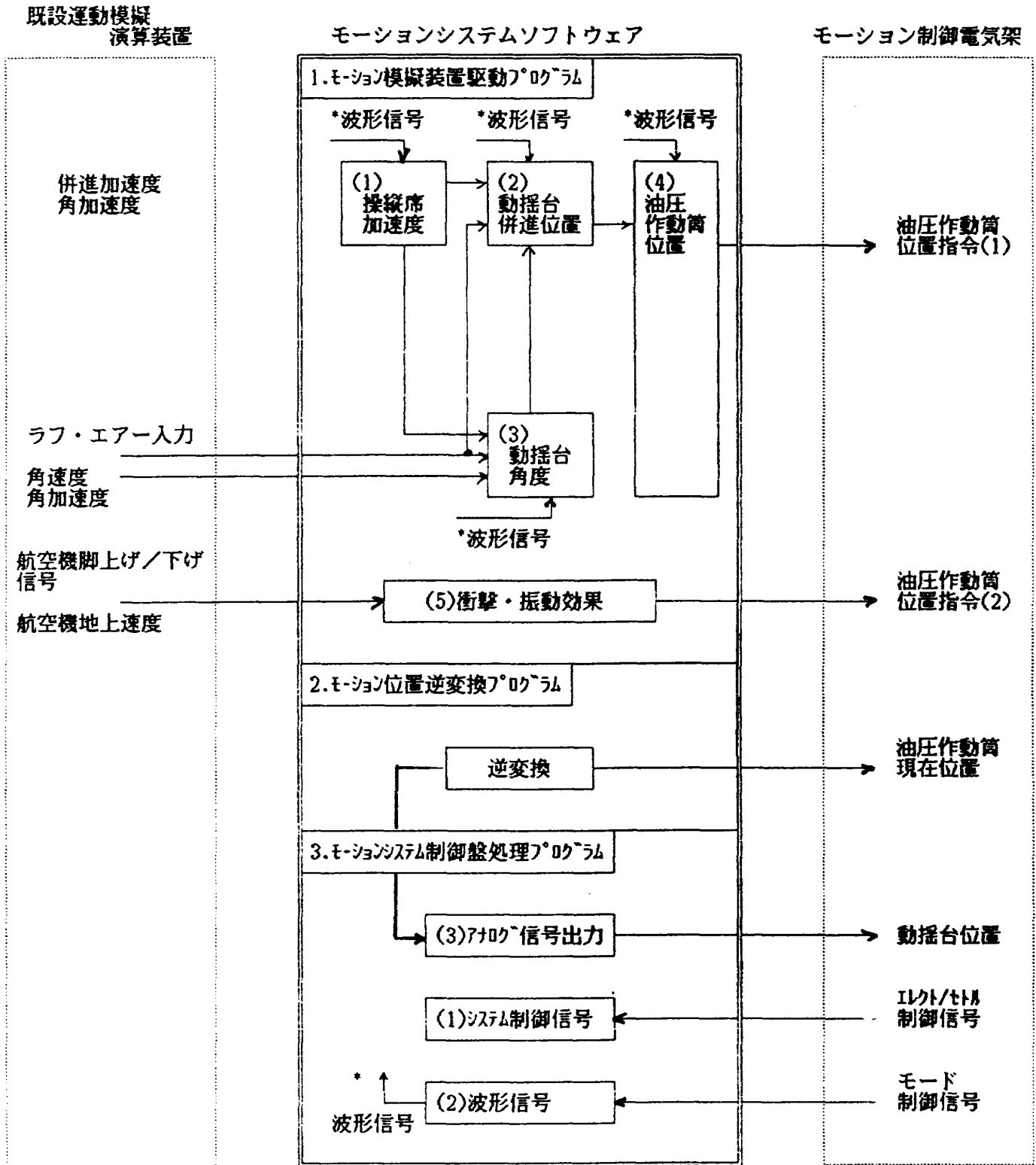


図19 実時間処理プログラムの機能ブロック図



注：実時間処理プログラム、診断プログラムは図示していない

図20 セーション駆動ソフト構成図

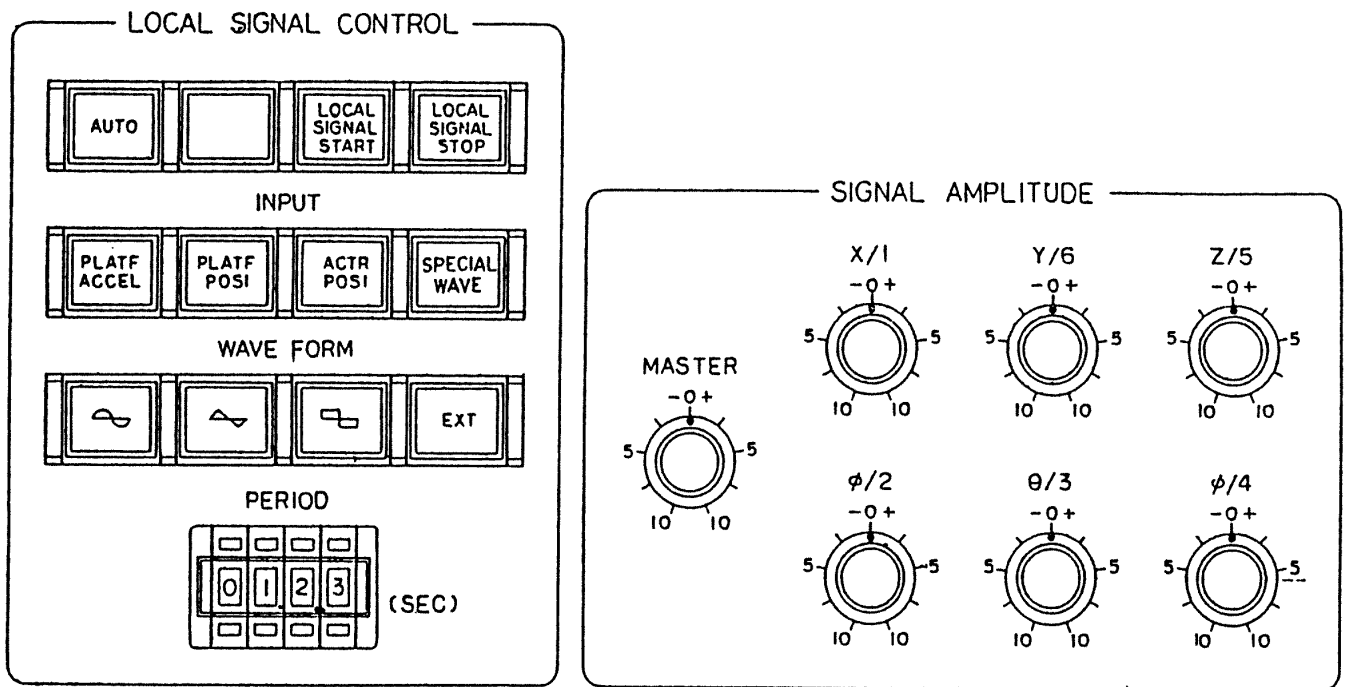


図21 電気架信号発生用パネル

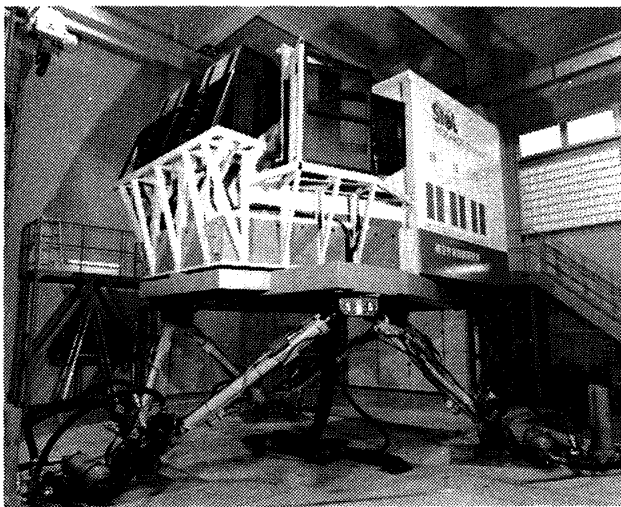


図22 飛行シミュレーション試験設備外観図

らにシミュレータ装置開発にあたって御指導していただいた多数の方々に謝意を表する。

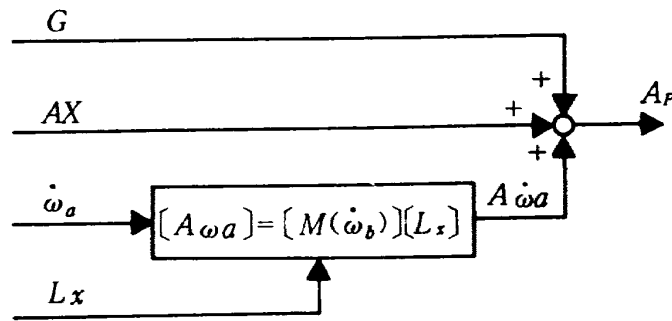
参 考 文 献

- 1) 松浦陽恵他：汎用飛行シミュレータ設備の計画・構造および特性，航空宇宙技術研究所報告 TR-70，(1965)
- 2) シミュレータ開発チーム：飛行シミュレーション試験設備，モーション模擬装置基本設計書，STOL推進本部，(1982)

- 3) 飛行シミュレーション試験設備，モーション模擬装置，取扱説明書，STOL推進本部(1983)
- 4) Department of Defense: Six-Degree-of-Freedom Motion System Requirements for Aircrew Member Training Simulators MIL-STD-1558, (1974)
- 5) Department of Defense: Trainer, Aircraft, General Requirements For, MIL-T-9212B, (1967)
- 6) D. Lean et al.: Dynamic Characteristic of Flight Simulator Motion System, AGARD-AR-144, (1979)
- 7) J. Ediedonne et al.: An Actuator Extension Transformation for A Motion Simulator and An Inverse Transformation Applying Newton-Raphson's Method, NASA-TND-7067, (1972)
- 8) Russeii V. Parish: Compensation Based on Linearized Analysis for A Six-Degree-of-Freedom Motion Simulator, NASA-TND-7349, (1973) 他

付録1 モーション駆動アルゴリズム

1. 加速度

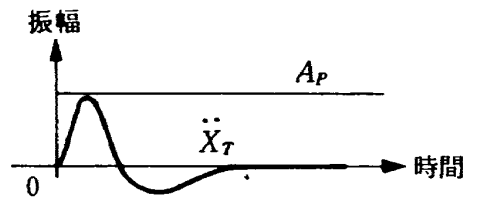
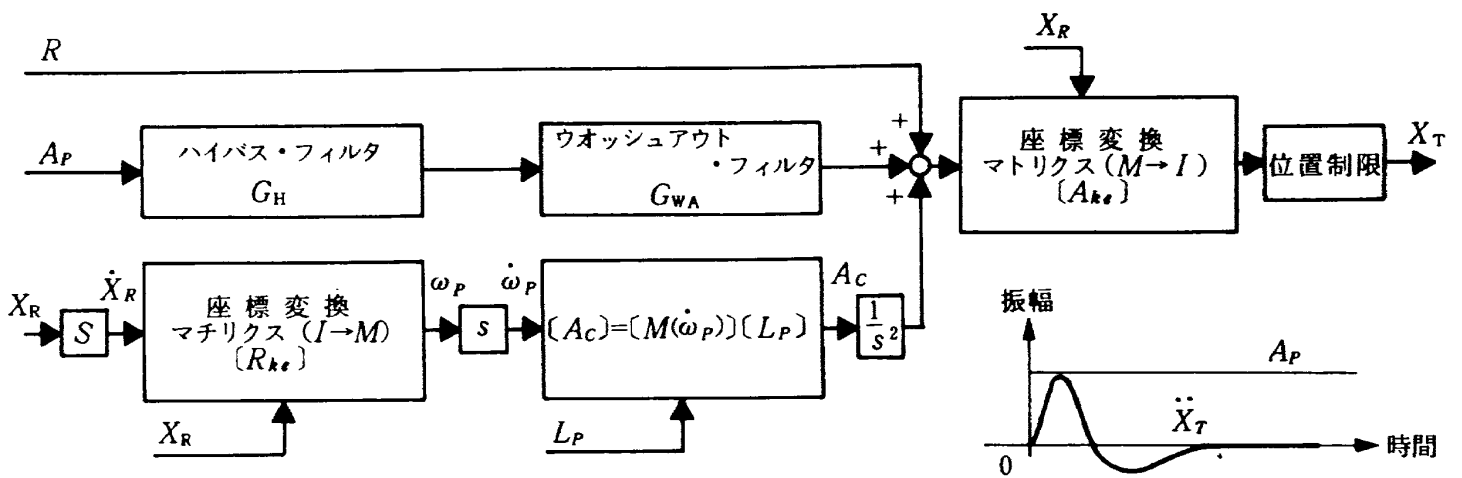


記号の意味

1. A_x : 航空機並進加速度 (CG回り) $A_x = [A_{x_A} \ A_{y_A} \ A_{z_A}]^T$
2. $\dot{\omega}_a$: 航空機有加速度 $\dot{\omega}_a = [\dot{p}_a \ \dot{q}_a \ \dot{r}_a]^T$
3. G : 重力加速度成分 $G = [\sin\theta_a \cdot \cos\theta_a \sin\phi_a \ \cos\theta_a \cos\phi_a]^T$
4. $A\dot{\omega}_a$: 航空機の回転による並進加速度
5. A_P : 操縦席加速度 $A_P = [A_{x_P} \ A_{y_P} \ A_{z_P}]^T$
6. L_x : 航空機のCGから操縦席までの距離 $L_x = [X_{CA} \ Y_{CA} \ Z_{CA}]^T$
7. $M(\dot{\omega}_a)$: 変換マトリクス

$$M(\omega_a) = \begin{bmatrix} 0 & -\dot{r}_a & \dot{q}_a \\ \dot{r}_a & 0 & \dot{p}_a \\ -\dot{q}_a & \dot{p}_a & 0 \end{bmatrix}$$

2. 並進位置



ステップ入力 A_P に対する \ddot{X}_T

記号の意味

1. s : ラプラス演算子
2. A_P : 操縦席加速度 $A_P = [A_{x_P} \ A_{y_P} \ A_{z_P}]^T$
3. X_R : 動揺台角度 $X_R = [\phi_P \ \theta_P \ \psi_P]^T$
4. \dot{X}_R : 動揺台速度 (慣性座標系) $\dot{X}_R = [\dot{\phi}_P \ \dot{\theta}_P \ \dot{\psi}_P]^T$

5. R : ラフエア入力
6. ω_p : 動揺台加速度 $\omega_p = (\dot{p}_p \ \dot{q}_p \ \dot{r}_p)^T$
7. $\dot{\omega}_p$: 動揺台加速度 $\dot{\omega}_p = (\ddot{p}_p \ \ddot{q}_p \ \ddot{r}_p)^T$
8. A_c : 補正加速度
9. L_p : 動揺台の回転中心から操縦席までの距離 $L_p = (X_{CP} \ Y_{CP} \ Z_{CP})^T$
10. X_T : 動揺台並進位置 $X_T = (X_p \ T_p \ Z_p)^T$
11. $[R_{ke}]$: 座標変換マトリクス (慣性座標→動座標)

$$[R_{ke}] = \begin{bmatrix} \cos\phi_p & 0 & \cos\theta_p \sin\phi_p \\ 0 & 1 & \sin\theta_p \\ -\sin\phi_p & 0 & \cos\theta_p \cos\phi_p \end{bmatrix}$$

12. $[M(\dot{\omega}_p)]$: 変換マトリクス

$$\begin{bmatrix} 0 & -\dot{r}_p & \dot{q}_p \\ \dot{r}_p & 0 & \dot{p}_p \\ -\dot{q}_p & \dot{p}_p & 0 \end{bmatrix}$$

13. $[A_{ke}]$: 座標変換マトリクス (動座標→慣性座標)

$$\begin{bmatrix} \cos\psi_p \cos\theta_p \cos\psi_p \sin\theta_p \sin\phi_p - \sin\psi_p \cos\phi_p & \cos\psi_p \sin\theta_p \cos\phi_p + \sin\psi_p \sin\phi_p \\ \sin\psi_p \cos\theta_p \sin\psi_p \sin\theta_p \sin\phi_p + \cos\psi_p \cos\phi_p & \sin\psi_p \sin\theta_p \cos\phi_p - \cos\psi_p \sin\phi_p \\ -\sin\theta_p & \cos\theta_p \sin\phi_p & \cos\theta_p \cos\phi_p \end{bmatrix}$$

14. G_H : ハイパスフィルター

機能……可動範囲を有効に利用するため感知されぬように動揺台を中立位置へもどす。

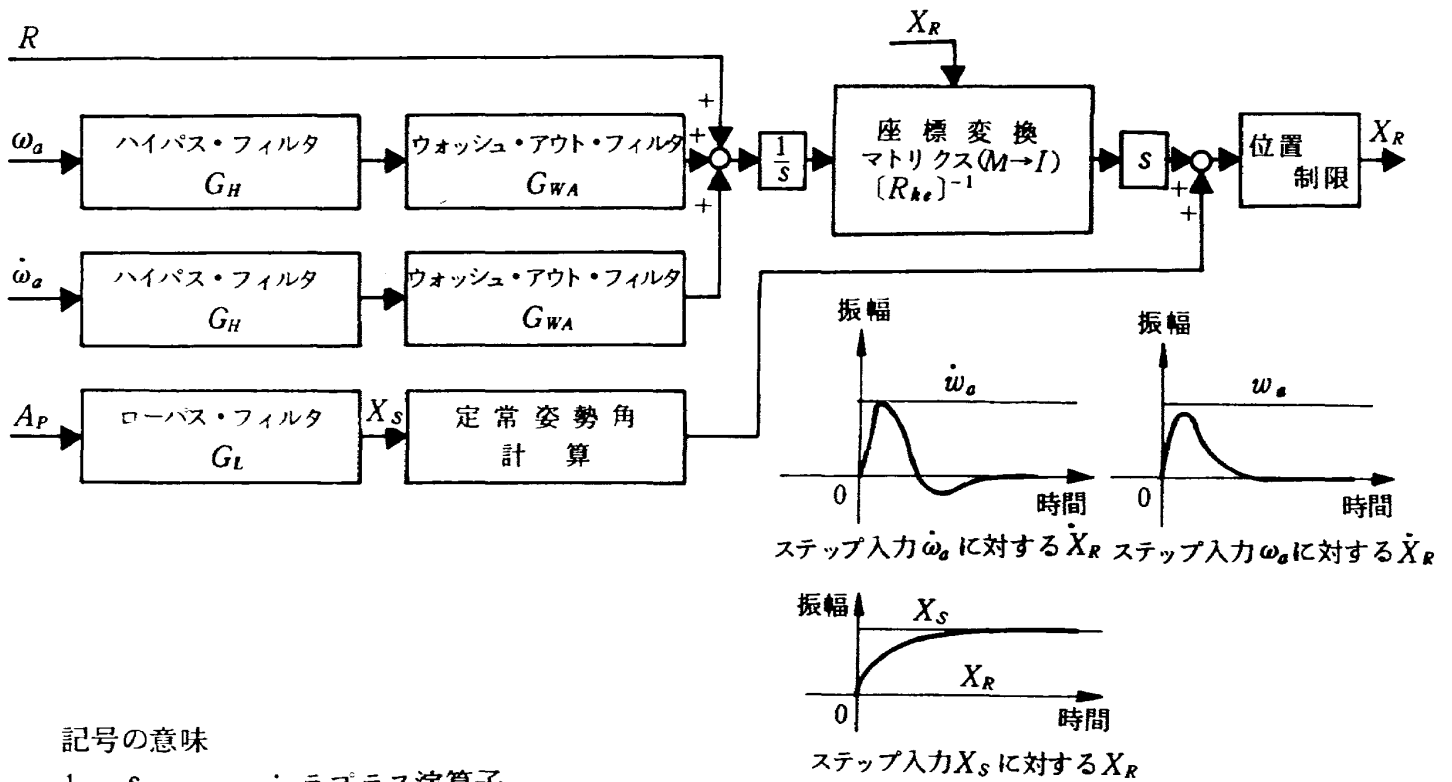
$$G_H = \frac{T_H s}{1 + T_H s} \quad T_H : \text{ハイパス・フィルタ時定数}$$

15. G_{WA} : ウォッシュ・アウト・フィルタ

機能……加速度変化の立上り部分の感覚 (オンセット・キュー) を調整する。

$$G_{WA} = \frac{T_{WA1} \cdot T_{WA2}}{(1 + T_{WA1} s)(1 + T_{WA2} s)} \quad T_{WA1}, T_{WA2} : \text{ウォッシュ・アウト・フィルタ時定数}$$

3. 度角



記号の意味

1. s : ラプラス演算子
2. ω_a : 航空機角速度 $\omega_a = \{ \dot{p}_a \ \dot{q}_a \ \dot{r}_a \}^T$
3. $\dot{\omega}_a$: 航空機有加速度 $\dot{\omega}_a = \{ \ddot{p}_a \ \ddot{q}_a \ \ddot{r}_a \}^T$
4. A_p : 操縦席加速度 $A_p = \{ A_{XP} \ A_{YP} \ A_{ZP} \}^T$
5. X_R : 動揺台角度 $X_R = \{ \phi_P \ \theta_P \ \psi_P \}^T$
6. X_S : 定常姿勢角 $X_S = \{ \phi_S \ \theta_S \ 0 \}^T$

$$\phi_S = A_{YP} / \sqrt{A_{XP}^2 + A_{YP}^2 + A_{ZP}^2}$$

$$\theta_S = A_{XP} / \sqrt{A_{XP}^2 + A_{YP}^2 + A_{ZP}^2}$$

7. $(R_{ke})^{-1}$: 座標変換マトリクス (動座標→慣性座標)

$$(R_{ke})^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \phi_P & 0 & -\sin \phi_P \\ \sin \phi_P \tan \theta_P & 1 & \cos \phi_P \tan \theta_P \\ \sin \phi_P / \cos \theta_P & 0 & \cos \phi_P / \cos \theta_P \end{bmatrix}$$

8. G_H : ハイパス・フィルタ

機能……可動範囲を有効に利用するため感知されぬように動揺台を中立位置へもどす。

$$G_{H11} = \frac{T_{HS}}{1+T_{HS}} \quad T_H : \text{ハイパス・フィルタ時定数}$$

9. G_{WV} G_{WA} : ウォッシュ・アウト・フィルタ

機能……加速度変化の立上り部分の感覚 (オンセット・キュー) を調整する。

$$G_{WV} = \frac{T_{WV}}{1+T_{WVS}} \quad T_{WV} : \text{ウォッシュ・アウト・フィルタ時定数}$$

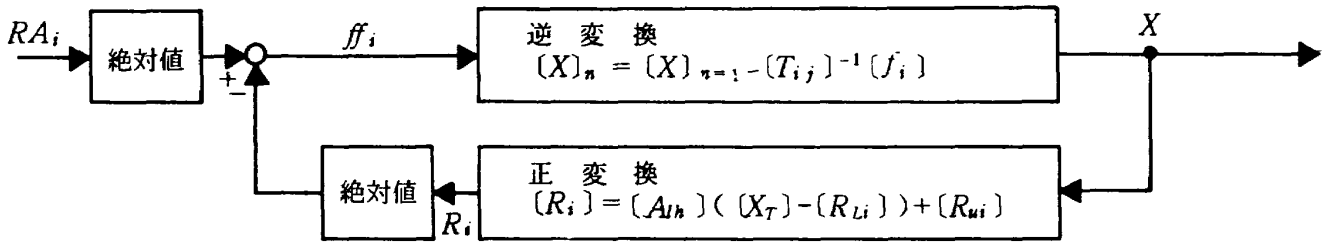
$$G_{WA} = \frac{T_{WA1} \cdot T_{WA2}}{(1+T_{WA1S})(1+T_{WA2S})} \quad T_{WA1}, T_{WA2} : \text{ウォッシュ・アウト・フィルタ時定数}$$

10. G_L : ロー・パス・フィルタ

機能……動揺台の回転を感知されぬように定常姿勢角を与える。

$$G_L = \frac{1}{(1+T_{LS})} \quad T_L : \text{ロー・パス・フィルタ時定数}$$

4. 逆変換



記号の意味

1. RA_i : i 番目 ($i = 1 \sim 6$) の油圧作動筒の現在位置
2. R_i : i 番目 ($i = 1 \sim 6$) の油圧作動筒の近似値
3. X, X_T : 動揺台の位置 $X = (X_P \ Y_P \ Z_P \ Q_P \ \phi_P \ \psi_P)^T$, $X_T = (X_P \ Y_P \ Z_P)^T$
4. $[A_{lk}]$: 座標変換マトリクス (慣性座標 \rightarrow 動座標)

$$[A_{lk}] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi_P \cos \theta_P & \sin \psi_P \cos \theta_P & \\ \cos \psi_P \sin \theta_P \sin \phi_P - \sin \psi_P \cos \phi_P & \sin \psi_P \sin \theta_P \sin \phi_P + \cos \psi_P \cos \phi_P & \\ \cos \psi_P \sin \theta_P \cos \phi_P + \sin \psi_P \sin \phi_P & \sin \psi_P \sin \theta_P \cos \phi_P - \cos \psi_P \sin \phi_P & \\ & & -\sin \theta_P \\ & & \cos \theta_P \sin \phi_P \\ & & \cos \theta_P \cos \phi_P \end{bmatrix}$$

5. R_{Li} : i 番目 ($i = 1 \sim 6$) の油圧作動筒の下部ジョイント位置 $R_{Li} = (X_{Li} \ Y_{Li} \ Z_{Li})^T$
6. R_{Ui} : i 番目 ($i = 1 \sim 6$) の油圧作動筒の上部ジョイント位置 $R_{Ui} = (X_{Ui} \ Y_{Ui} \ Z_{Ui})^T$
7. ff_i : i 番目 ($i = 1 \sim 6$) の油圧作動筒の誤差

$$\begin{aligned} ff_i &= |RA_i| - |R_i| = [RA_i]^T [RA_i] - [R_i]^T [R_i] \\ &= [RA_i]^T [RA_i] - \{ [A_{lk}] ([X_T] - [R_{Li}]) + [R_{Ui}] \}^T \{ [A_{lk}] ([X_T] - [R_{Li}]) + [R_{Ui}] \} \\ &= [RA_i]^T [RA_i] - \{ [X_T]^T [X] + [R_{Ui}]^T [R_{Ui}] + [R_{Li}]^T [R_{Li}] - 2 [X_T]^T [R_{Li}] - 2 ([X_T]^T - [R_{Li}]) [A_{lk}]^T [R_{Ui}] \} \\ &= [RA_i]^T [RA_i] - \{ (X_P^2 + Y_P^2 + Z_P^2) + (X_{Ui}^2 + Y_{Ui}^2 + Z_{Ui}^2) + (X_{Li}^2 + Y_{Li}^2 + Z_{Li}^2) \\ &\quad - 2 (X_P X_{Li} + Y_P Y_{Li} + Z_P Z_{Li}) + 2 (X_P - X_{Li}) (a_{11} X_{Ui} + a_{21} Y_{Ui} + a_{31} Z_{Ui}) \\ &\quad + 2 (Y_P - Y_{Li}) (a_{12} X_{Ui} + a_{22} Y_{Ui} + a_{32} Z_{Ui}) + 2 (Z_P - Z_{Li}) (a_{13} X_{Ui} + a_{23} Y_{Ui} + a_{33} Z_{Ui}) \} \end{aligned}$$

8. $[T_{ij}]$: 変換マトリクス i 番目 ($i = 1 \sim 6$) の油圧作動筒に対する要素は次式による。

$$\begin{aligned} T_{i1} &= \frac{\partial ff_i}{\partial X_P} = -2 \{ Y_P - X_{Li} + (a_{11} X_{Ui} + a_{21} Y_{Ui} + a_{31} Z_{Ui}) \} \\ T_{i2} &= \frac{\partial ff_i}{\partial Y_P} = -2 \{ Y_P - Y_{Li} + (a_{12} X_{Ui} + a_{22} Y_{Ui} + a_{32} Z_{Ui}) \} \\ T_{i3} &= \frac{\partial ff_i}{\partial Z_P} = -2 \{ Z_P - Z_{Li} + (a_{13} X_{Ui} + a_{23} Y_{Ui} + a_{33} Z_{Ui}) \} \\ T_{i4} &= \frac{\partial ff_i}{\partial \theta_P} = -2 \{ (X_P - X_{Li}) (a_{11\theta} X_{Ui} + a_{21\theta} Y_{Ui} + a_{31\theta} Z_{Ui}) + (Y_P - Y_{Li}) (a_{12\theta} X_{Ui} + a_{22\theta} Y_{Ui} + a_{32\theta} Z_{Ui}) \\ &\quad + (Z_P - Z_{Li}) (a_{13\theta} X_{Ui} + a_{23\theta} Y_{Ui} + a_{33\theta} Z_{Ui}) \} \\ T_{i5} &= \frac{\partial ff_i}{\partial \phi_P} = -2 \{ (X_P - X_{Li}) (a_{31} Y_{Ui} - a_{21} Z_{Ui}) + (Y_P - Y_{Li}) (a_{32} Y_{Ui} - a_{22} Z_{Ui}) + (Z_P - Z_{Li}) (a_{33} Y_{Ui} - a_{23} Z_{Ui}) \} \\ T_{i6} &= \frac{\partial ff_i}{\partial \psi_P} = -2 \{ (X_P - X_{Li}) (-a_{12} X_{Ui} - a_{22} Y_{Ui} - a_{32} Z_{Ui}) + (Y_P - Y_{Li}) (a_{11} X_{Ui} + a_{21} Y_{Ui} + a_{31} Z_{Ui}) \} \end{aligned}$$

ただし, $a_{11} \sim a_{33}$ は座標変換マトリクス $[A_{ik}]$ の要素である。また $a_{110} \sim a_{330}$ は次式による。

$$\begin{aligned} a_{110} &= -\cos\psi_P \sin\theta_P, & a_{120} &= -\sin\psi_P \sin\theta_P, & a_{130} &= -\cos\theta_P \\ a_{210} &= \cos\psi_P \cos\theta_P \sin\phi_P, & a_{220} &= \sin\psi_P \cos\theta_P \sin\phi_P, & a_{230} &= -\sin\theta_P \sin\phi_P \\ a_{310} &= \cos\psi_P \cos\theta_P \cos\phi_P, & a_{320} &= \sin\psi_P \cos\theta_P \cos\phi_P, & a_{330} &= -\sin\theta_P \cos\phi_P \end{aligned}$$

航空宇宙技術研究所資料 575 号

昭和 62 年 6 月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町 7 - 44 - 1
電話 三鷹(0422)47-5911(大代表) 〒182
印刷所 株式会社実業公報社
東京都千代田区九段南 4 - 2 - 12
