

動的変位計測のシステムの更新*

神田 淳^{*1}、外崎得雄^{*1}

Replacement of Dynamic Displacement Measurement System*

Atsushi KANDA^{*1} and Tokuo SOTOZAKI^{*1}

ABSTRACT

We replaced the system (Dynamic Displacement Measurement System) used for the effective measurement of modal characteristics. The new system can automatically measure modal characteristics by multi-point vibration tests, with measurement suspension and resumption functions added for convenience. Modal tests of all configuration models with a non-planar wing were conducted using this system, confirming successful function of the system.

Keywords: Vibration Test, Modal Analysis, Robot

概 要

モーダル計測を効率的に行うためのシステム(ロボットを用いた動的変位計測システム)の大幅な刷新を行った。新システムでは多点加振の自動計測、計測の中断・再開等の機能 拡張・改良を行った。このシステムを用いて非平面翼形態の全機模型についてモーダル試験を行い、システムが有効に機能することを確認した。

1. はじめに

ロボットを用いた動的変位計測システムは、構造体の振動特性(モーダル特性)計測のために開発されたシステム¹⁾である。供試体の振動特性に影響を与えないよう非接触型レーザセンサを用い、センサの位置決め装置として3次元物体に柔軟に対応できる6軸の高精度ロボットを使用している。予め計測位置をティーチングしておくことにより自動計測を行えることが最大の特徴である。

このシステムは1990年に開発されて以来、多数の風洞実験用模型の他にも実機2機(FA-200、自動着陸実験機ALFLEX)の全機振動特性を計測^{2),3)}し、大変効率的に稼働してきた。しかし、計測点の増加等、精度向上のための必要処理能力の増加、ハードウェアの老朽化の問題が出てきた。そこで今回、問題の発生していないロボット・制御装置を除いた、ハードウェア・ソフトウェアについて大幅な刷新を行い、機能の拡張および使用性の向上を図っ

た。新システムの仕様および構成、計測方法について示し、実例として非平面翼を有する風洞用模型の全機振動特性の計測結果について示す。

2. システム

2.1 システム構成

図2-1にシステム構成を図2-2および図2-3にシステム状況を示す。センサの3次元的な位置決めを行うのはロボット(PanaRobo 製 ABB IRB-3200)、ロボット本体と制御装置から成っている。データ収集・データ処理はコンピュータ(HP 製 KAYAK XW/Windows NT)にインストールされた動的変位計測・解析ソフトウェア(SDRC 製 I-DEAS)を用いる。ロボットとのリンクはI-DEASからリンクプログラムを呼び出し、ロボット制御インターフェースを通じて行う。加振アナログ信号発生および検出信号のA/D変換はフロントエンド(HP 製 VXI)で行われる。動的変位検出はレーザ振動速度計(B&K 製 3544)あるいはレー

平成11年12月27日受付 (received 27 December 1999)

*1 構造研究部 (Structures Division)

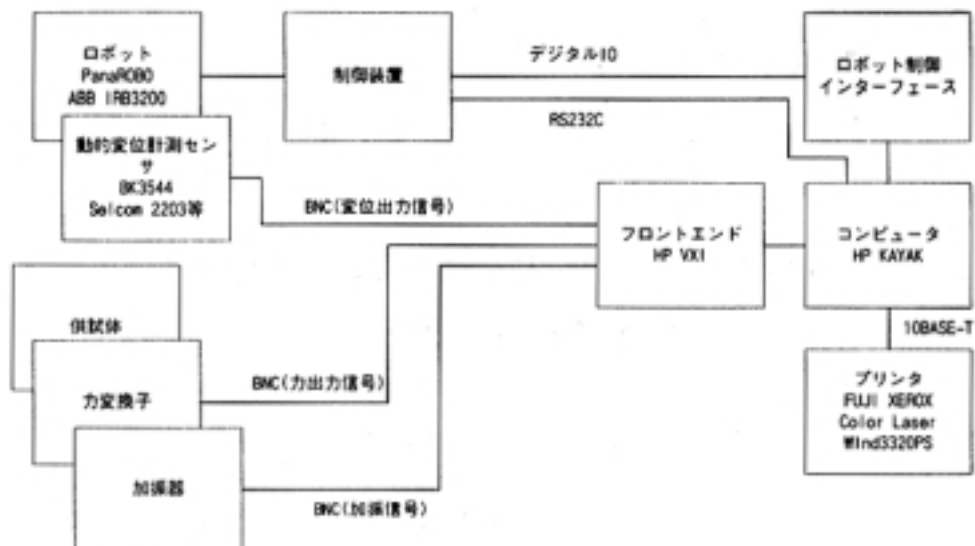


図 2-1 システム構成



図 2-2 システム状況(コンピュータ周り)



図 2-3 システム状況(ロボット周り)

レーザー変位計(Selcom 製 2203)をロボットの腕の先端に取り付けて行う。データのアウトプットはカラーレーザープリンタ(FUJI XEROX 製 Color Laser Wind 3320PS)で行う。

2.2 システム更新概要

表 2-1 に新システムと旧システムの主な違いを示す。

2.3 ハードウェア

2.3.1 ロボット本体(既存品)

IRB3200 ロボットは、垂直多関節多用繰返し・教示再生用ロボットと呼ばれている。重さは 700kg で鋼盤架台の上に取り付けられており総重量 1300kg でハンドパレットトラックを用いて一人で移動させることが可能である。基本構成は、AC サーボモータとヘリカルギヤ駆動による全電動マイクロコンピュータ制御方式である。可搬重量は 10kg である。動作自由度は図 2-4 に示す通り 6 軸を持ち、各軸毎にモータとブレーキが付いており電源 OFF 時も姿勢を保持することができる。伝導系には、バックラッシュを除去するためにクランク・エリミネータ機構を用いて繰返し精度の向上が図られている。その仕様を表 2-2 に示す。動作範囲は図 2-5 に示す通りで、ロボットのベース下

表 2-1 システム更新概要

機能	新システム	旧システム	備考
コンピュータ	HP KAYAK XW (PentiumII)	HP9000.375CH (MC68030)	
OS	Windows NT	HP-UX	
ロボット制御インターフェース	製作品	製作品	機能は同一
フロントエンド	HP VXI	DIFA SCADAS	機能はほぼ同一
プリンタおよびプロッタ	FujiXEROX Color Laser Wind 3320PS	Canon 90011H HP 7550B	新システムではプロッタとプリンタは兼用
計測ソフトウェア	SDRC I-DEAS	LMS CADA-X	
リンクソフトウェア	I-DEAS マクロ+ Visual BASIC	LMS マクロ+C	
計測一時停止	可能(3600 秒間)	不可	
計測途中終了	可能	不可	
多点加振自動計測	可能	不可	
各種計測状態表示	可能	不可	

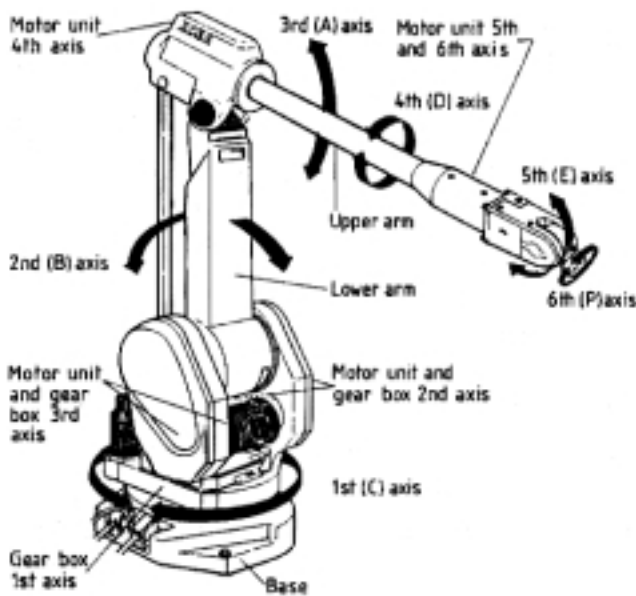


図 2-4 ロボット可動部

や背後部も動作範囲内である。また、必要に応じて動作範囲を制限するためのメカニカル・ストッパも用意されている。最大動作速度は、補間機能運転時 1m/s であるが、これは計測装置としての要求速度を十分上回っており、検出器保護及び安全上の観点から常に 25% の速度ロックを外さずに運用する。実際は、さらに制御プログラムの位置制御命令で減速速度指定を行って用いている。位置再現精度公称値は± 0.2mm 以下であるが、ロボット導入時の精度測定¹⁾では± 0.1mm 以下であった。

安全機能については、自己管理機能を有する 2 重の回路を持ち、常にその回路を監視して回路間に違いを検出した

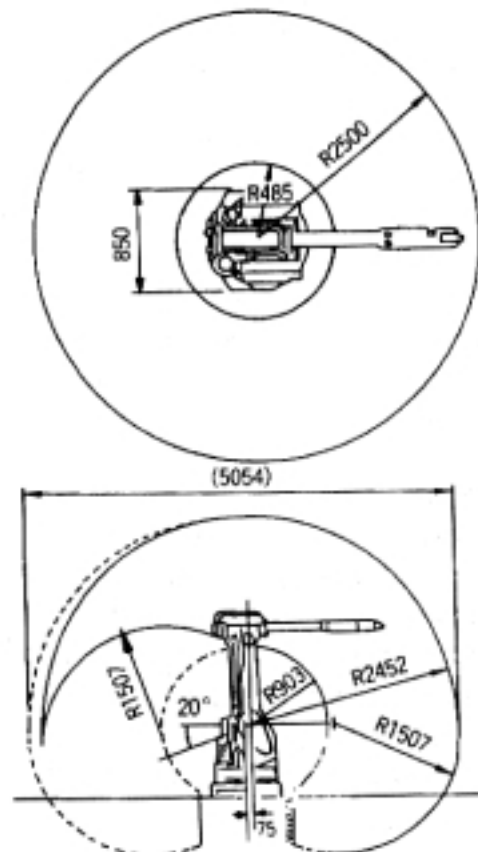


図 2-5 外形寸法と動作範囲

場合、システムを自動的に停止する設計である。これにより安全回路の一部に故障が発生するとロボットシステムを直ちにスタンバイ状態に閉じ込め、ロボットモータの電源を遮断するとともにブレーキをかける構造になっている。ロボットシステムの非常停止回路の故障等を考慮して、非

表 2-2 ロボット本体仕様

項目		仕様	
型式		IRB-3200	
構造		アルミ合金多関節ロボット	
制御軸		6 軸 (オプション、外部に 6 軸まで追加可能)	
駆動方式		AC サーボモータによるギア駆動	
軸		作動範囲	最高速度
1 軸	腕旋回	±180°	106° /s
2 軸	腕前後	+90° / -110°	100° /s
3 軸	腕上下	±60°	87° /s
4 軸	腕ひねり	±200°	223° /s
5 軸	手首曲げ	±120°	300° /s
6 軸	手首ひねり	±200°	300° /s
可搬重量		最高速度で 10kg 可能	
位置再現精度		±0.2mm 以下	
最高速度		3m/s (補間機能運転時: 1m/s)	
本体密封度		IP 54 (完全密封型)	
TCP		工具先端位置を 20 点記憶 (0~1290mm)	
設置方向		水平設置、天吊り設置	
本体重量		700kg	
設置面積		850×868mm	

常停止ボタンが制御盤パネルとプログラミングユニット上に設置されている。ロボットアームの操作に使用するプログラミングユニットにはセーフティーバットスイッチが設けられている。同ユニットを制御盤から外して使用する場合にはセーフティーバットスイッチを常に押してONの状態を保持しておくことが必要である。セーフティーバットスイッチがOFFになるとシステムは速やかにワークストップ状態になる。

2.3.2 制御装置 (既存品)

IRB-3200 制御装置は、制御盤筐体内に低電圧装置と共に収納されている。制御装置の仕様を表 2-3 に示す。図 2-6 に筐体の構成と各部の名称を示す。構成は(1)ロボットの立ち上げ立ち下げ等を行うコントロールパネル、(2)プログラムの教示、修正作業、手動制御を行うプログラミングユニット、(3)システムデータ、TCP(後述) 教示内容の外部記録を行うフロッピディスクユニット等、である。

制御装置は 64K バイトのメモリーを持ち、ポジション命令のみの場合で3000命令までプログラムが可能である。ロボットの制御には、プログラミングユニットのジョイスティックを用いて手動で位置合わせをする手動制御、プログラミングユニットのジョイスティックを用いて移動位置・速度・停止時間などを対話形式で教示し、制御装置のメモリーに記憶させた後、再生機能を用いてプログラムの実行を行うプログラム制御、専用のデジタル I/O と RS232C インタフェースを介して外部のコンピュータから

ロボットの始動・停止・記憶プログラム等の制御を行う外部制御の機能を備えている。ジョイスティックによるロボットアームの移動形態には、3 種類の異なった座標(ロボット座標、直交座標、手首直交あるいは工具直交座標)が有り、プログラミング時はその中から最適のものを選択する。このうち、頻繁に使用されるのは直交座標である。ロボット座標は、2 点間を移動の際 X,Y,Z それぞれの軸が最短距離を通る動作により実行されるのに対して、直交座標は、アーム先端の姿勢を変えることなく 2 点間を直線移動する。実際の測定プログラムで、直交座標を用いてティーチングを行うことにより測定変位方向を容易に正確に一致させることができる。ロボットの最少移動量は 0.1mm で精密な位置合わせが可能である。

サイズ・形態が異なる種類のセンサをロボットアーム先端において交換・取り付けを行う場合、TCP(工具先端位置記憶)機能を利用することにより、測定位置座標の変更無く同一測定プログラムで、同一位置の測定が容易となる。TCP は 0 ~ 1290mm の範囲で 19 種類設定できる。

2.3.3 フロントエンド

HP VXI は入力に 16ch の A/D コンバータモジュールを有している。サンプリングレートは 51.2k サンプル/秒であり、分解能は 16bit である。ICP やマイクロフォン電源をサポートしており、プログラム可能なアンチエイリアシングフィルタも備えている。出力には 4ch のソースモジュールを有している。出力帯域は 25.6kHz である。D/

表 2-3 制御装置仕様

項目	仕様
制御方式	PTP プレイバック 6~12 軸同時方式
教示座標	ロボット座標、直行座標、手首基準直行座標
補間機能	直線補間機能、円弧補間機能
記憶装置	IC メモリ (64kbytes)
記憶容量	3000 命令 (ポジション命令のみの場合)
教示方式	ジョイスティックによる対話方式
TCP	固定: 1 個、可変: 19 個、0~1290mm の範囲
速度設定	基本速度に対し 0~799.9% まで 0.1% 毎に指定可能 オーバーライドは指定速度の 0~400% まで 5% 毎に指定可能
自己診断機能	有り (発光ダイオードと文字表示)
編集機能	削除、追加、修正、コピー
外部メモリ保存	3.5" フロッピーディスク
レジスター機能	数値一時記憶保存: 120 個 (-2^{15} ~ $+2^{15}-1$ までの数) 位置一時記憶保存: 96 個
バックアップ	1000 時間
消費電力	運転時: 2kW、スタンバイ時: 0.3kW
重量	300kg
寸法	800×600×1700mm
ターンテーブル	外部軸として同時制御可能
入出力信号 (周辺機器 制御信号)	デジタル入力: 16 (最大 64 オプション)、電圧 24V 、インピーダンス 3.5kΩ 以下 デジタル出力: 16 (最大 64 オプション)、電圧 24V 、負荷容量 150mA 以下

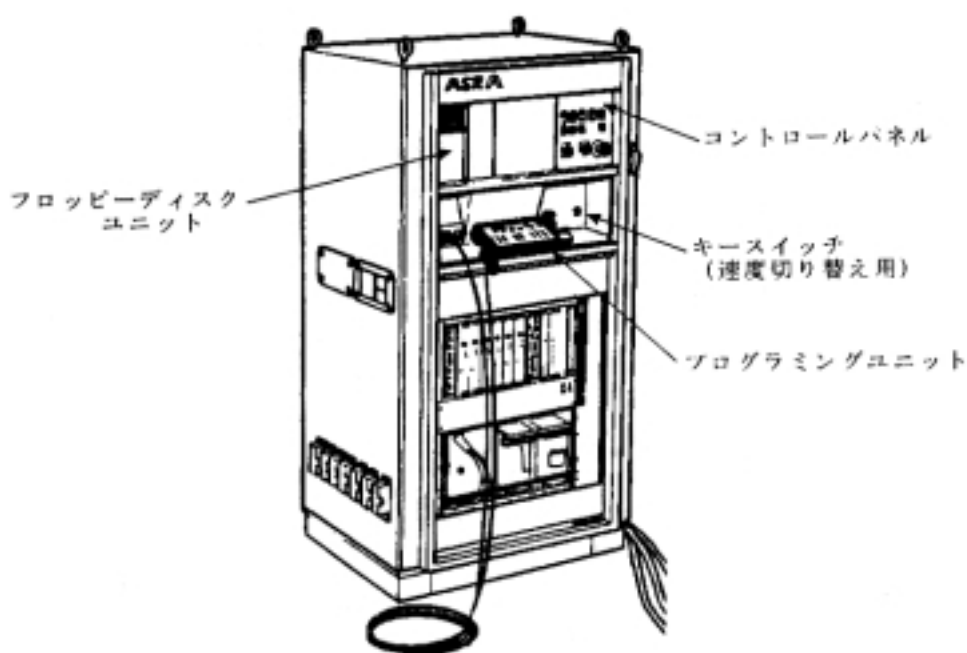


図 2-6 制御盤筐体

A コンバータの性能としては分解能 16bit、サンプリング速度 65k サンプル/秒である。正弦およびランダム波形、任意長の連続任意波形を出力可能である。また、入力・出力チャンネルとも必要に応じて増設可能である。コンピュータには MXI バスを用いて接続している。

2.3.4 ロボット制御インターフェース

計測シーケンスとロボットの動作シーケンスをリンクさせるために用いる。コンピュータの平行信号とロボット制御装置のデジタル I/O 信号を変換する機能を備えている。

2.3.5 レーザ振動速度計(既存のものと同型品)

B&K3544 レーザ振動速度計は、レーザドップラ効果を利用して光軸方向の振動速度を非接触で検出する無焦点型計測器で、動作距離は 100mm ~ 1000mm と広い設定許容範囲を有する。光源は低出力 (1mW 以下) の He-Ne レーザで、レーザ安全規格クラス II (BS4803) に適合している。表 2-4 に仕様を示す。

測定には、レーザ光の反射効率を高めるため測定位置に再帰反射型テープの貼付が必要である。測定速度の振幅範囲は $20 \mu\text{m/s} \sim 1000\text{mm/s}$ で、検出振動数域は $0 \sim 20\text{kHz}$ である。センサ先端に角度ミラーアダプタを備えており、レーザ光軸を上下に $30^\circ \sim 95^\circ$ の範囲で偏向でき、ミラーのハウジングを回転することにより 360° 全周にわたって偏向が可能である。また、内蔵の積分器により変位出力に

する機能を備えている。

2.3.6 レーザ変位計(既存品)

Selcom 2203 は、レーザ光による三角法を利用した非接触変位計である。これは、レーザ光を被測定面に照射し、その乱反射光を受光素子上に結像させる。投光レンズから被測定面までの距離が変わると受光素子上の像の位置が移動する。その位置に応じた電圧出力を得ることによって変位量を知ることができる。静的変位を対象にしたもので、測定範囲は焦点距離 180mm を中心に $\pm 32\text{mm}$ である。動的特性は $0 \sim 2\text{kHz}$ の追従性があり、低振動数微小振動域では十分振動計としても使える。この測定器は、光源に Ga-As のパルスレーザを使用しており、可視装置を備えているためスポットの確認は容易である。測定時、常に受光素子上の光量を一定に調整する機能も備えている。測定面のキメ、温度、密度、色合い等の表面反射率の変化を許容し、周囲やバックグラウンド照明からの影響を受けにくくしている。したがって、材質の異なる物質表面の変位も精度良く連続して測定することができる。表 2-5 に仕様を示す。

2.3.7 コンピュータ

HP KAYAK XW は CPU に PentiumII 400MHz (100MHz FSB) を持つ PC ワークステーションである。グラフィックスエンジンは Accel ECLIPSE II で、メインメモリは 256M バイト ECC 付 SDRAM、HDD は 4.5G バ

表 2-4 レーザ振動速度計仕様

項目	仕様
形式	B&K 製 BK3544
速度振幅範囲	$20 \mu\text{m/s} \sim 1\text{m/s}$
周波数範囲	$0 \sim 20\text{kHz}$
作動距離	100mm ~ 1m
光源	He-Ne レーザ
最大出力	1mW 以下
電源	12 ~ 15/22VDC
クラス	レーザ安全規格クラス 2

表 2-5 レーザ変位計仕様

項目	仕様
型式	SELCOM 製 2203
測定範囲	$\pm 32\text{mm}$
精度	$\pm 0.05\%$
分解能	$\pm 0.025\%$
周波数特性	2kHz
光源	赤外線レーザーダイオード
光源出力	5mW 以下
電源	100/115/230VAC

イトの Ultra Wide SCSI を 2 個備えている。32 倍速 CD-ROM ドライブ、FDD、640M MO ドライブを備えている。OS は MS WindowsNT4.0 である。1400W 無停電電源装置も備えており、瞬断に備えるほか、外部からの電源が絶たれたときにはコンピュータを自動的にシャットダウンシーケンスに移行させる機構となっている。ディスプレイは SHARP LL-T152A TFT 液晶 15 インチディスプレイである。

2.3.8 プリンタ

FUJI XEROX Color Laser Wind 3320PS はクロック周波数 133MHz の MIPS 64 ビット RISC プロセッサのコントローラを有する PostScript 3 に対応したプリンタである。各色 256 連続階調の 1,670 万色フルカラーで、標準解像度が 600dpi、グラデーション部では 4,800dpi x 600dpi 相当の出力が可能である。プリント方式はレーザーゼログラフィ方式である。コンピュータには 10BASE-T によりネットワークプリンタとして接続されている。

2.4 ソフトウェア

2.4.1 動的変位計測

動的変位計測には、SDRC I-DEAS シリーズの中の I-DEAS Core TEST、Standard Measurement、Standard Post Processing、User GUI を用いる。

Core TEST は数種類のモジュール(以降、タスクと呼ぶ)の集合体の名称である。Core TEST は具体的には、Signal Processing、Time History、Histogram、Model Preparation、Post Processing、Relation Database Manager、Plotting、Smartview のタスクが含まれており、以下の機能を提供する。

- (1) 基本グラフ表示機能：スペクトル、次数、時刻歴の関数データの 2 次元 / 3 次元グラフ表示のためのさまざまなグラフ表示機能、グラフ表示フォーマットの任意設定・変更
- (2) 時刻歴データ処理と表示：間引き / 補間処理、ストリップチャート表示、演算機能、統計処理、フレーム統計処理、波形修正、イベント検索機能、リサンプリング & デジタルフィルタリング同時処理機能(高 / 低域フィルタ、バンドパス、バンドカット、マルチバンド等)
- (3) 形状作成機能：有限要素モデルから実験モデルへの自由度のリダクション、ノード・トレースライン・要素作成機能、センサーの向きに応じたローカル座標系
- (4) 形状ベースのデータアクセス・データ表示：構造物の形状データを利用し形状の測定ポイントをマウスピクする操作により任意データを効率的に表示、複数画面表示、変形図 / アニメーション(ワイヤー、陰線処理、ベクトル、コンター、シェーディング表示)

- (5) 実稼働解析：有限要素解析のポスト処理機能、実稼働アニメーション機能(時間ベース、周波数ベース、回転数ベース)
- (6) 関数データ演算処理：四則演算・フーリエ変換・指数・対数・微積分等の数学演算処理、加速度・速度・変位変換処理、同時に複数データの演算処理
- (7) ヒストグラム処理：頻度分布処理・ピーク頻度・レベルクロッシング機能、レインフロー法カウンティング機能
- (8) データアクセスと管理：実験データ管理機能によるデータ検索・表示機能
- (9) 外部データとのインターフェース：SDRC ユニバーサルファイル、スプレッドシート形式のテキストファイル(Excel, MATLAB 等)の読み込み / 書き込み機能

Standard Measurement は定常信号に対するリアルタイム・一般データ収録機能を提供するタスクであり、以下の機能を提供する。

- (1) スペクトルデータ測定、時刻歴データ測定、正弦波測定(多入力多出力のデータも処理可能)、データを ADF ファイルやスループットディスクに収録(時間平均、自己 / クロススペクトル、自己 / 相関関数、時刻歴、周波数応答関数、コヒーレンス / マルチコヒーレンス、ステップ正弦波)
- (2) 信号出力機能：ランダム、サイン、パーストランダム、任意波形
- (3) センサー・マイクロホン類のキャリブレーション機能
- (4) リアルタイムモニター機能：時刻歴、スペクトル

Standard Post Processing は一般信号処理を行うタスクであり、収録された時刻歴データから、後処理にて下記信号処理機能を提供する。

- (1) スペクトルデータ処理
- (2) 正弦波掃引データ処理
- (3) 主応答解析、主成分分析
- (4) 衝撃応答解析
- (5) FFT 法以外のアルゴリズムによるスペクトル処理(最大エントロピー法、プロニージェデュー法)

User GUI はユーザ定義の GUI 構築を行うアプリケーションで、ユーザ独自のメニュー画面や画面内のボタン・スイッチ、選択項目を定義することができる。さらに I-DEAS コマンドやプログラムファイル実行を関連づけることで、ユーザ独自のメニュー画面から I-DEAS をコントロールすることができる。

2.4.2 モーダル解析

I-DEAS Modal は実験モーダル解析機能を提供するタスクである。周波数応答関数データから、数学演算処理(カーブフィット)によりモーダルパラメータを同定し、モードアニメーション等で構造物の動的挙動を把握することができる。具体的には以下の機能を提供する。

- (1) モード識別：ノーマルモードインディケータ関数、マルチ・バリエーションモードインディケータ関数による表示によりモードを容易に識別できる。
- (2) ポール安定化ダイアグラム：安定化ダイアグラムを直接カーソルピックすることにより、最適なカーブフィットのためのモードを設定可能。
- (3) モード識別手法：SDOF ピーク法、SDOF 多項式法、SDOF サークルフィット法、MDOF 複素指数関数法、単点参照グローバル法(直接法、ポリリファレンス法)、多点参照グローバル法(時間領域ポリリファレンス、周波数領域直交ポリリファレンス)
- (4) モーダル解析検証機能：MAC モード信頼性評価基準、シンセシスによる周波数応答関数の合成・重ね表示

2.4.3 ロボットリンク

ロボットリンクソフトウェアは RS232C およびパラレル I/O によってロボットの動作と計測をリンクさせるためのもので、I-DEAS のマクロ言語と Visual BASIC で作成されている。

- (1) RS232C による制御：任意のロボット側プログラム番号の起動、ロボットの現在位置座標の読み込み、起動されたロボット側プログラムの停止
- (2) パラレル I/O による制御：ロボットの移動司令信号の ON/OFF(1bit 出力) ロボットの移動・停止状態信号の確認(1bit 入力)
- (3) ユーザーインターフェース：各種状態の表示、計測中断・終了等のユーザからの入力受付、データの I-DEAS との受渡し

2.5 ハンドシェーク

ティーチングされたロボットプログラムと動的変位測定プログラムは別々に動作するため、ハンドシェークを行い動作リンクをとる必要がある。前述のロボットリンクソフトウェアがこの機能を担っている。ハンドシェークのフローを図 2-7 に示す。図中、INP、OUTP はそれぞれブリアン型の状態変数である。

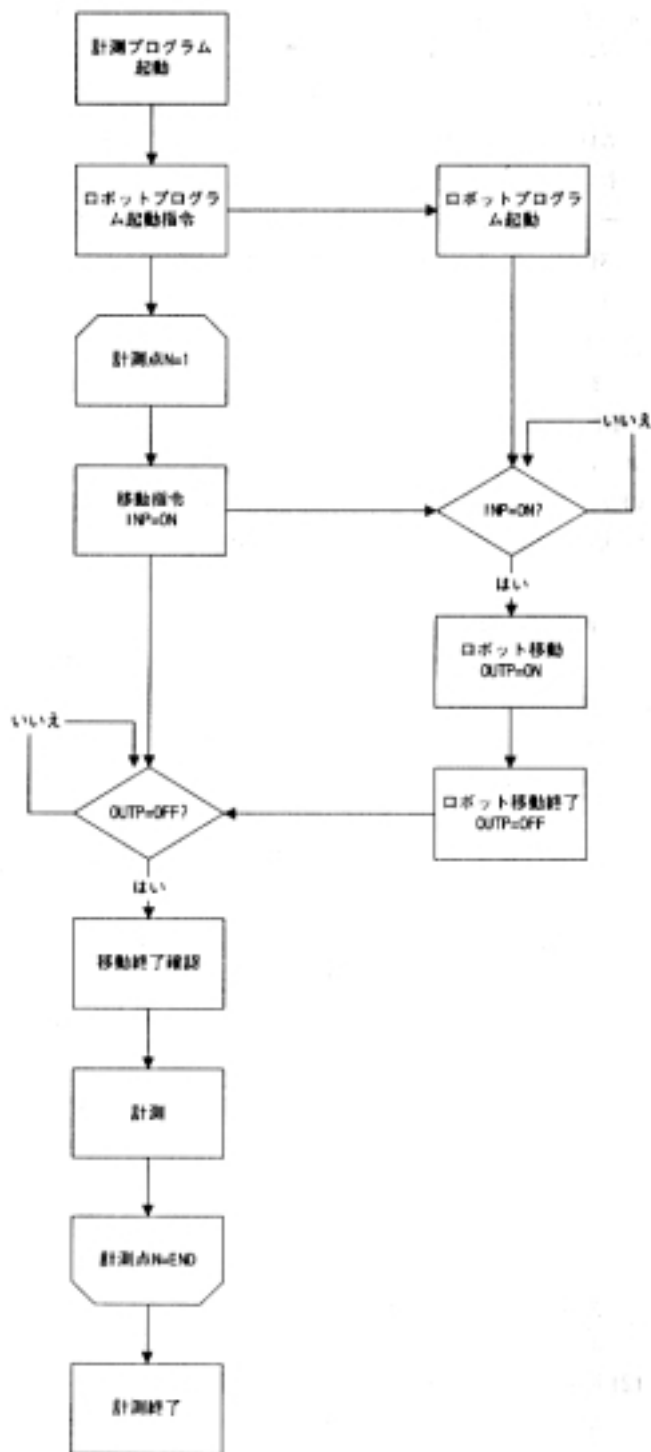


図 2-7 ハンドシェークフロー

3. 動的変位計測

3.1 計測フロー

図 3-1 に動的変位計測の流れを示す。

3.2 計測機器準備

ロボット、レーザ振動速度計(レーザ変位計)、ロボット

制御インターフェース、コンピュータ、フロントエンド、(必要であればプリンタ)、各種計測機器(加振器やチャージアンプ等)の各装置の設置等の準備を行う。

3.3 ロボットティーチング

自動データ収集処理を行うために、ロボット制御装置により、予め計測点のティーチングを行い、ロボット制御プ

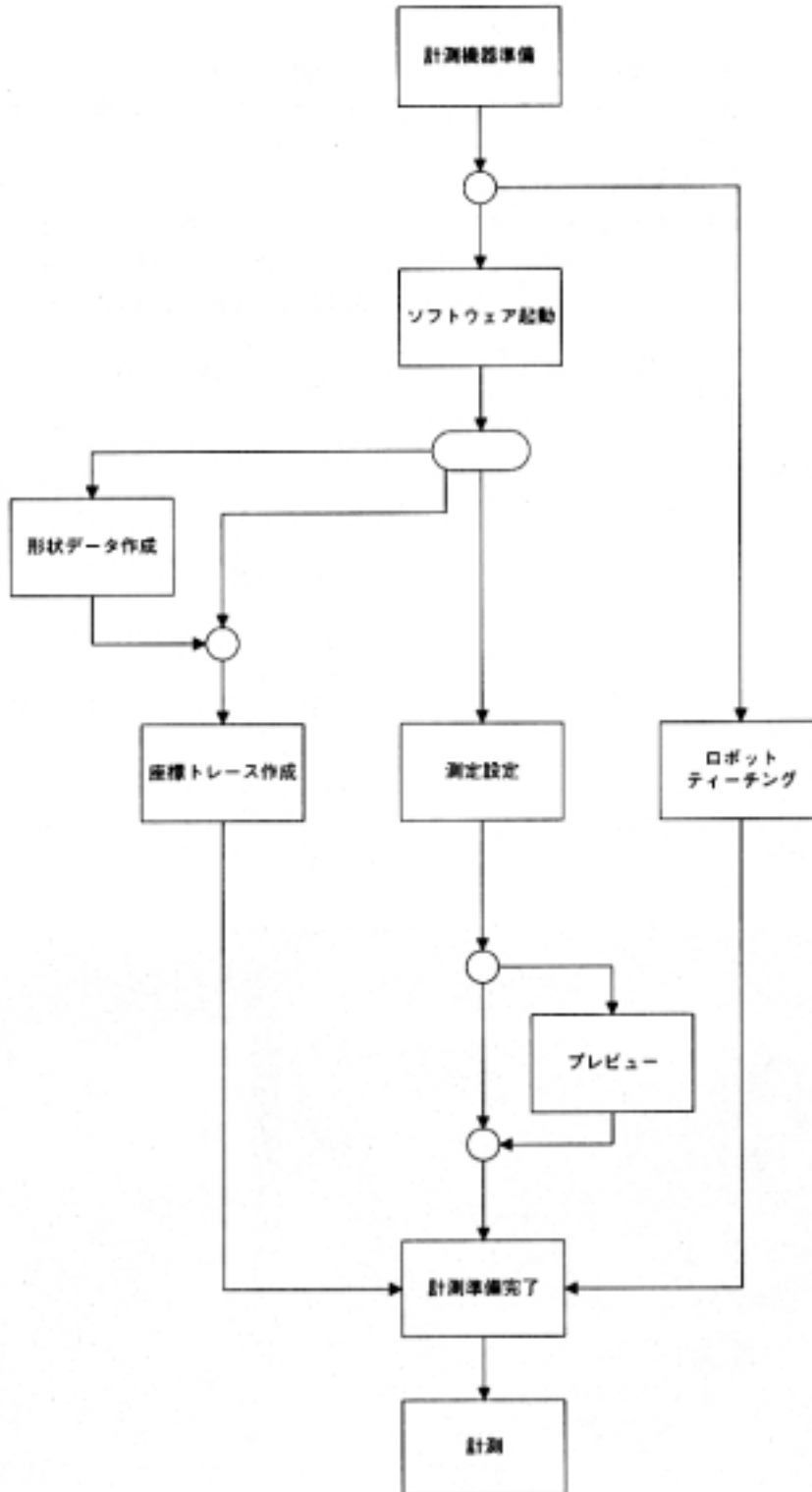


図 3-1 計測フロー

プログラムを作成する。作成は、ロボットのプログラミング機能を利用して行う。ロボット制御盤内のコンパートメントに格納されているプログラミングユニットを用いて、ジョイスティックによる手動制御でセンサのレーザ光と測定点を確認しながら位置合わせを行う。移動方法及び速度はジョイスティックの傾き方向および傾き角度、あるいはジョイスティックの回転および回転量によって制御する。測定位置合わせが終了すると位置制御命令としてメモリーに記憶させ、次の計測点の位置合わせを行う。この動作を繰り返し、測定点全点について測定順に記憶させる。

ロボット制御プログラムはメインプログラムとサブプログラムの2種類で構成される。それぞれ図 3-2、図 3-3 に示す。メインプログラムの 10 ~ 30 は基本命令であり、基本移動速度、センサに対応した TCP の指定、座標系の設

定を行う。40 行はロボットの移動開始・停止等のコンピュータとハンドシェイクを行うためのサブプログラムの呼び出し、50 行は位置制御命令である。

3.4 ソフトウェア起動

3.4.1 フロントエンド用プログラム起動

フロントエンド用のリソースマネージャおよび計測用ドライバを予め起動する。

3.4.2 I-DEAS 起動

I-DEAS を起動すると I-DEAS スタートダイアログ(図 3-4)が表示される。

I-DEAS スタートダイアログでは、以下の設定を行う。

- (1) プロジェクト：開発計画、担当部門、担当者など、データを一括りのグループとしてまとめる単位。新規に作成する場合は新規プロジェクト名を入力する。
- (2) モデル・ファイル：形状情報を基本とした CAD, FEM, TEST の主要情報を内部にもつ、I-DEAS の最も基本的なデータ単位。新規に作成する場合は新規モデルファ

```

PROG10 TCP 0 FRAME 0
RECT COORD V=1000 MM/S          100%
-----
10 V=100 MM/S MAX=1000 MM/S
20 TCP 0
30 MODRECT COORD
40 CALL PROGRAM 100
50 POS V=100% FINE
60 CALL PROGRAM 100
70 POS V=100% FINE
80 CALL PROGRAM 100
90 POS V=100% FINE

```

図 3-2 ロボット制御メインプログラム

```

PROG100 TCP 0 FRAME 0
RECT COORD V=1000 MM/S          100%
-----
10 RESET OUTP1
20 WAIT UNTIL INP1=1
30 SET OUTP1
40 WAIT UNTIL INP1=0

```

図 3-3 ロボット制御サブプログラム

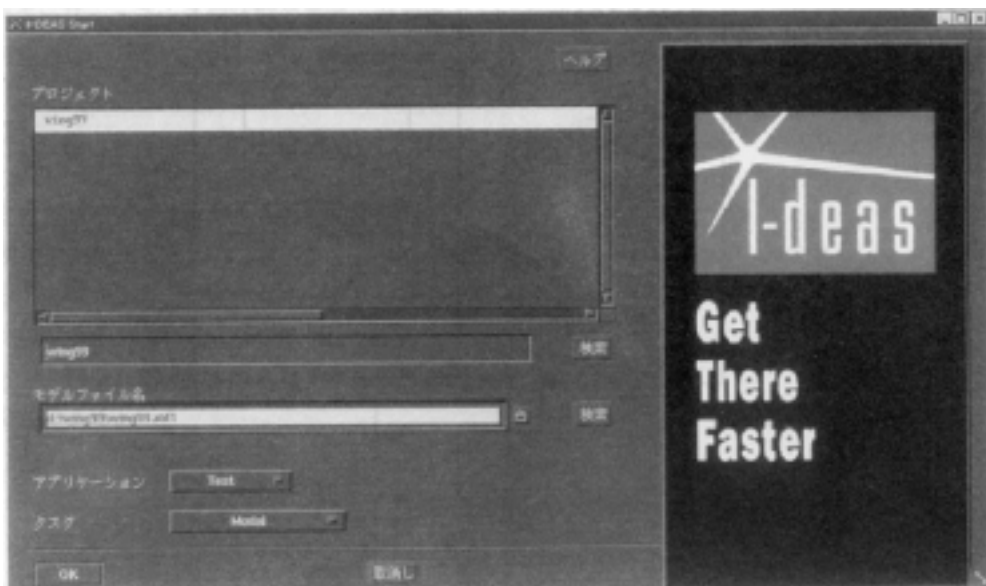


図 3-4 I-DEAS スタートダイアログ

イル名を入力する。

- (3) アプリケーション：Design, Simulation, Test など、I-DEAS の機能の大分類。ここでは、Test を選択する。
- (4) タスク：Time-History, Signal-Processing など、個々のアプリケーションがもつ機能の詳細分類。計測を行うには Signal-Processing を、モーダル解析を行うには Modal を選択する。

3.5 I-DEAS に関して

3.5.1 アイコン

I-DEAS は設定のほとんどを画面右端のアイコンを選択することで行う。アイコンは縦 14 行、横 3 列ある。以降、選択するアイコンを(行、列)で表記する(図 3-5 参照)。また、アイコンの中にはサブメニューを伴うものがあり、この場合、アイコンをマウスの左ボタンでクリックし続けるとサブメニューが表示される。サブメニューは縦数行から構成されており、サブメニューを選択する場合は、以降、(行、列、サブメニュー行)と表記する。

3.5.2 単位系の指定

メニューのオプション / 単位系から選択することで、必要に応じて単位系を変更できる。

3.6 形状データ

形状の作成・修正等はタスクを Modal-preparation に切り換えて行う。Modal-preparation に切り替えたときのアイコンメニューを図 3-6 に示す。

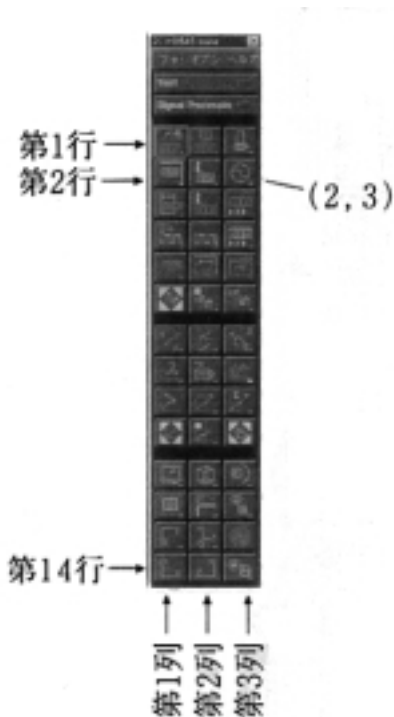


図 3-5 アイコンメニュー

3.6.1 ノード作成

ノードの作成(1,3,1)を選択し、座標入力してノードを作成する。形状データにノード番号をつけて表示したいときは、Display Filter (3,7,1)で設定する。

3.6.2 トレース作成

トレースの作成(2,3,1)により、ワイヤフレーム・モデルを作ることができる。

3.6.3 エlement作成

Element作成(3,3,1)により、面を定義することができる。定義を行うことにより解析結果をカラーコンタで表示することができる。

3.6.4 局所座標系

必要によっては、局所座標系の設定(3,6,1)を使ってノード毎に個別の変位座標系を定義することができる。自動計測は、後述の座標トレースに格納されたノードについて、X方向から昇順(小さい番号から大きい番号へ)に、Xが終わるとY、Yが終わるとZ方向というように行われるため、ロボットのティーチングプログラム上の計測点と対応がとるのに都合のよい局所座標系を定義しておく。

3.7 座標トレース

形状データのノードから、ロボットにティーチングさせたものと、その測定方向(同じノードでも、方向は3つあ



図 3-6 Modal-Preparation アイコンメニュー

る)に対応するものを、座標トレースとして作成、格納する。座標トレースは、計測点(ノード番号、ノードの計測方向)のリストである。自動計測はこの座標トレースに従って行われる。つまり、このリスト上の計測点とティーチングプログラム上の計測点に対応がとれている必要がある。

3.8 測定設定

測定設定はタスクを Signal-Processing に切り替えて行う。Signal-Processing に切り替えたときのアイコンメニューを図 3-7 に示す。

3.8.1 フロントエンド初期化

標準測定(1,1,2)から、フロントエンドとして、HP VXI 1432 FRONT END を選択し、フロントエンドを初期化する。

3.8.2 測定条件の設定

全体セットアップ (1,2,1) を選択すると、Setup サブウィンドウ(図 3-8)が表示される。



図 3-7 Signal-Processing アイコンメニュー



図 3-8 Setup サブウィンドウ

- (1) サンプリング：(サブウィンドウの 1,1 以下同様)でサンプリング条件を設定する。スペクトルライン、最大周波数を設定。図3-9にサンプリング設定画面を示す。
- (2) トリガー条件：(2,1)でトリガー条件を設定する。ランダム加振のときは、方法をフリーラン、パーストランダム加振のときは、方法をソース信号。図 3-10 にトリガー条件設定画面を示す。
- (3) オートレンジ：(1,2)でオートレンジを設定する。プレビュー前オートレンジ、収録前にオートレンジをとともにオン。図 3-11 にオートレンジ設定画面を示す。
- (4) タイムウィンドウ：(2,2)でタイムウィンドウを設定する。ランダム加振のときは、ブロード・ハニング、パー

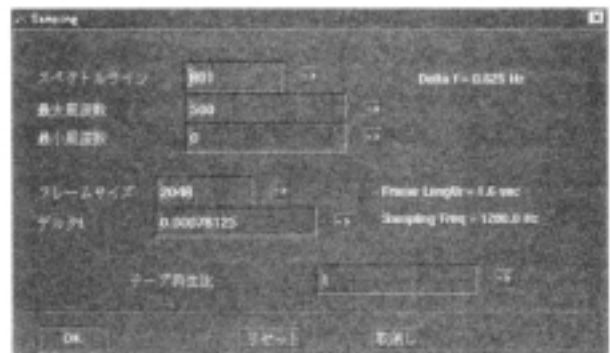


図 3-9 サンプリング設定画面

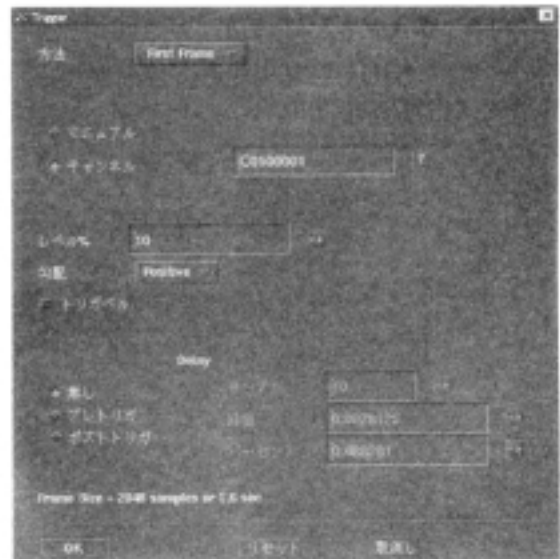


図 3-10 トリガー条件設定画面

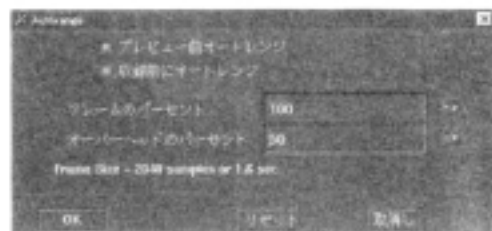


図 3-11 オートレンジ設定画面

ストラダム加振のときは、ウィンドウなし。図 3-12 にタイムウィンドウ設定画面を示す。

- (5) アベレージング：(1,3)で平均の設定を行う。平均方法、回数はノイズなど信号の状態によって適当なものを選ぶ。平均方法(フルム受入れ)は、自動を選択しオーバーロードを自動排除する。干渉割合ではオーバーラップのパーセンテージを設定する。オーバーラップにより、サンプリングが遅い場合に時間節約となる。図 3-13 にアベレージング設定画面を示す。
- (6) 収録条件：(2,3)で収録設定を行う。収録結果は FRF を選択。通常、正規化は単位系二乗を、振幅単位系は RMS を、FRF 法は H1 関数を選択するが、必要に応



図 3-12 タイムウィンドウ設定画面

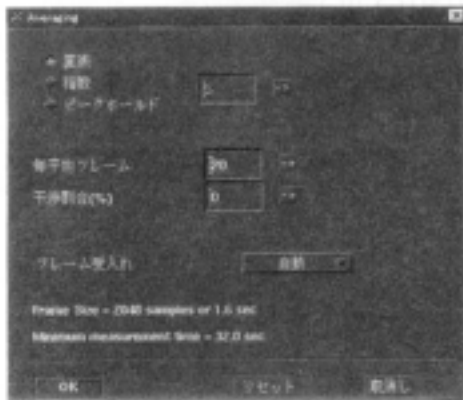


図 3-13 アベレージング設定画面

- じて変更する。図 3-14 に収録条件設定画面を示す。
- (7) リアルタイム表示：(1,4)で取込み中の表示の各種設定を行う。図 3-15 にリアルタイム表示設定画面を示す。

3.8.3 チャンネル設定

信号取り込みのチャンネル設定を行う。

- (1) チャンネル構成：(1,3,2)で構成を設定する。参照(ソース出力、パワーアンプ、加振器、力変換子経由の力信号)、応答(レーザ振動速度計、レーザ変位計等のアンプ経由の信号)の数を設定。自動計測ではセンサーは1個なので、応答の数を1にする。参照は加振の数だけ設定する。チャンネルの更新はセンサーを移動させる方法なので応答を選択、更新方法は座標トレースを選択。図 3-16 にチャンネル構成設定画面を示す。
- (2) チャンネル・テーブル：(1,3,1)でチャンネル毎の設定を行う。1点加振・1点応答の場合、チャンネル1については、座標は加振器の取り付けノードとその方向、

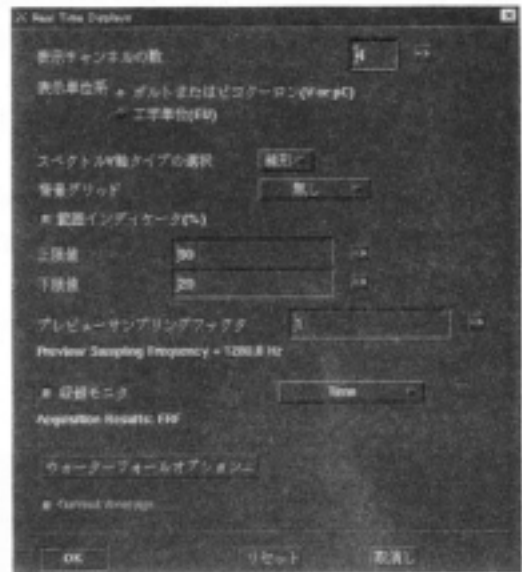


図 3-15 リアルタイム表示設定画面

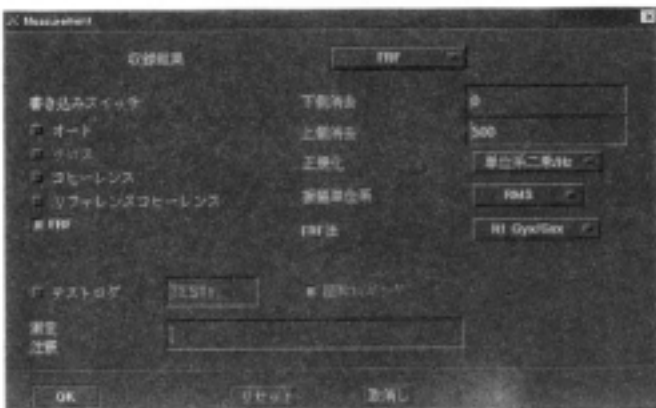


図 3-14 収録条件設定画面

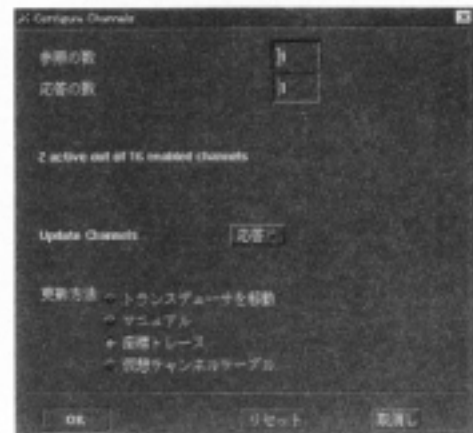


図 3-16 チャンネル構成設定画面

データタイプは加振力、トランスデューサ感度はチャージアンプの感度、カップリングは AC Coupling を選択。チャンネル 2 については、座標は最初の応答計測ノードとその方向、データタイプはレーザ振動速度計なら速度、レーザ変位計なら変位、トランスデューサ感度はアンプの感度、カップリングは AC Coupling を選択する。ただし、トランスデューサ感度は、絶対振幅が必要な場合にはセットするが、モードシェーブを見るだけなら不要である。図 3-17 にチャンネル設定画面を示す。

3.8.4 加振信号の設定

Source の設定 (3,2,1) で Source サブウィンドウ(図 3-18)を開き、加振信号の設定を行う。

- (1) 信号のタイプと特性：(サブウィンドウの 1,1、以下同様)で設定する。ランダム(最大周波数、サンプリングは、セットアップで決まる)またはパーストランダム(継続時間 + オフ時間 = 100%)。ソースランプは信号の開始、停止時に、段階的に増加、減少させ加振装置を保護するための設定である。図 3-19 に信号のタイプと特性設定画面を示す。
- (2) 出力信号レベル：(2,1)で出力信号の RMS レベルを選択。
- (3) 出力レベル調整：(1,2)で出力信号レベルの微調整を行う。出力の調整はパワーアンプのできるまで、一般的に細かい設定は不要。
- (4) ソースチャンネル情報：(1,4)で利用可能な出力チャンネルの現在の設定電圧レベルを表示する。

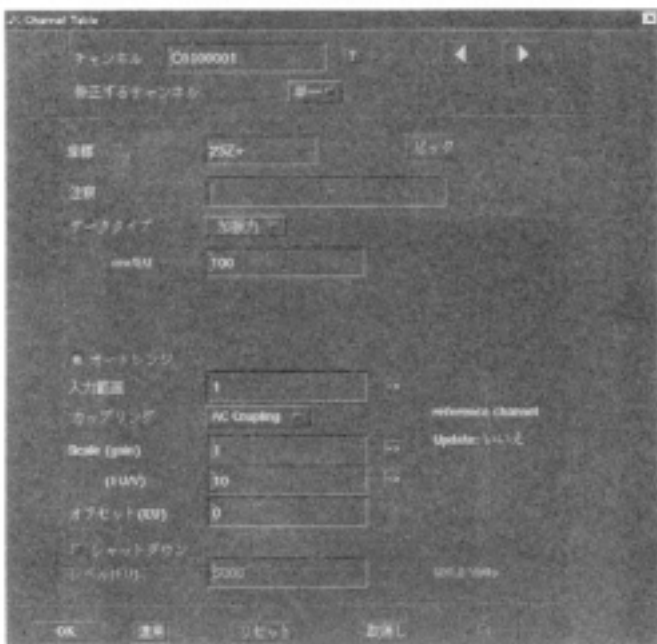


図 3-17 チャンネル設定画面

- (5) ソース信号のオン/オフ：(1,3)でソース信号の出力を開始、(2,3)で出力を停止する。パーストランダム加振の場合は計測開始前にソース信号をオンしておく必要がある。

3.9 プレビュー

必要であれば、加振位置付近、および加振位置より最遠点付近などのノードに、マニュアルでセンサーを移動し、加振した状態でオートレンジ・プレビュー (1,4,1) を行い、信号の良否を確認する。(2,4,1)はオートレンジなしのプレビューである。図 3-20 にプレビューを示す。

3.10 計測

3.10.1 ロボット準備

ロボットを待機状態にする。

3.10.2 計測プログラム起動

ユーザー定義サブウィンドウ(3,14,3)のサブアイコン U1 を選択し、計測プログラムを起動させる(計測プログラムが U1 に登録されている)。ユーザー定義サブウィンドウを図 3-21 に、計測プログラム起動画面を図 3-22 に示す。ここで、ティーチング情報が保存されているロボット制御装置側のプログラム番号と、入力待ち状態におけるタイムアウト値(項目 3.10.3 参照)を設定し、計測開始ボタンをクリックすることで、センサーは最初の測定位置に移動し一連の測定がスタートする。終了ボタンをクリックすると



図 3-18 Source サブウィンドウ

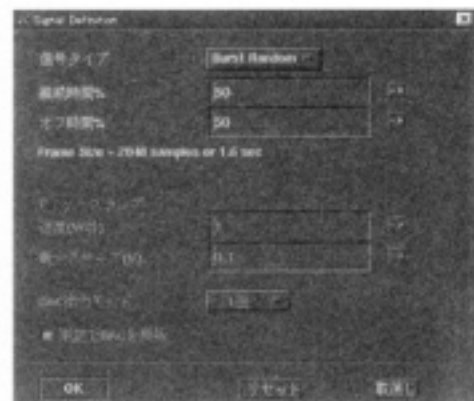


図 3-19 信号のタイプと特性設定画面

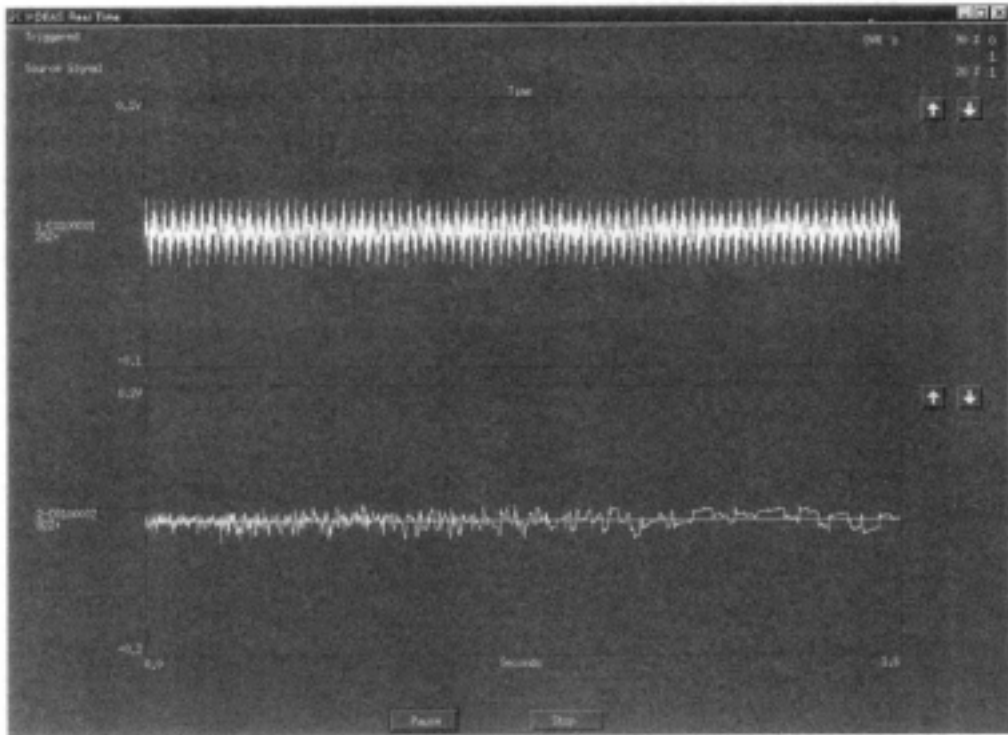


図 3-20 プレビュー



図 3-21 ユーザ定義サブウィンドウ



図 3-22 計測プログラム起動画面

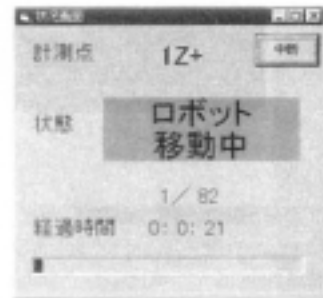


図 3-23 計測状況表示画面

終了ウィンドウが表示され、計測プログラムが終了する。

3.10.3 計測状況表示および計測状況表示画面

現在計測中のノード、状態、全計測点に対する測定累積点数、経過時間が表示される。計測状況表示画面を図 3-23 に示す。

状態には、以下の 4 種類がある。

- ・ ロボット移動中(緑色): ロボットが移動中であること

を示す。

- ・ 計測中(青色): 動的変位を計測中であることを示す。
- ・ 入力待ち(黄色): 入力待ち画面が開いていることを示す。
- ・ エラー発生(赤色): ロボットとのリンクにエラーが発生したことを示す。

エラーが発生した場合には、同一計測点を計測し直す。また、計測状況表示画面上の中断ボタンをクリックすることにより、状態が入力待ちに移行し、入力待ち画面が表示される。このときタイムアウト値は 3600 秒に設定される。これは計測の一時停止を行う場合に有効な機能である。(ただし最大で 3600 秒)。なお、ロボットが移動中であつたり、計測中であつた場合は直ちに入力待ちに移行することではなく、次の計測点での計測シーケンスに入る直前で初めて入力待ちに移行する。

形状が定義されている場合は、計測状況表示画面の後面

にはモデルが表示され、現在の計測ノードとその方向がベクトルで表示される。モデル表示画面を図 3-24 に示す。

3.10.4 入力待ちおよび入力待ち画面

一つの計測点での計測が終わる度に表示され、タイムアウト値が 0 までカウントダウンされる間、表示し続ける。タイムアウト値は計測プログラムを起動したときに設定さ

れた値が使用される。ただし、前項の計測状況表示画面において中断ボタンのクリックによって入力待ちに移行した場合は、タイムアウト値は一時的に 3600 秒に設定される。

入力待ちウィンドウには以下の 3 種類のボタンがある。

- ・ 同一計測ボタン : 同じ計測点での測定を繰り返す。
- ・ 次の計測ボタン : 次の計測点での測定を行う。
- ・ 終了ボタン : 計測を終了し、終了画面を表示する。

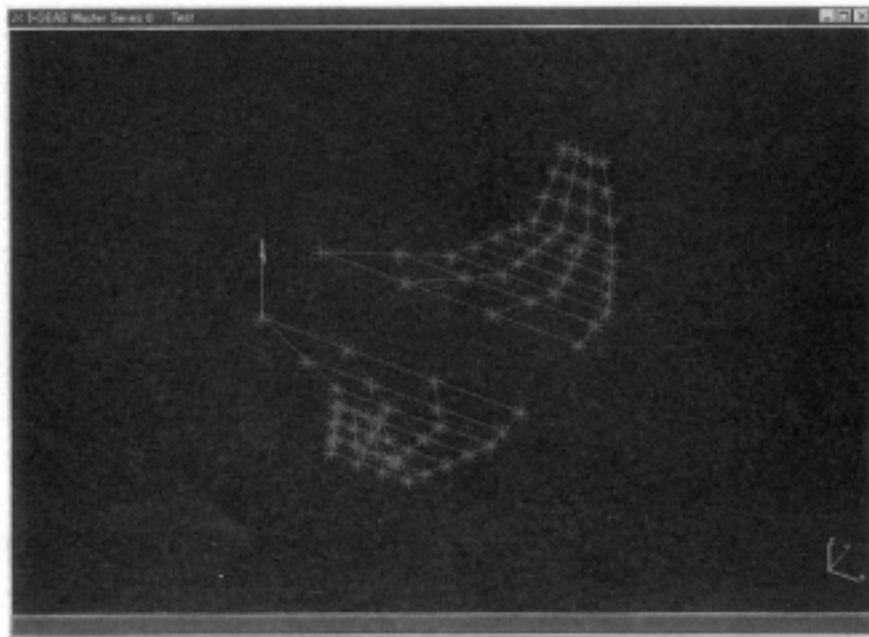


図 3-24 モデル表示画面

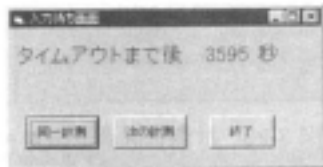


図 3-25 入力待ち画面

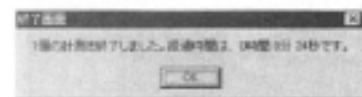


図 3-26 終了画面

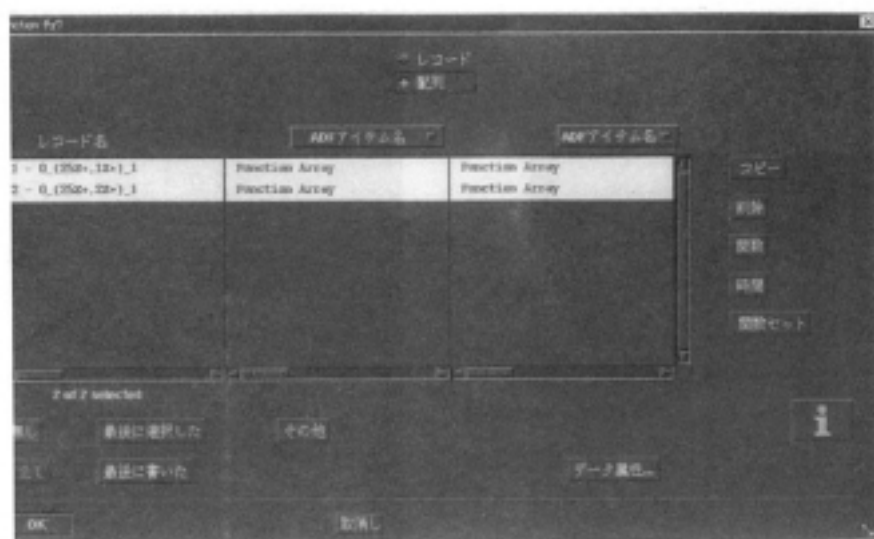


図 3-27 データ表示画面

入力待ちウィンドウを図 3-25 に示す。

3.10.5 終了および終了画面

全ての計測が完了、または入力待ち画面で終了ボタンをクリックすると、終了画面が表示され、計測点数と経過時間が表示される。ここで OK ボタンをクリックすると、終了画面が閉じて一連の計測が終了したことになる。終了画面を図 3-26 に示す。

3.11 データ保存

データの保存領域には「配列」と「関数」という概念があり、配列は一時的な領域で、関数はファイルである。計測が終了した時点では、計測データは全て配列に保存されている。よってデータ表示 (1,7,1) から、関数としてファイルに保存する。データ表示画面を図 3-27 に示す。

4. モーダル解析

4.1 解析フロー

解析フローを図 4-1 に示す。

4.2 モーダル解析

モーダル解析はタスクを Modal に切り替えて行う。Modal に切り替えたときのアイコンメニューを図 4-2 に示す。

4.2.1 参照点設定

モーダル解析に使用する参照点を (1,2,1) で確認する。必要があれば (1,2,3) で変更する。

4.2.2 モード識別法選択

モード識別法を選択する。通常、(1,1,5) のポリリファレンスを選択する。モード識別法選択画面を図 4-3 に示す。

4.2.3 モードインディケータ関数 (MIF) 計算

通常、多変量 MIF (2,1,1) を選択する。MIF 計算の選択画面を図 4-4 に示す。FRF のリストが表示されるので、MIF の計算に必要な FRF を選択し、下限周波数と上限周波数を決定して計算を行う。

4.2.4 相関マトリクス計算

ポリリファレンス法の相関マトリクスの構築 (2,2,1) により相関マトリクスを計算し、安定化線図を表示させる。安定化線図を図 4-5 に示す。

4.2.5 極選択

安定化線図から各モードの極を取捨選択する。

4.2.6 剰余計算

剰余計算 (2,3,1) を選択し、レジデューを求める。

4.2.7 モードシェイプ計算

ポリリファレンスシェイプ (3,3,6) を選択し、ポリリファレンス法によりモードシェイプを計算する。

4.2.8 MAC 値計算

MAC 作成 (1,5,1) により、MAC 値を求め、モードシェイプの線形独立性を確認する。MAC マトリクス図を図 4-6 に示す。

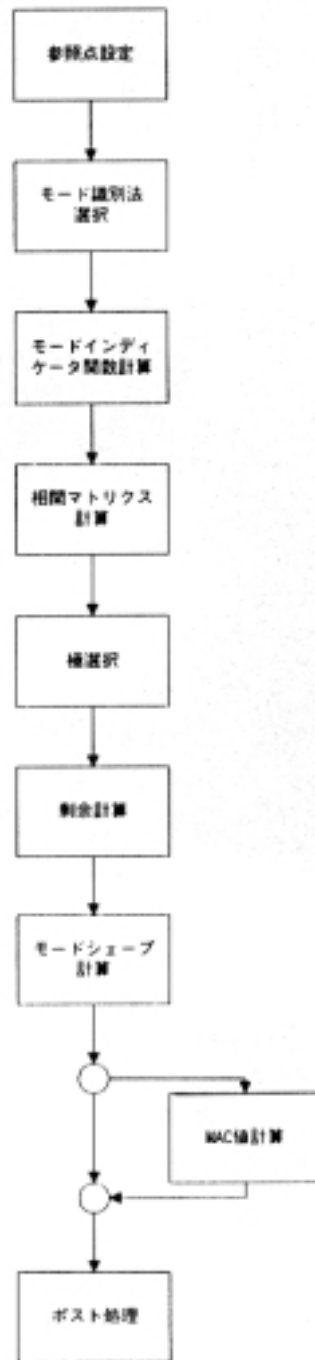


図 4-1 解析フロー

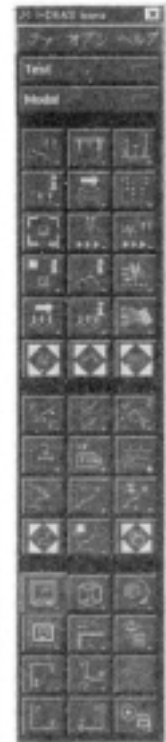


図 4-2 Modal アイコンメニュー



図 4-3 モード識別法選択画面



図 4-4 MIF 選択画面

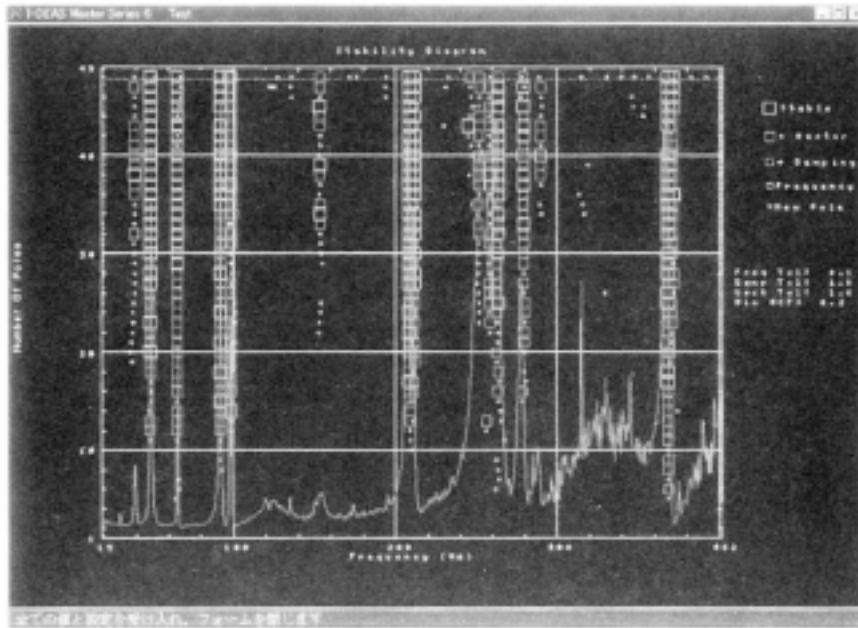


図 4-5 安定化線図

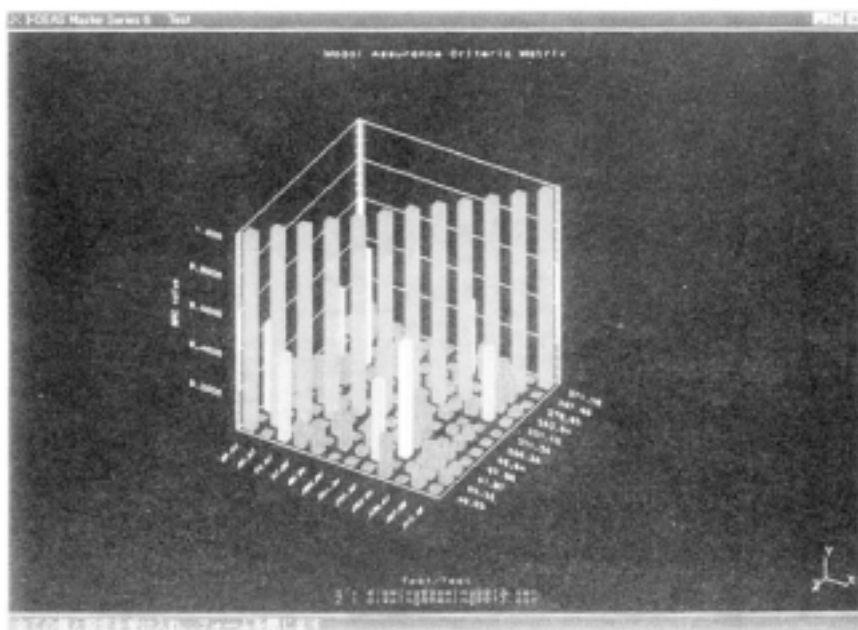


図 4-6 MAC マトリクス

4.3 ポスト処理

ポスト処理はタスクを Post-Processing に切り替えて行う。これによりモーダル解析結果をさまざまな画像で表示させることができる。次章のモーダル計測予備試験の結果のモード形状はこの機能により表示させたものである。

5. モーダル計測予備試験

5.1 概要

動的変位計測システムは完成時に動作確認試験を行っているが、その際に用いた供試体は形状が比較的単純であり、計測点も 16 点に過ぎなかった。その後ソフトウェア

の更なる機能改良、不具合除去を 3 ヶ月に渡って徹底的に行い、最終的な動作確認試験として風洞実験用全機模型(1999 年度模型)を供試体としたモーダル計測予備試験を行ったのでその結果について述べる。予備試験状況を図 5-1 に示す。また、旧システムにおいて同一形状の供試体(1997 年度模型)についての試験結果が存在するので、比較も行った。

5.2 供試体

予備試験に用いた供試体は遷音速風洞におけるフラッタ実験に使用する模型である。模型寸法を図 5-2 に示す。模



図 5-1 予備試験状況

型は胴体・主翼・チップフィン翼から構成され、胴体は GFRP により成形し、内部は支持装置の可動部が入るため中空である。翼は主翼部とチップフィン翼部とから構成され、芯材にはアルミ(7075-T651)が、表面成形には発泡材料(セキスイ社製フォーマック)が用いられている。主翼スパン長 200mm 翼根部コード長 400mm、翼端部コード長 120mm であり、スパン 80mm 位置において前縁および後縁クランクを有する。チップフィン部はキャント角 14° であり翼端部コード長 60mm となっている。翼型は主翼・チップフィン翼ともに NACA0010 である。主翼構造は、中心桁とリブ・ウェブから成り、中心桁(幅 10mm、高さ 12mm)で剛性を受け持つようにウェブ(板厚 1mm)は中心桁から切り離され、リブと一体である。主翼リブ(板厚は中心桁付近で 4 ~ 6mm、前後縁部で 2mm、リブ高さは翼型と同じ)は全部で 6 枚である。翼構造を図 5-3 に示す。チップフィン翼構造は主翼構造と同様に中心桁とリブ・ウェブから成っているが、スリットはない。チップフィン翼リブ(板厚は 1mm ~ 2mm)は 3 枚である。主翼部とチップフィン部とは剛結である。

1997 年度模型と 1999 年度模型は同じ設計図面から製作されたものであり、違いとしては、後者は翼の内部に非定常圧力センサを片翼 4 個づつ埋めこんでいる点と、主翼根に飛散防止用の金属ワイヤが追加されている点である。ただし剛性にほとんど影響を与えないように埋めこんでいる。

模型支持部の機構概要を図 5-4 に示す。ロール自由度を有するスティング支持装置に改修を施し弾性ばねを取り付けたものである。模型は可動部に直接取り付けられる。可動部はベアリングにより固定部に対しロール回転できる構造となっている。ロール運動に対する支持剛性は左右に取り付けた弾性ばねのディファレンシャルペンディングによ

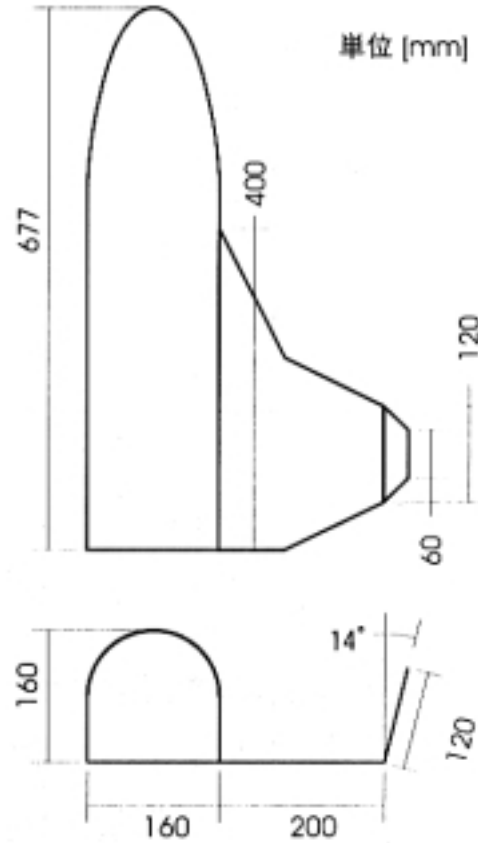


図 5-2 模型寸法

り与えられる。

予備試験では適当な弾性ばねを取り付けて、ロール弾性を有する状態と、ばね無しの場合のロール自由の状態とで試験を行った。

5.3 計測

試験方法は動電型シェーカーによる左翼の 1 点加振で、0 ~ 500Hz 帯域の 50% パーストランダム加振、アベレージングは 20 回である。主翼片側 25 点(加振点位置も計測)、チップフィン片側 16 点の全 82 点を計測した。また図 5-5 に左翼の計測点・加振点位置を示す。なお、1997 年度模型は 0 ~ 400Hz 帯域の 50% パーストランダム加振で行われた。帯域の違いはフロントエンドの設定制約の違いによるものである。他の条件は同じである。

5.4 解析

ポリリファレンス法により最大で 400Hz までのモードシェープを求めた。ロール方向が自由状態のものについては 8 モードを、ロール方向が弾性を有しているものについては 13 モードまでを求めた。フラッタ実験としての供試体の意味からすると 8 モード程度で十分であり、13 モードを求めたことについては高次モードの確信的な意味合いが強い。なお 1997 年度模型の LMS による解析では複素

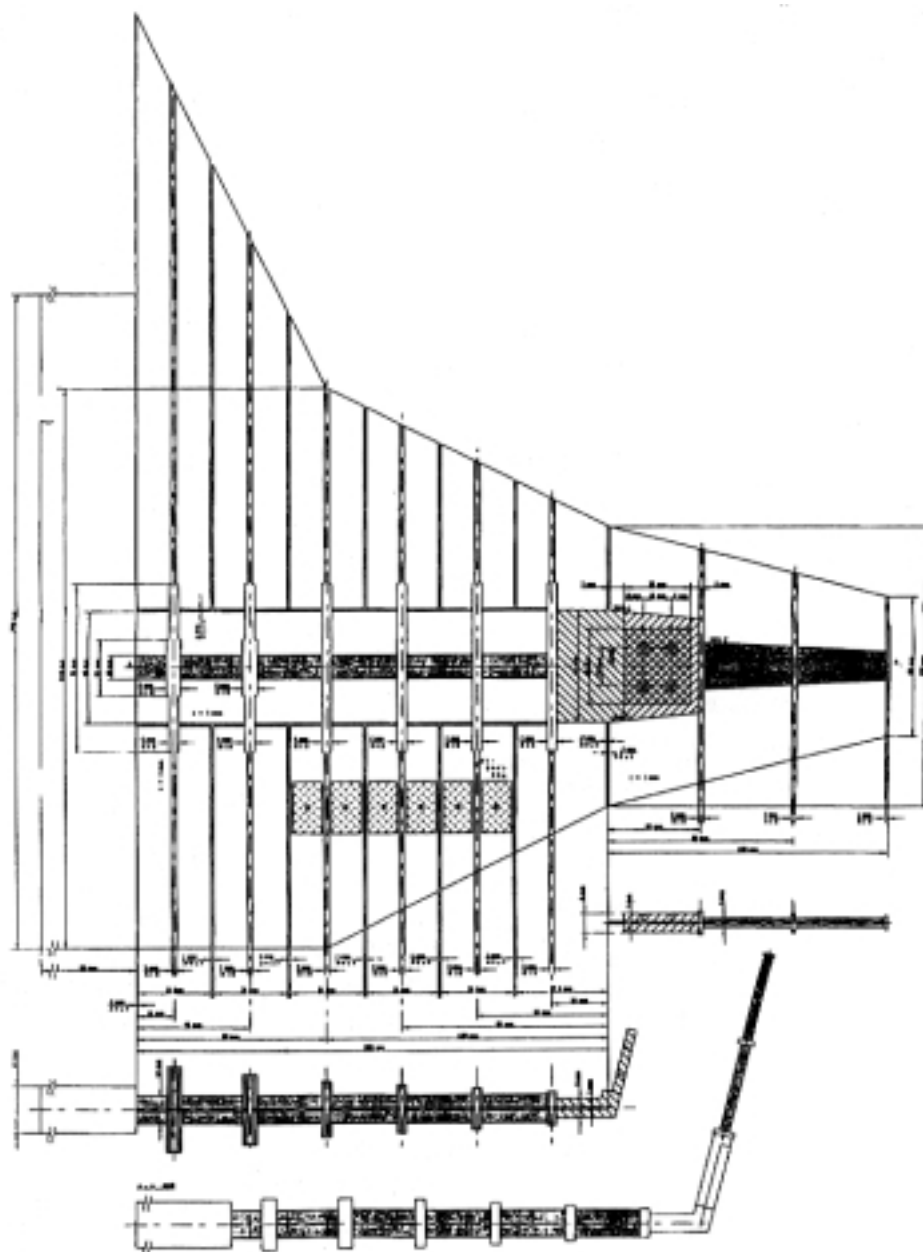


図 5-3 翼構造

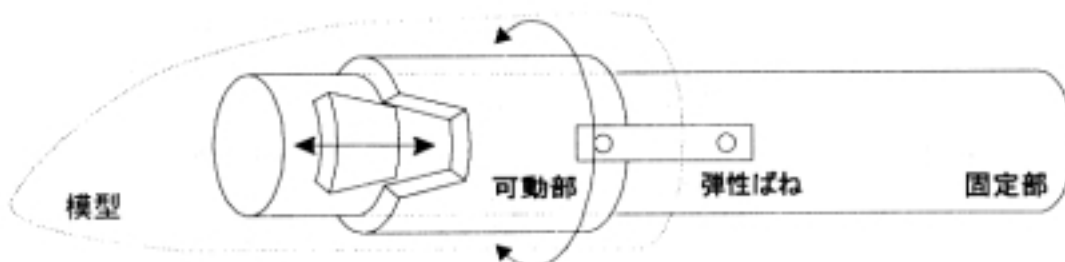


図 5-4 支持装置機構

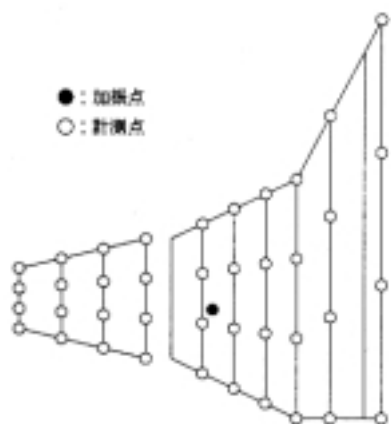


図 5-5 計測・加振点位置

指数法を用いている。

5.5 結果

求めたモードの MAC マトリクスをロール自由のものについて図 5-6、ロール弾性のものについて図 5-7 に示す。図中、左からモード 1,2,3...となっている。なおロール自由のものについては、モード 1 はロールモードであるが、剛体モードであるためシェーカーロッドの取り付けが影響し正確なデータではないこと、モード 2 は支持装置自体の弾性モードであることから、次に示す解析結果の表からは省いている。

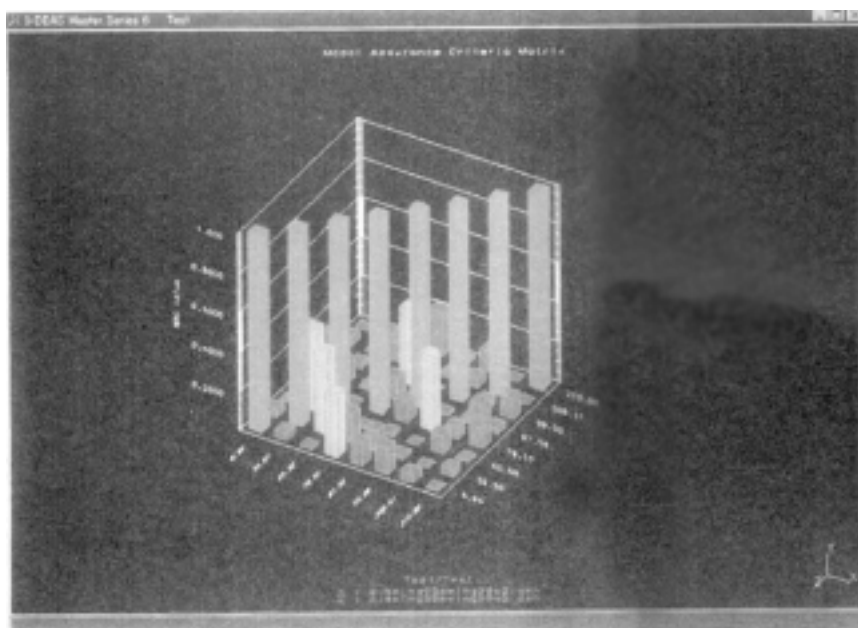


図 5-6 MAC マトリクス(ロール自由)

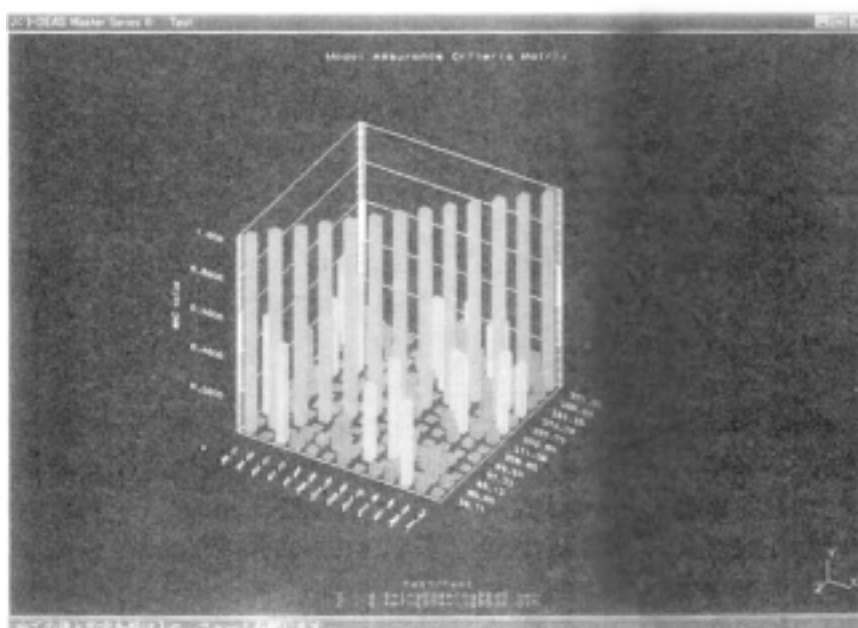


図 5-7 MAC マトリクス(ロール弾性)

表 5-1 振動実験結果(ロール自由、1997 年度模型)






	1	2	3	4	5	6	7
モード形	NO DATA				NO DATA		
振動数[Hz]	NO DATA	67	80	97	NO DATA	206	208
減衰率[%]	NO DATA	0.10	0.47	0.45	NO DATA	0.31	0.45

表 5-2 振動実験結果(ロール自由、1999 年度模型)







	1	2	3	4	5	6	7
モード形	NO DATA						
振動数[Hz]	NO DATA	66	79	98	99	209	211
減衰率[%]	NO DATA	0.12	1.01	0.37	0.43	0.52	0.62

表 5-3 振動実験結果(ロール弾性、1997 年度模型)















	1	2	3	4	5	6	7
モード形							
振動数[Hz]	40	67	86	97	98	205	208
減衰率[%]	2.67	0.12	0.34	0.53	0.23	0.32	0.28

表 5-4 振動実験結果(ロール弾性、1999 年度模型)

	1	2	3	4	5	6	7
モード形							
振動数[Hz]	40	66	85	98	99	209	211
減衰率[%]	4.30	0.14	0.50	0.34	0.34	0.61	0.81

解析より得られた結果をモード形状・振動数・減衰率について表 5-1 ~ 5-4 に示す。表 5-1 はロール方向が自由状態である 1997 年度模型、表 5-2 は同じくロール方向が自由状態である 1999 年度模型、表 5-3 はロール方向に弾性ばねを有している 1997 年度模型、表 5-4 は同じくロール方向に弾性ばねを有している 1999 年度模型の振動計測結果である。

表 5-1 のモード 5 は主翼の捻じりモードであるが、対称モードと逆対称モードの振動数がほとんど同じため、これらのモードをうまく分離できなかったためデータを得ることができなかった。

他のモードについては減衰率については全体的に 1999 年度模型の方が高くなっているものの、モード形状、振動数についてはほぼ一致しており更新した動的変位計測システムが有効に機能していることを確認することができた。

6. おわりに

新しい動的変位計測システムが有効に機能していることを確認した。今後このシステムを用いて振動試験を効率的に行っていく予定である。なお、本資料では動的変位計測およびモーダル解析に関する I-DEAS の細かい操作方法については割愛した。

参考文献

- 1) 外崎得雄、上田哲彦：動的変位計測装置と振動予備実験、航空宇宙技術研究所資料、TM-683、1995 年 5 月
- 2) 外崎得雄、上田哲彦：経年航空機の全機地上振動試験、航空宇宙技術研究所資料、TM-732、1998 年 10 月
- 3) 神田淳、外崎得雄、上田哲彦：ALFLEX 全機振動特性確認試験、航空宇宙技術研究所報告、TR-1370、1998 年 12 月