

ISSN 0452-2982
UDC 629.7.018.4
534.6.63
53.084.2
621.373.8
534.12

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-683

動的変位計測装置と振動予備実験

外崎得雄・上田哲彦

1995年5月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

1. はじめに	1
2. 動的変位計測装置	2
2.1 システム構成	2
2.2 機器性能	2
ロボット本体	2
制御装置	3
信号処理装置	5
レーザ振動速度計	5
レーザ変位計	5
2.3 解析ソフトウェア	6
モーダル解析	6
構造解析	7
2.4 位置再現精度測定試験	8
3. モーダル振動予備実験	8
3.1 実験手順	8
データの自動収集	9
モーダル・パラメタの推定	9
3.2 実測例	11
4. おわりに	15
参考文献	16

動的変位計測装置と振動予備実験*

外崎 得雄*¹ 上田 哲彦*¹

Preliminary Vibration Tests Using the Dynamic Displacement Measurement System

T. Sotozaki*¹, T. Ueda*¹

ABSTRACT

A system to efficiently conduct modal vibration tests is introduced. A laser Doppler sensor or a laser reflect sensor can be used to measure respectively dynamic or static displacements without any contact with the testing structures.

The system utilizes a factory robot as an accurate positioner for the measuring sensors. The test procedure is automated in sequential control with the host computer which is linked to the robot. Preliminary modal tests using this system were conducted on a cantilevered plate wing with a folding angle of 30° in the middle of the span. The test demonstrated that a considerable amount of time can be saved by this system.

Key words : modal analysis, laser sensor, displacement, robot

概 要

モーダル振動試験を効率的に行うためのシステムを開発した。動的変位測定と静的変位測定には、それぞれに非接触型のレーザ・ドップラ・センサあるいはレーザ変位センサを使用する。測定センサの正確な位置決め装置として、産業用ロボットを導入した。試験の手順においては、ロボットにリンクしているホスト・コンピュータによりシーケンス制御を行いデータ取得の自動化を図った。このシステムを用いたモーダル予備実験を、折れ曲り角のある平板翼について行い、大幅な実験の効率化が図られる事を実証した。

1. はじめに

航空機の開発改修時あるいは、模型を使った動特性風洞試験時には、予め構造体の振動特性を知ることが必要である。このために行われるモーダル振動試験では一般に、センサの移動取り付け、座標の設定などに多くの時間が費やされ、通常試験飛行や実験に向けてのタイトなスケジュールのなかで行われるため、その効率化が常に求められてきた。そこで、構造物の外面の法線方向変位を効率よく検出するためのシステム(動的変位計測装置)を開発した。

変位検出センサには、供試体の動特性に影響を与えないようレーザを使った非接触型センサを用い、検出センサの

位置決め装置として、三次元物体に柔軟に対応できる6軸の高精度組み立てロボットを導入した。この装置の組合せと汎用ソフトウェアとを用いて、モーダル振動試験におけるデータ収集の自動化を行った¹⁾。

本装置は、最大2.5mの半径の移動範囲をもつため、実機にも十分対応でき、試験の効率化に役立つ。また、センサを特定するものではなく、10kg以下であれば取り付けことができ、三次元位置決め装置として用途の多様性もかね備えるものである。

本稿では、開発したシステムの計測装置、ソフトウェアおよび自動化したデータ収集機能とそれを用いて行ったモーダル振動実験の実例について述べる。

* 平成7年3月8日 (received 8 March, 1995)

*1 機体部 (Airframe Division)

2. 動的変位計測装置

2.1 システム構成

図1にシステム構成図を示す。センサの位置決めを行うのは、Pana Robo ABB IRB-3200ロボットで、本体、架台と制御装置から成っている。重量は本体のみ700kg、鋼盤架台の上に取り付けられており総重量1.3tで構造実験場内でハンドパレットトラックを用いて移動することが可能である。ロボットは、この制御装置を用いて、プログラム制御、手動制御及び外部制御により位置決めを行う。データ収録及びデータ収集コントロールは、HP-9000シリーズの375CHワークステーションで行う。加振アナログ信号発生および検出信号のA/D変換は、信号処理装置SCADAS SC16-16で行われ、375CHとはIEEE-488によりリンクしている。変位検出センサとしては、レーザ振動速度計(B & K 3544)あるいはレーザ変位計(Selcom 2203)を用いる。これらは、いずれもレーザを用いた非接触方式で、簡単にロボット先端で交換取り付けができるようになっている。

このシステム構成により、①検出器位置設定、②荷重負荷、③変位測定、④データ取込、といったモダル試験や静的荷重負荷試験に必要な繰返しシーケンスを自動的に行うことが可能となる。

2.2 機器性能

ロボット本体

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。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10kg、動作自由度は、図2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1に示す。動作範囲は図3に示す通りで、ロボットのベース下や、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・ストップも用意されている。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%の速度ロックをはずさずに運用する。実際は、更に制御プログラムの位置制御命令で減速速度指定して用いている。位置再現精度公称値は、±0.2mm以下である。これについては、ベンチテストを行ったので後述する。

また、安全機能にも配慮が払われている。自己管理機能をもつ2重の回路を持ち、常にその回路を監視し、回路間に違いを検知した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とじ込め、ロボットモータの電源を遮断するとともにブレーキを掛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、非常停止釦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

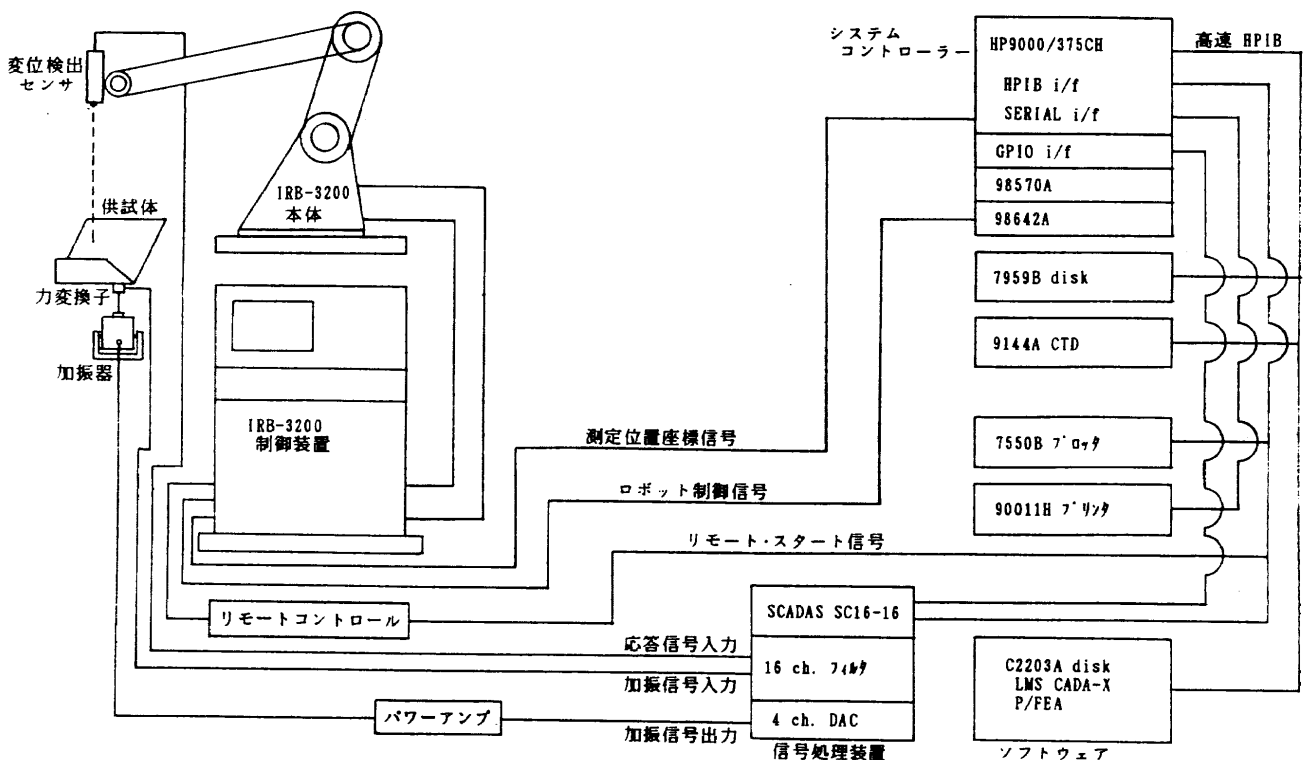


図1 システム構成図

表1 ロボット本体仕様

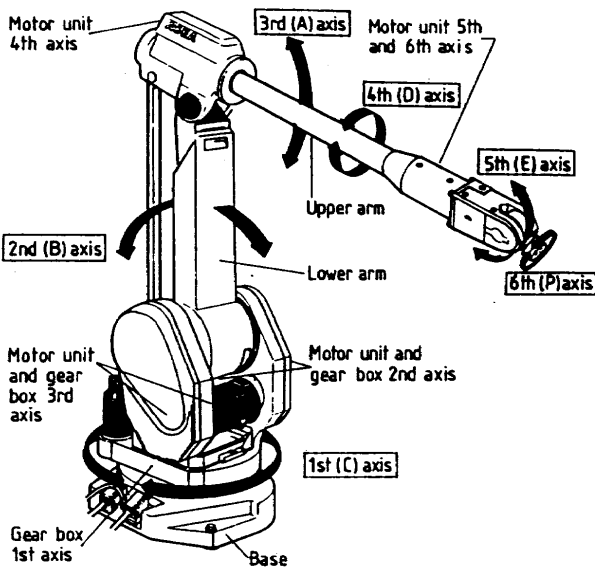


図2 可動部の構成

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
腕旋回	1軸	±180°	106°/s
腕前後	2軸	+ 90° / -110°	100°/s
腕上下	3軸	± 60°	87°/s
腕ひねり	4軸	± 200°	223°/s
手首曲げ	5軸	± 120°	300°/s
手首ひねり	6軸	± 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	3 m/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点記憶する(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		

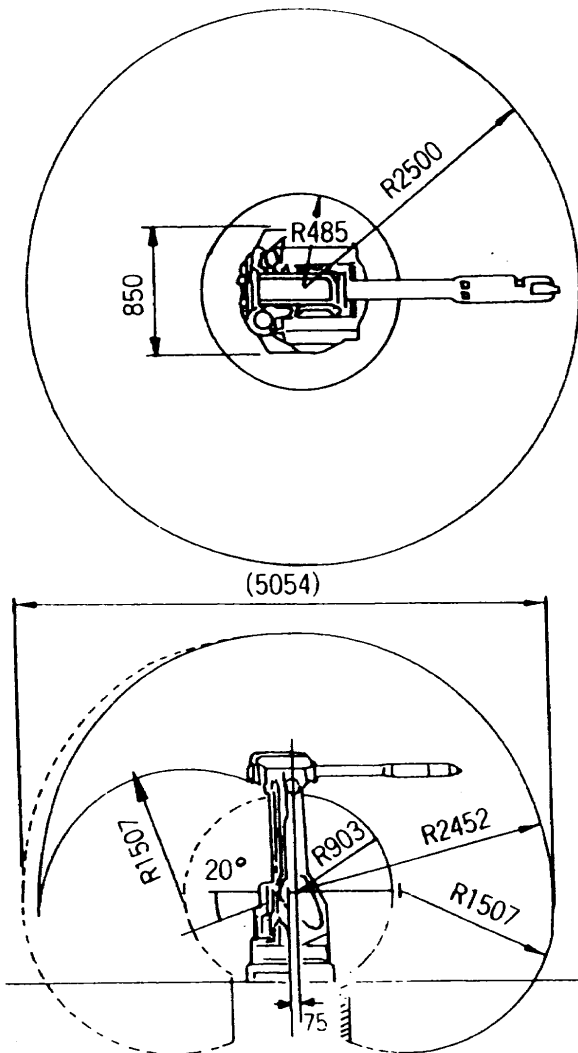


図3 外径寸法と動作範囲

用するプログラミングユニットにはセフティーパ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引出して使用する場合にはセフティーパットスイッチを常に指等で圧力を掛けてONの状態を保持しておくことが必要である。この圧力を取除くことにより、セフティーパットスイッチはシステムを速やかにワークストップ状態にする。セフティーストップ回路の断絶によりシステムは、セフティーストップ状態になる。システムに、非常停止、ワークストップおよびセフティーストップ等が発生した場合にも、システムをスタンバイ状態にとじ込める。

制御装置

IRB-3200 制御装置は、制御盤筐体内に定電圧装置と共に収納されている。制御装置の仕様を表2に示す。図4に筐体の構成と各部の名称を示す。①ロボットの立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ー・ディスク・ユニット等から成っている。制御装置のCPU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に、3,000命令までプログラムが可能で

表2 制御装置仕様

項目	仕様
制御方式	PTPブレイバック6~12軸同時方式
教示座標	1. ロボット座標 2. 直行座標 3. 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	1Cメモリ、標準32kワード(64kバイト)
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 対話方式
TCP	固定: 1個、可変設定: 19個、0~1,290mmの範囲内
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" フロッピィディスク
レジスタ機能	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
バッテリーバックアップ	1,000時間
消費電力	運転時: 2kw、スタンバイ時: 0.3kw
重量	300kg
寸法	800×600×1700(mm)
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

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IEEE-488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、直行、手首直行或いは工具直行座標が有り、プログラミング時は、その中から三者択一式押ボタンにより最適の座標選択を行う。このうちのロボットあるいは直行座標が位置

移動に頻繁に使用される。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、直行座標は、アーム先端の姿勢を変える事なく2点間を直線移動する。実際の測定プログラムのティーチングに、直行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の一致が、正確で容易に行える。ロボットの最小移動量は0.1mmで精密な位置合せが可能である。

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なく同一測定プログラムで、同一位置の測定が容易に可能となる。TCPは、0~1,290mmの範囲で、19種類設定できる。

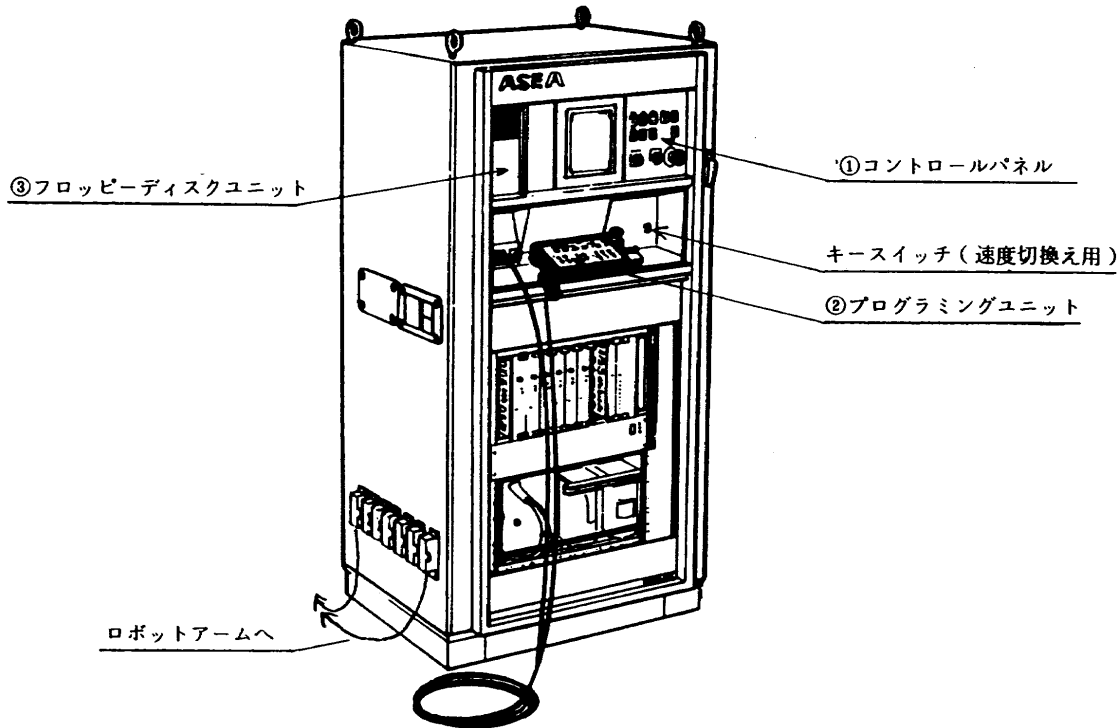


図4 制御盤匡体

信号処理装置

SCADAS SC16-16は、4チャンネル無相関任意デジタル信号の作成と発生、D/A変換、16チャンネル信号増幅、A/D変換、プログラム可能なローパスフィルタ等のデジタル信号処理機能を有している²⁾。また、1Mワード高速バッファを備えており、スループット・データ収集信号処理に用いられる。インターフェイスは、高速データ転送用パラレル・データ・インタフェース、IEEE-488、RS-232Cを持ち、375CHとリンケージをとる。これによりCADA XのフロントエンドとしてCADA TESTのフーリエ・モニタ・ユーザプログラミングと組合せて、任意加振信号の発生、加振コントロール、データ処理のカスタマイズが可能になる。

性能は、以下の通りである。

無相関ランダムノイズ発生器	4 ch.
D/A変換分解能	16 bit
変換速度 (4 digits)	4 μ s~1s
A/D変換分解能	12 bit
変換速度 (1ch.)	2.5 μ s
高速バッファメモリー	1Mワード
ローパス・フィルタ (80dB/oct)	16 ch.
アフタフィルタゲイン (ゲイン 1, 2, 5, 10)	16 ch.

レーザ振動速度計

B & K 3544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~1,000mmと広い設定許

容範囲を持つ。光源は、低出力(1mW以下)のHe-Neレーザ、レーザ安全規格クラスII (BS4803)に適合している。測定時、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 μ m/s~1,000mm/s、赤色可視光である。スポット径は約1mmで、測定点の設定は容易である。検出振動数域は、0~20kHzである。センサ先端に角度ミラーアダプタを備えている。これは、レーザ光軸を偏向させるために使用する。偏向範囲は、上下に30°~95°、ミラーのハウジングを回転することにより、360°全周に亘って偏向が可能である。これを利用することにより、風洞の床面に固定したセンサの光軸を90°回転して風洞内側壁に固定された翼模型等の振動速度を直接測定することが可能となる。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。

レーザ変位計

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。静的変位を対象にしたもので、測定範囲が動作距離180mmを中心に \pm 32mmのものを使っている。動的特性としては0~2kHz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。これにより、測定面のキメ、温度、密度、色合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難くしている。したがって、材質の異なった物質表面の変位も精度よく連続して測定することができる。

2.3 解析ソフトウェア

モーダル解析

HP375CH に組込まれたモーダル解析ソフトウェアの基本は、測定された基準となる点と他の測定点の2点間の振動数領域における伝達関数から、後処理で全体特性を描出するものである^{3,4)}。そのソフトウェアは LMS CADA X シリーズで、図5に示すように、CADA TEST, CADA ANALYSIS, CADA MODAL および CADA LINK の4つのソフトウェア・ライブラリーとそれを管理するカーネルで構成されている。

CADA TEST は、実験データの収集、信号処理を行う、機能を持つカーネル。

CADA ANALYSIS は、データ操作、データ処理、データ表示等の静特性解析機能を持つカーネル。

CADA MODAL は、ジオメトリの設定、モーダル・パラメタの推定、モーダル・モデルの検証等の動特性解析機能を持つカーネル。

CADA LINK は、実験解析と FEA (構造解析プログラ

ム)との間の相関解析用の機能を持つカーネルである。

CADA X ソフトウェア・ライブラリーでは、操作中に2種類の外部データ構造を使用する。カーネル・データ・ベースとプロジェクト・データ・ベースである。カーネル・データ・ベースは、動作環境設定や各カーネルを適切に動作させるためのデータのストアに使用する。プロジェクト・データ・ベースは、図6に示すように、実験プロジェクトに対する各カーネル・ソフトウェアの処理解析結果をストアするために使用する。データ収集処理結果はテスト・セクションに、モーダル解析結果はアナリシス・セクションに、供試体の形状データはジオメトリー・セクションにストアされ、結果の表示、処理解析、検証等に使用される。

このシステムは、UNIX オペレーティング・システムによる32ビット・ワークステーションに基づくコモン・プログラム、コモン・データベース、コモン・ユーザ・インタフェース構造となっている。このためモジュールの追加、外部とのファイルの比較が容易である。

これらの機能の実行には、メニュー・モード、コマンド・モード、オートシーケンス・モードがある。更に、データ収集とオンライン・リアルタイム信号処理ソフトウェアには、CADA TEST の操作モードであるフーリエ・モニターのソフトウェア・モジュールである3種類のモード、ブロック・インプット・アクイジション (BIA)、スループ

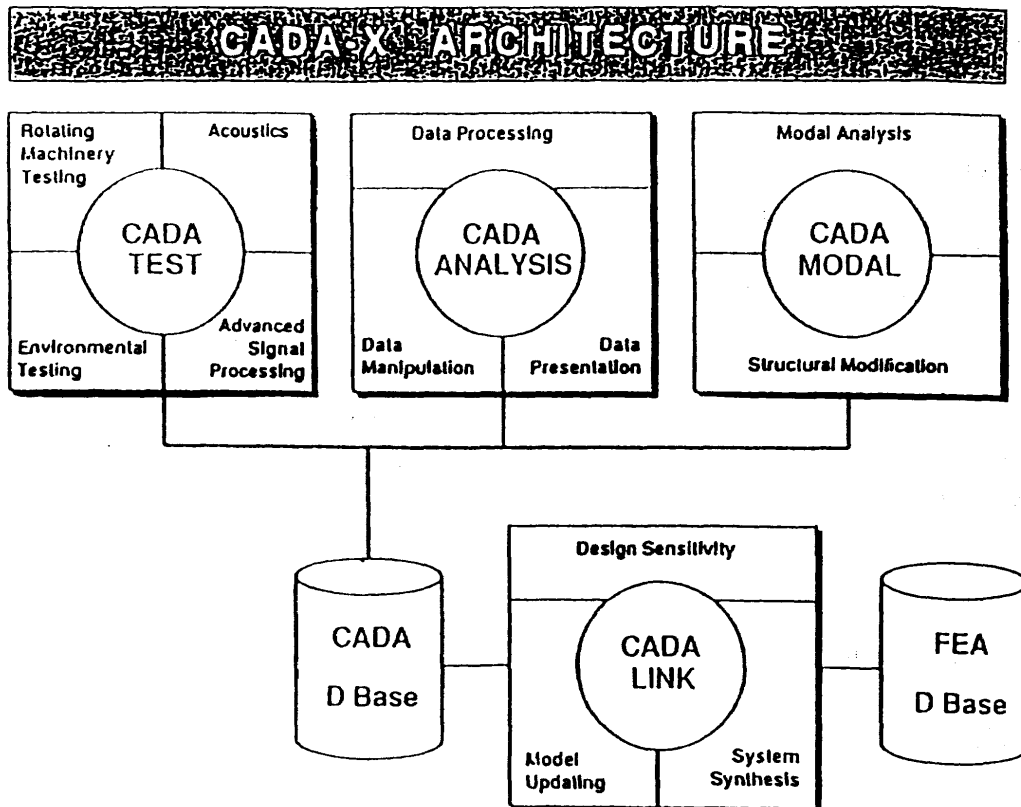


図5 LMS CADA-X ソフトウェアライブラリー構成

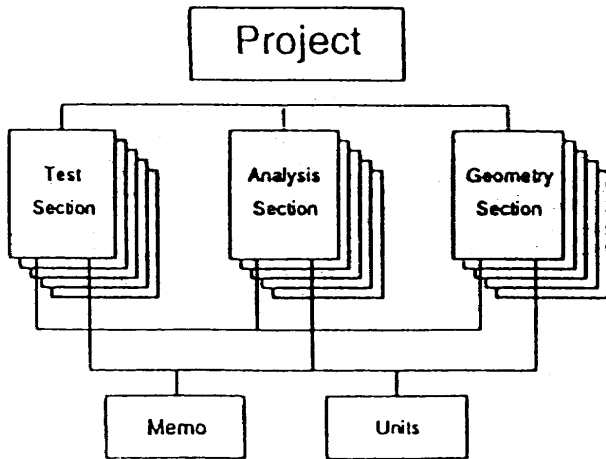


図6 プロジェクト・データ・ベース構成

ット、アキュイジションとプロセッシング、ユーザ・プログラマブル・アキュイジション・モード^{5,6)}がある(図7参照)。このうちのBIAモードを用いて、測定設定とリアルタイム信号処理をメニューモードにより対話形式で行う。測定の実行は、2つの異なる段階で行う。まず、測定設定を行う段階では、必要とするデータ収集と信号処理のパラメータをメニューによって選択する。次に、測定の実行段階では、収集した時系列データにリアルタイム信号処理を行い指定した設定関数を求める。途中結果はオンライン・ディスプレイ機能によりCRTモニター上に出力し内容の監視ができる。データ測定の際同じ関数は、指定設定段階へ戻ることなく、測定結果に新しい識別コードを与え、次々にデータ収集する。所謂シーケンス処理を行うことができる。このシーケンス処理の自動化に、ユーザ・プログラマブル・アキュイジション・モードを用いて、データ収集や信号処理の実行、接続されている計測器のコントロール、CやFORTRAN等のプログラム言語で開発された他のプログラムのスケジュール、データコミュニケーション等を行う。これらの手順をユーザコマンドを用いてカスタム化し、データ取込みの手順を自動的に実行するコマンドをスケジュールする。このユーザ・プログラマブル・アキュイジション・モードとユーザ・コマンドを利用してIRB-3200ロボットのコントロール、データ処理装置のコントロール、測定点座標の転送等をカスタマイズしたプログラムを作成した^{7,8)}。その構成は、LMSの専用言語であるユーザ・コマンド・スタック・プログラム(UCS)1個と、C言語のロードモジュール・プログラム(C)3個から成っている。その名称と機能は、以下の通りである。

- measure (UCS) : データ収集処理用メイン・プログラム
(テストID, ロボットIDの選択, データ収集用)
- mcredit (C) : 測定条件設定用エディタ
(加振点, コンポーネント名, 測定開

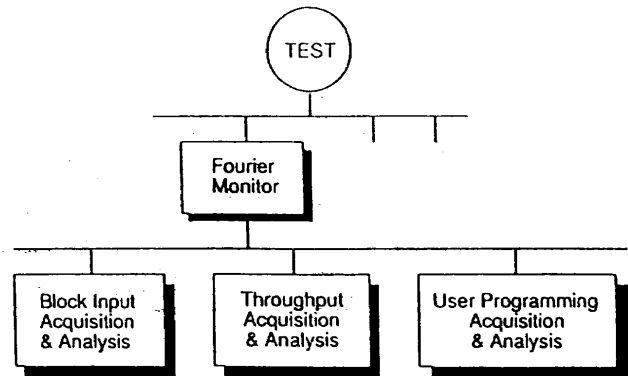


図7 データ収集処理ソフトウェア

- 始点, 終了点, 変位測定方向等の設定)
- irbcomm (C) : 対 IRB3200 通信用サブ・プログラム
(IEEE-488, IRB-3200 デジタル I/O インタフェース, RS232C インタフェース座標データ転送)
- mkuniv (C) : ユニバーサル・ファイル作成用サブ・プログラム
(ワイヤフレーム作成用ジオメトリデータ)

これらのプログラムは、メインプログラム“measure”から呼出されて実行される形式になっている。

構造解析

構造解析ソフトウェアは、米国 PDA Engineering 社の構造解析用ソフト P/FEA とその専用プリポストプロセッサである PATRAN Plus から構成されており⁹⁾, CADA X とは図8に示す通り、ニュートラルファイルを介して相関解析を行う事ができる。その性能は次のとおりである。

解析機能

- 線形静解析
- 非線形静解析
 - 幾何学非線形(大変形を含む)
 - 材料非線形
- モーダル解析
 - サブスペース法
 - ハウスホルダー法
 - ランチェス法
- 線形時刻歴応答解析
 - 直接法
 - モード法
 - 減衰, 非減衰
 - 時間ステップサイズの自動, 手動選択
 - 一定あるいは可変の時間ステップ
- 定常熱伝導解析
 - 熱解析から静解析の自動リスタート可能
- 座屈解析

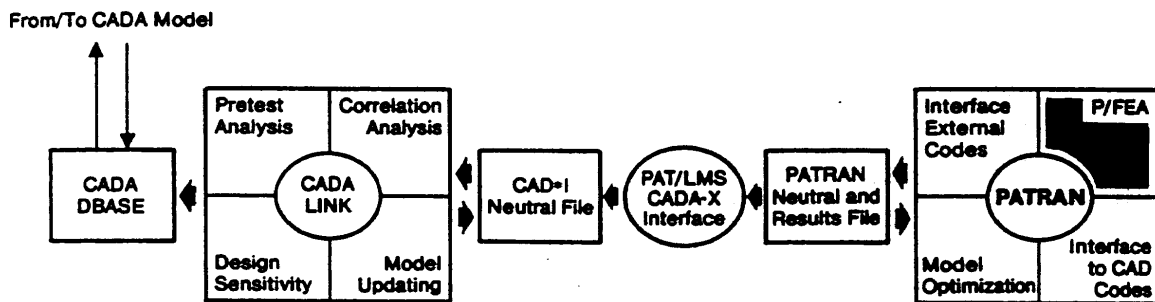


図8 ソフトウェアリンクージュ

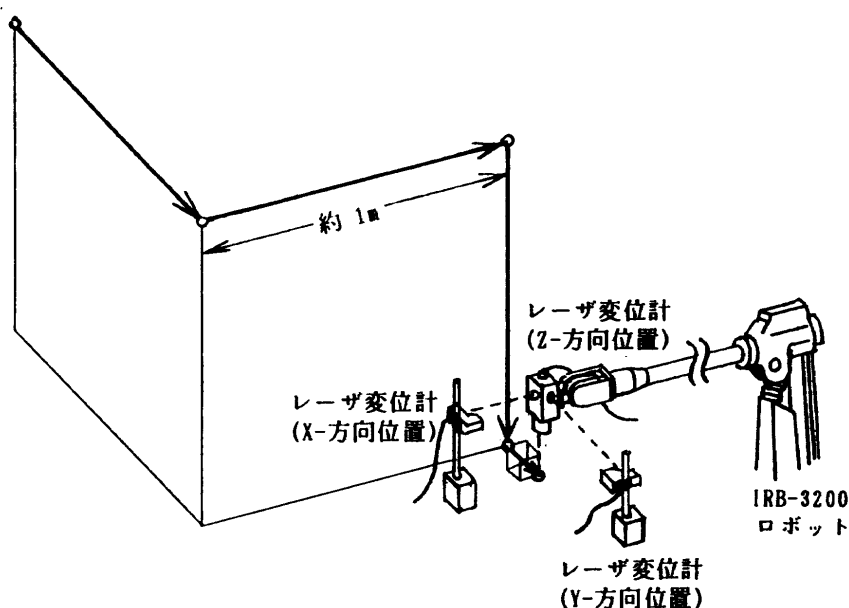


図9 繰返し移動位置の測定

ジョブのリスタートが可能である。

操作は、コマンドまたはメニューモードにより行う。

2.4 位置再現精度測定試験

本システムの実行において、検出センサ位置決め装置の精度はデータ収集解析のうえで直接データの質に影響を及ぼすため非常に重要な要因である。特に、静的変位のデータ収集においては、データに直接誤差を与える事になる。IRB-3200の許容誤差は、 $\pm 0.2\text{mm}$ 以下の仕様であるが、この値を確認することを目的として実際に繰返し誤差の測定実験を行った。実験は、ロボットの移動に直行座標を用い、図9に示すようにX, Y, Z方向約1m間隔の三次元空間位置4点を移動させた後、更に、X, Y, Z方向に約1mm移動し停止させた。この動作を50回繰返し、元に戻った時の各方向位置をレーザー変位計を用いて非接触で測定し、データロガーに記録した。繰返し移動時の位置のプロットと標準偏差の値を図10に示す。この結果をみると、位置のずれが最大で約 0.07mm (Y方向)、X, Y, Z各方向の標準偏差はそれぞれ $\sigma_x = 0.0134$, $\sigma_y = 0.0201$, $\sigma_z = 0.0139$ と

非常に高い精度を示している。これにより、センサを数十回移動しても位置決め精度が十分保持され、静的変位を測定する場合でも通常の構造試験においては、 0.1mm 以下の精度で使用可能であると考えられる。振動試験においては、センサは光軸に垂直方向の振動変動成分を検出するためこの精度は測定位置の精度に影響するのみでデータに直接誤差としては入らないことがいえる。

3. モーダル振動予備実験

3.1 実験手順

今回作成したカスタマイズ・プログラムには、測定設定データ収集条件および供試体の応答測定位置を記憶したロボット・ティーチング・プログラムに関して自由度を持たせた自動データ収集プログラムになっている。プログラム実行に当たっては前以って作成した任意の測定設定ファイルとティーチング・プログラムを選択し、測定条件設定後開始することになる。測定設定ファイルとティーチング・プログラムの例を付録1と付録2に示す。

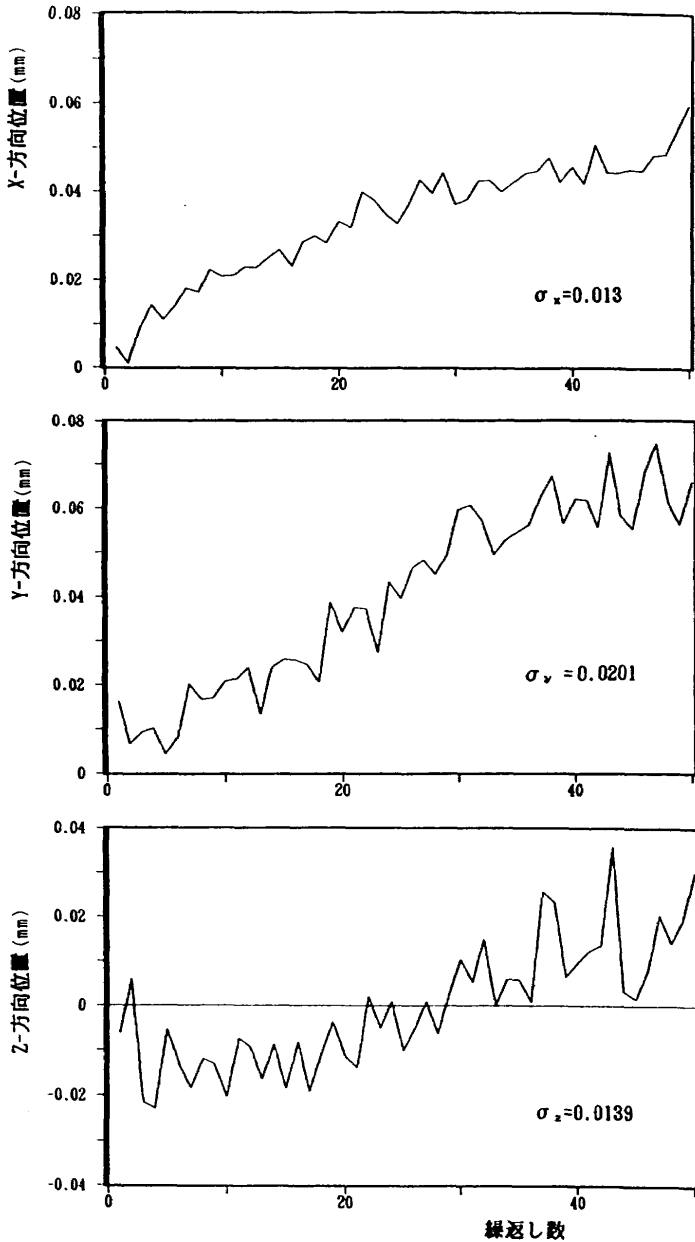


図10 位置再現精度測定結果

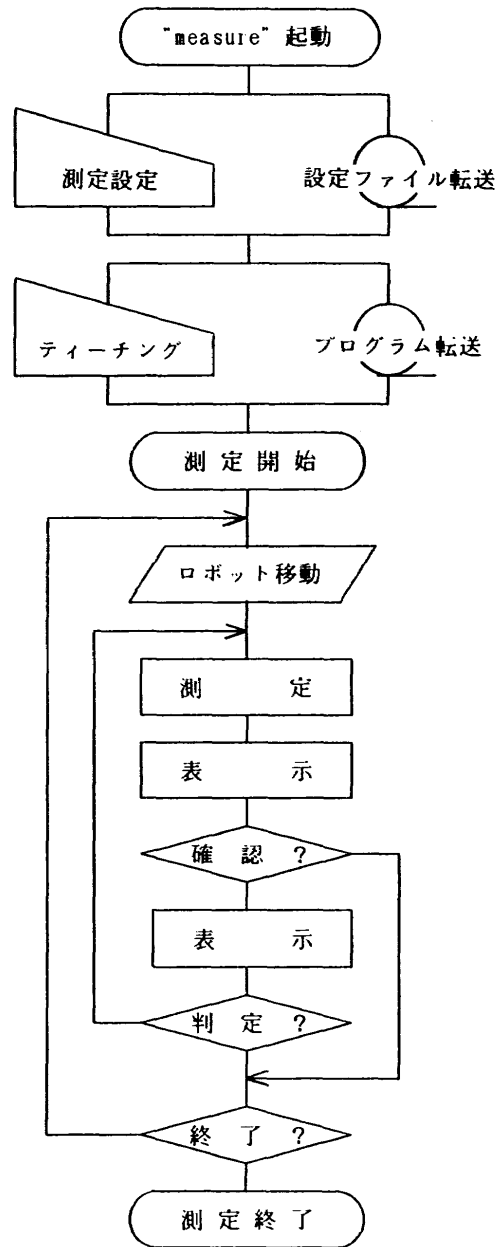


図11 データ収集の流れ

データの自動収集

データ収集の流れを図11にモーダル解析に使用したCADA Xソフトウェア構成の概要を図12に示す。

- ① プロジェクト・ファイル“wing”オープン
- ② 自動データ収集用カスタマイズ・プログラム“measure”を起動
- ③ データ測定設定ファイル“test”の選択
- ④ 収集データの測定条件設定“mcedit”ファイル作成
- ⑤ ロボット・ティーチング・プログラム“No.10”の選択
- ⑥ 測定開始
- ⑦ 収集データのモニター
- ⑧ 指定関数データを取得“test”へセーブ

モーダル・パラメタの推定

パラメタ推定のためのソフトウェア操作の流れを図13に示す。

- ① プロジェクト・ファイル“wing”オープン
- ② ジオメトリ・ファイル作成，コネクティビティの設定（ワイヤフレーム作成）
- ③ “CADA MODAL”を起動
- ④ モーダル解析に使用する“test”ファイルを選択
- ⑤ “test”からモーダル解析に使用するデータを設定
- ⑥ モーダル・パラメタ，モード・シェイプ・データ格納用ファイル“analysis”作成
- ⑦ モーダル・パラメタ推定法の選択
- ⑧ モード・シェイプ係数推定法の選択

- ⑨ モーダル・パラメタ, モード・シェイプ・データを “analysis” へセーブ
- 以上の手順により, モーダル振動試験を効率良く行うこと

モーダル解析する FRF のある test を含む “Project” をオープン

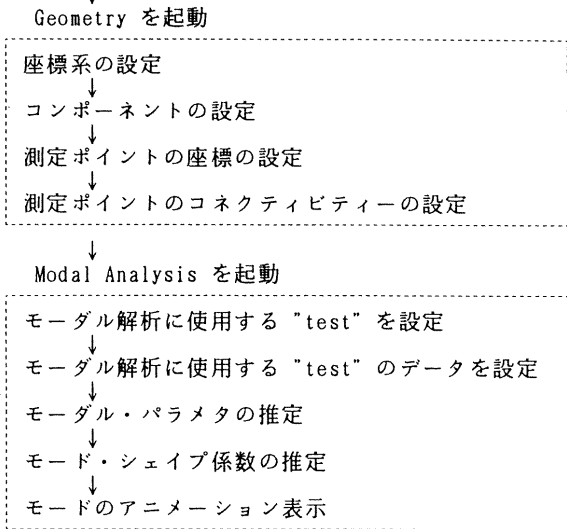


図13 モーダル・パラメタ推定の流れ

とができる。

3.2 実測例

本システムは, すでにその機能の一部を動特性試験において, 有効に使われている¹⁰⁾。装置機能の検証として, 折れ曲り角のある板翼について振動予備実験を行った。実験の状況を図14に示す。供試体は, 固定架台の上に5本のボ

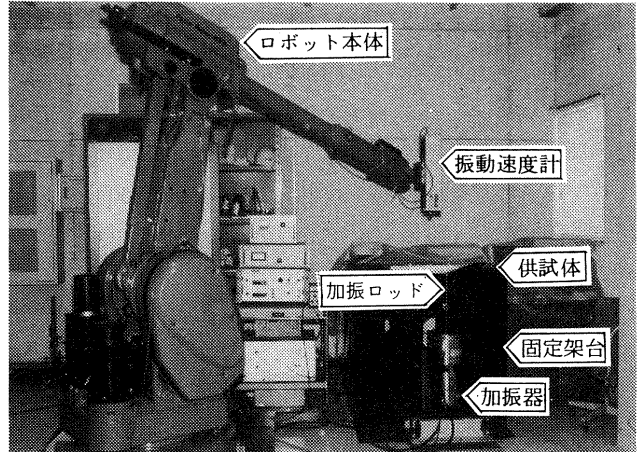


図14 実験の状況

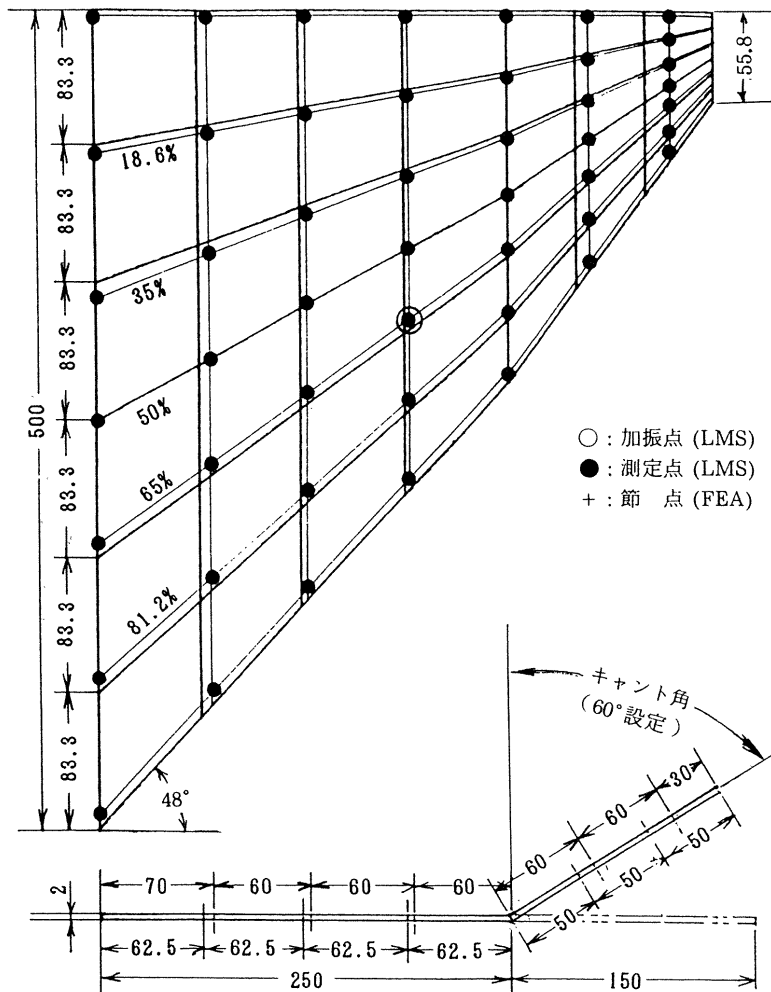


図15 供試体諸元

ルトを用いて片持ち状態で固定した。供試体の板厚は、2 mm のアルミ合金製で、諸元を図15に示す。図中に黒丸で示されているように測定点を49点設け、レーザ振動速度計の反射効率を上げるため測定点中央に反射テープを貼付した。二重丸になっている点は加振点である。加振は、シェイカーにプッシュロッドを取り付けロッド他端の先端に力変換子を介して供試体にネジで固定した状態で行った。応答測定センサには、供試体の動特性に影響を与えないように非接触レーザ振動速度計を用いた。測定方向成分はチップフィン部を含めて常に測定面に垂直方向成分のみを測定した。実験は、バーストランダム1点加振による各測定点間の周波数伝達関数を求める方法を用いた。平均化30回によりデータ収集した例で、計測所要時間は、約50分であった。この時の測定設定ファイルの概略を表3に示す。

実験はまず、測定実験に対するプロジェクト・ファイル“wing”をオープンし、測定設定ファイル“test”とロボッ

トのティーチング・プログラム“No.10”を選択する。自動データ収集のためのカスタムファイル“measure”を起動する。測定条件の設定ソフト“mcedit”が自動的に立ち上がり、加振点、測定開始点、終了点、測定条件等の設定を行う。設定終了後、測定開始キーにより自動収集開始。測定条件に従ってセンサの移動、加振、データ収集、データ処理、測定位置座標の転送、記録のシーケンス処理が行われ、同時に各測定点毎にCRTモニター上に測定データ（時系列、スペクトル等）がオンライン表示される。図16には、加振信号と応答信号の時系列モニター例について示す。全測定点の周波数伝達関数が自動的に求められ、テスト・セクション・ファイル“test”にセーブされる。

次に、測定条件設定用エディタ“mcedit”で作成した設定データと測定中に読込まれる測定点座標とに関連付けられ、モーダル解析ソフトウェアで読み可能な供試体の形状情報をジオメトリ・セクション・ファイル“geo. unv”に作成する。

次に、“CADA MODAL”を起動し、解析に使用する“test”ファイルを選択し、その中からモーダル解析を適用する周波数伝達関数データを編成する。モーダルパラメタ推定法に最小二乗複素指数法を選択した例について示す。測定したデータの周波数範囲内について、伝達関数の実部、虚部、振幅比の総和を計算し、共振現象の強調をディスプレイで確認する。図17は、振幅比について出力した例である。このディスプレイを用いて解析の対称とする周波数範囲を指定し、その範囲についてフーリエ逆変換を行い、コバリانس・マトリクスを構築する。コバリانس・マトリクスを用いて解析データに存在するモード数を推定する指標となる最小二乗誤差の計算例を図18に示す。縦軸は、

表3 データ測定設定ファイル

設定項目	設定値
ソース信号	バーストランダム
ソースチャンネル数	1
収集チャンネル数	1
サンプル振動数	800Hz
カットオフ振動数	320Hz
ブロックサイズ	1024
バンド幅	400Hz
オーバーラップ	50%
アベレージ回数	30
測定関数	FRF
ウィンドウ	一様

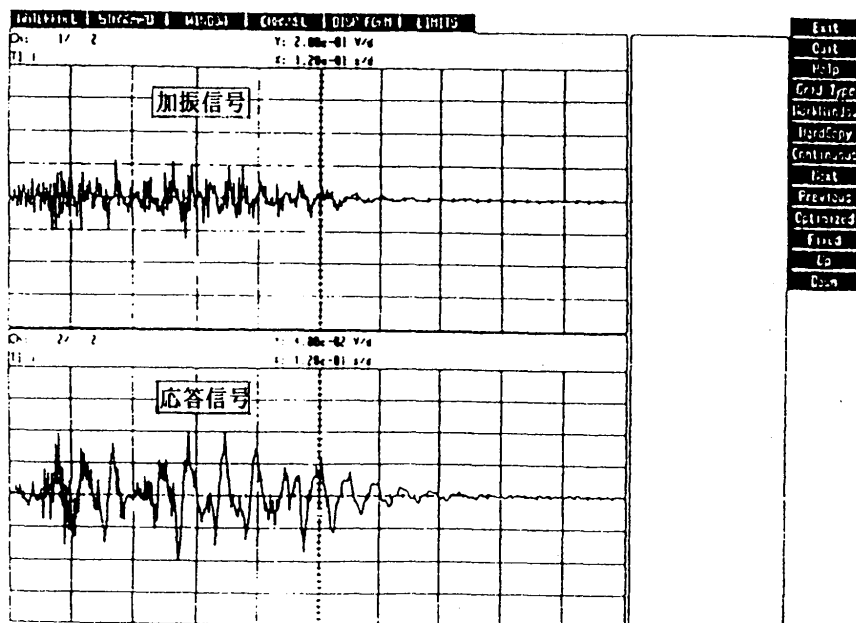


図16 モニタデータ

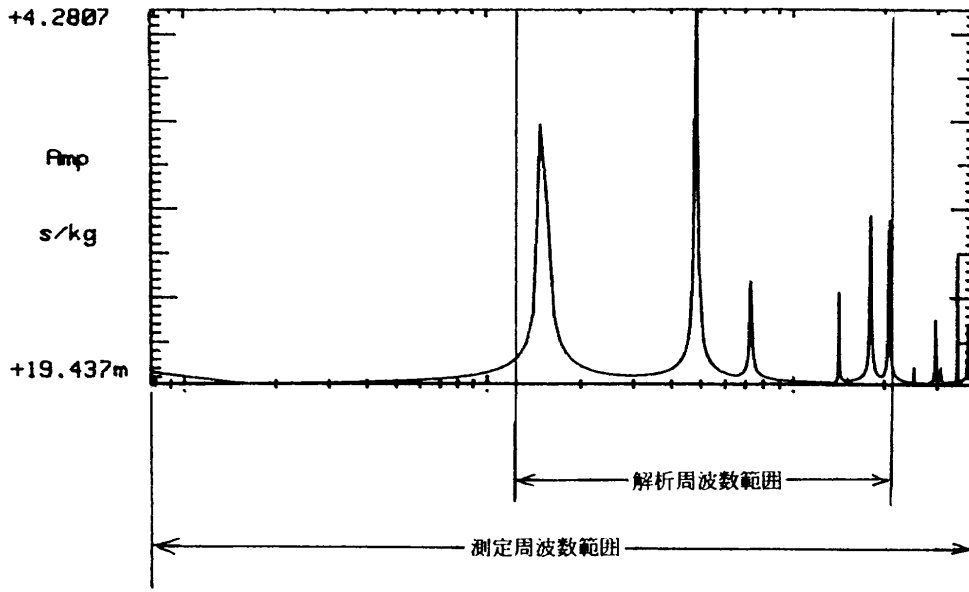


図17 周波数伝達関数の総和（振幅比）

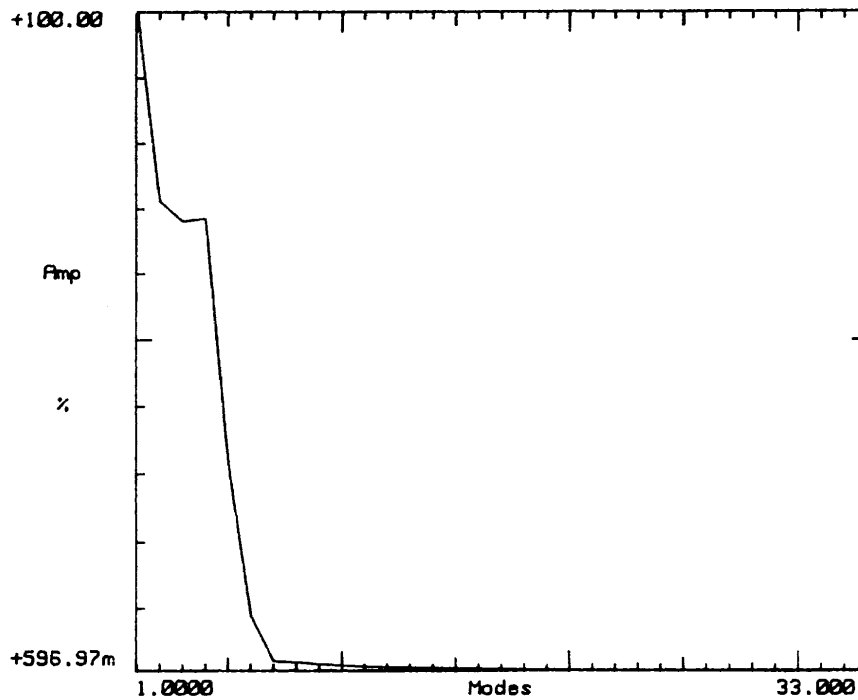


図18 誤差関数

最小二乗誤差，横軸には解析モード数を取り，モード数の増加に伴う両者の関係を示したものである。同図をみるとモード数の増加による誤差の減少が続き6次のモード数で大きく落ちていることが判り，モードが6個と判定できる。図19は，解析モード数の増加に伴う固有振動数と減衰比の変化の安定度（前の解析次数で得られた値との比）を許容限度の値を指定してアルファベットで示した安定化ダイアグラムである。縦軸は解析モード数を横軸には固有振動数を取り，伝達関数，安定度を固有振動数上に示した。アルファベットは，o：ポールの認識，f：固有振動数の変化

が1.0%以内，s：周波数の変化が1.0%以内，減衰比の変化が5.0%以内の両許容限度を満たしていることを示す（設定値は，変更可能である）。同図をみると固有振動数の一番低いモードを除いた他のモードには，解析次数8次に固有振動数と減衰比共に基準値内に安定した時のsが表われている。この安定化ダイアグラムを参考に各モードについて次数を指定してパラメタ推定を行う。

次に，最小二乗周波数領域法を選択し，伝達関数と求めた固有振動数と減衰比とを用いてモード全てに対してモード・シェイプ係数を推定する。この間，実験で求めた伝達

関数と推定値とのカーブフィットの重ね書きをモニターすることができる。終了後、得られた結果をアナリシス・セクション・ファイルにセーブする。

実験モーダル解析のモード表示において、チップフィン部の計測データが面に対して、法線方向成分のみであるため、チップフィン付け根の主翼Z方向変位が引起こすチップフィンの面内方向成分の情報が欠落する。特に、チップ

フィンのキャント角が小さい供試体については、動きが不自然になる。フラッタ解析計算では、この変位成分は、空気力の発生に寄与せず解析に影響を与えないので考えなくてもよい。この動きの不自然さの修正は、供試体の面内剛性が十分高いとした時、チップフィン付け根部の翼のZ方向成分から図20に示す幾何学的関係により次式を用いて修正する。

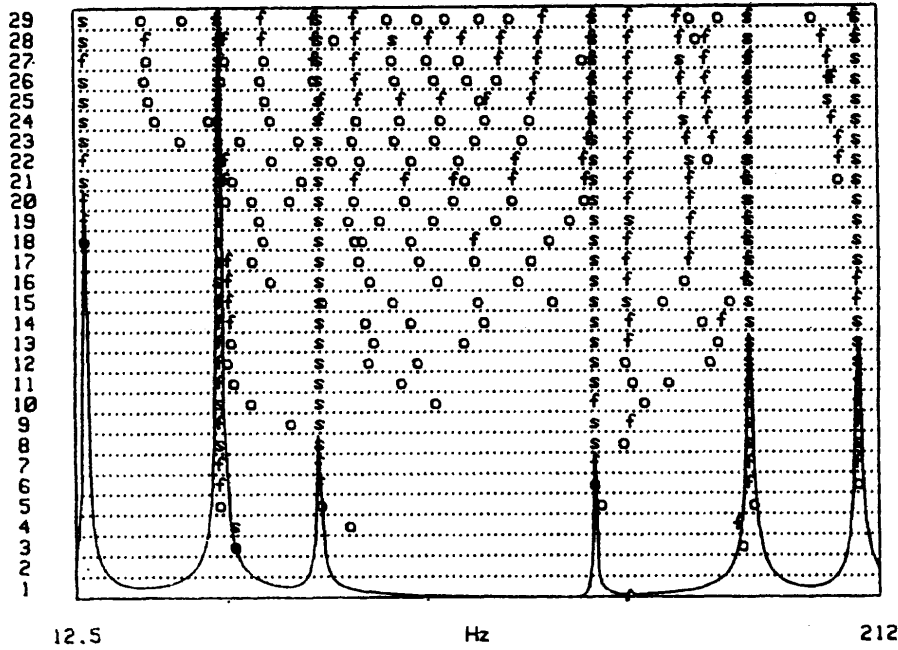


図19 安定化ダイアグラム

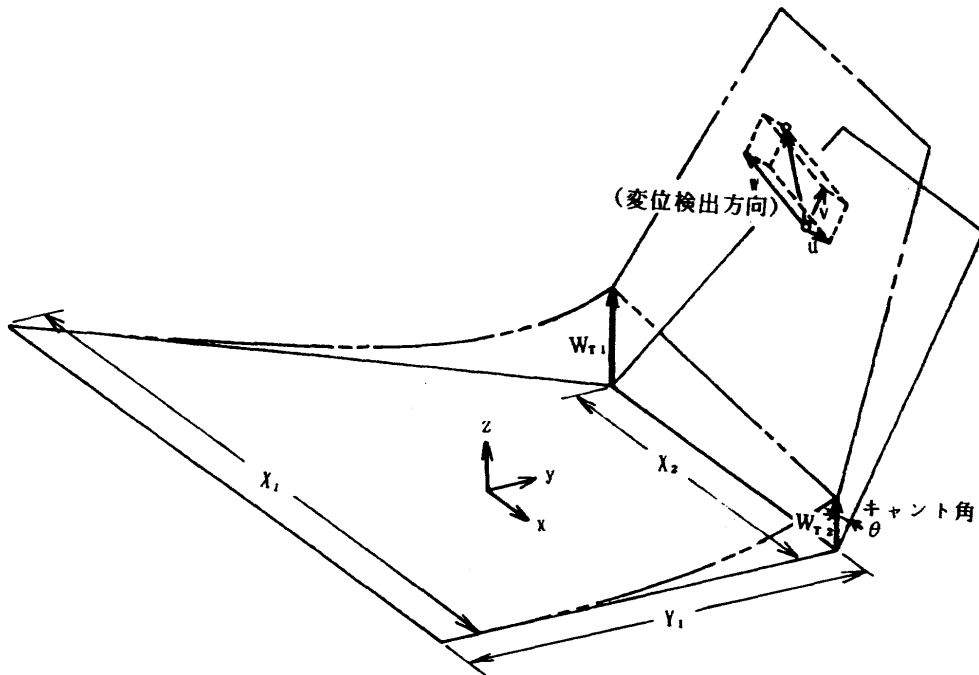


図20 チップフィン部の面内変位成分

$$u = \cos\theta \times (W_{T1} - W_{T2}) / X_2 \times \sqrt{(y - Y_1)^2 + z^2} \quad (1)$$

$$v = -[W_{T2} + (X_1 - x) \cdot (W_{T1} - W_{T2}) / X_2] \times \cos\theta \quad (2)$$

しかし、実験例に用いた供試体のキャント角 (θ) では、約 60° と比較的大きいのでこの修正を行っていない。

図15に示す供試体について、自動データ収集、モーダル解析を行い求めた1次から5次までの実験結果を図21に示す。図には、本装置に組込んだ構造解析ソフト P/FEA を用いて行った有限要素法による解析結果も同時に示す。解析に使用した材料定数は、ヤング率：68.6 (GPa)、密度： 2.65×10^3 (kg/m³)、ポアソン比：0.3である。要素分割 (6 × 7) は図15に実線で示してある。また各モードに対するノードラインを共振状態で描き出したものを、実験及び解析結果と比較して図22に示す。結果を見ると、モードシェ

イプ、ノードラインともに実験と FEA との両者の一致は良好である。ただし、5番目のノードラインの実測は励起される振幅が極めて小さいためはっきりしたデータが得られなかった。振動数ではここに比較した範囲において最大8.7% (2次) の違いであった。

4. おわりに

非接触型レーザー振動速度検出器と組み立てロボットを組合せた動的変位計測装置について述べ、このシステムにより効率よくモーダル試験を行えることを実例により示した。また、静的変位については、変位検出器を移動して測定する方法を用いて構造試験に十分な精度を持つことを確認した。

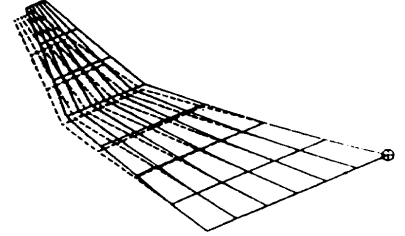
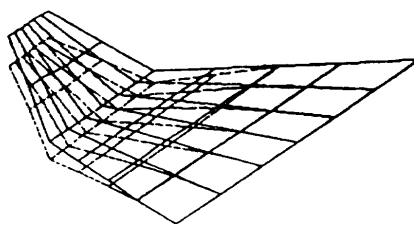
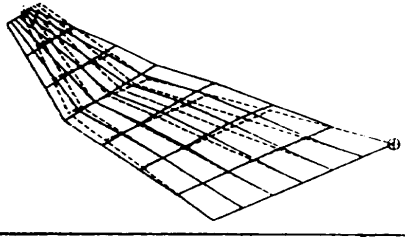
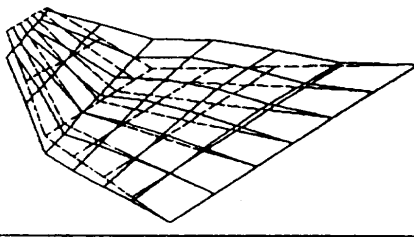
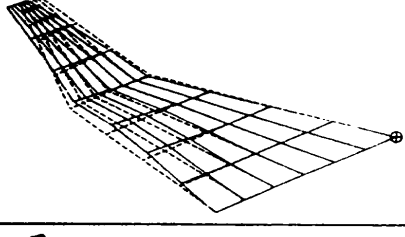
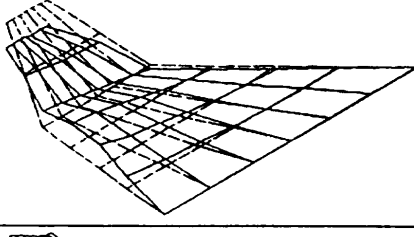
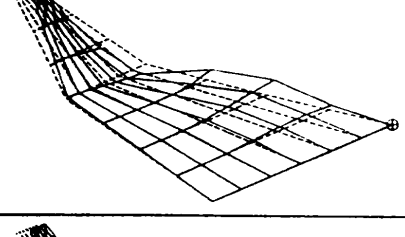
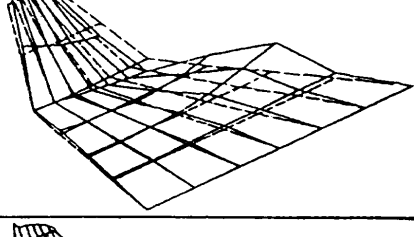
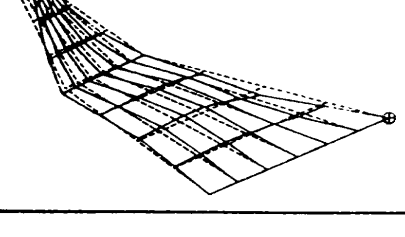
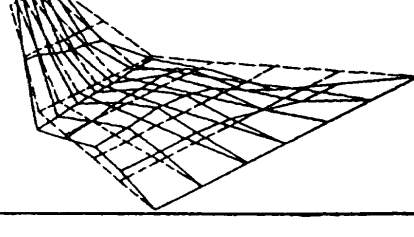
モード	FEA	LMS
LMS : 15.2Hz FEA : 16.0Hz 1		
LMS : 48.2Hz FEA : 52.8Hz 2		
LMS : 72.9Hz FEA : 75.9Hz 3		
LMS : 141.3Hz FEA : 141.0Hz 4		
LMS : 179.8Hz FEA : 184.0Hz 5		

図21 実験結果と FEA 解析結果

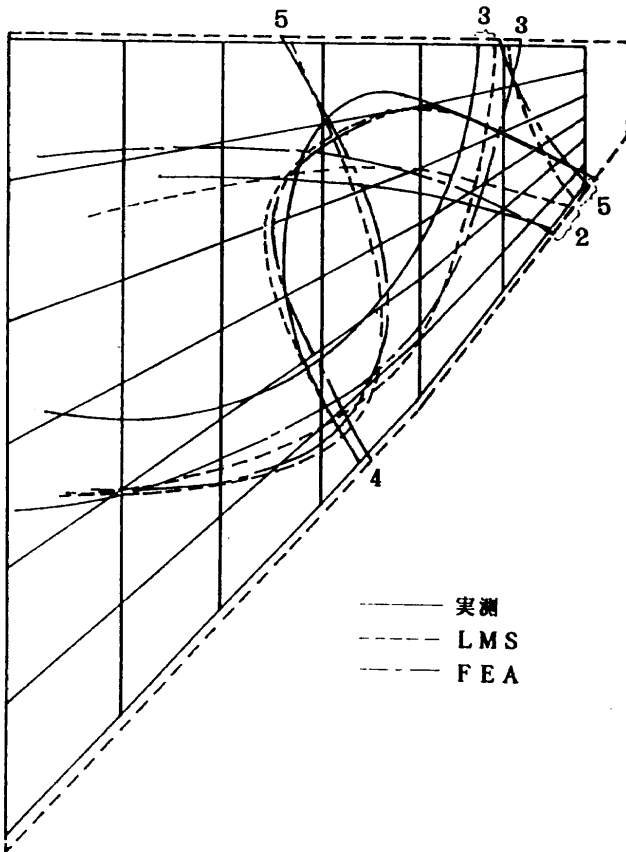


図22 ノーダルラインの比較

なお、本計測システムは、航技研における複合材構造試験設備整備の一環として導入されたものである。

参考文献

- 1) 上田哲彦, 外崎得雄: 「動の変位計測装置を用いた振動試験の自動化について」, 第34回構造強度に関する講演会, 平成4年7月
- 2) SICOS/SCADAS User Manual: Difa Measuring Systems B.V. Netherlands, Mar. 1989
- 3) R. J. Allemang: "Experimental Modal Analysis", Modal Testing and Modal Refinement, ed. D. Chu, ASME-AMD Vol.59, New York, pp.1~29, 1983
- 4) J. Leuridan, J. Lipkens, H. Van der Auweraer and F. Lembregts: "Global Modal Parameter Estimation Methods: An Assessment of Time versus Frequency Domain Implementation" 4th International Modal Analysis Conference, pp.1586~1595. Los Angeles CA, 1985
- 5) CADA FOURIER MONITOR User Manual Rev.2.5: LMS INTERNATIONAL BERGIUM, CADA-X-1300-UM-025D, 1991
- 6) CADA USER PROGRAMMING User Manual Rev. 2.5: LMS INTERNATIONAL BERGIUM, CADA-

X-1700-UM-025, 1991

- 7) Asea Robot Application Protocol (ARAP) for Computer Link: ASEA Robotic AB Sweden, CK 09-1204E, Oct. 1987
- 8) Asynchronous Communication for Computer Link-ADLP-10: ASEA Robotic AB Sweden, CK 09-1205E, Jan. 1983
- 9) PATRAN Plus User Manual Vol. I, II Rel.2.5: PDA Engineering PATRAN Div. Cal. USA, Oct. 1990
- 10) 上田哲彦, 外崎得雄, 岩崎和夫: 「チップフィン形状翼フラッタ低速基礎風洞実験」, 航空宇宙技術研究所報告, TR-1228, 1994年3月

付録1 測定設定例

データ測定設定ファイルは、データ取込みと信号処理機能について、CADA X TESTのフーリエ・モニタの操作モードであるBIAモードを用いて対話形式で作成する。図付1.1は、予備実験に使用した設定例(括弧内が設定値)を示す。図中のTest Identificationに関しては、実験に対するデータ収集、処理、解析データ等の管理のためのファイル(wing10)、測定設定、収集データ収納のためのファイル(test10)とフロントエンド(SCADAS SC16-16)を設定する。

Source Initializationに関しては、フロントエンド内蔵加振信号発生モジュール(QDAC)、信号のタイプ(ホワイトノイズ, 50%バースト)、チャンネル数(1)を設定する。

Acquisition Parametersに関しては、使用するフロントエンド内蔵のアンプのチャンネル数(2)とチャンネル番号の識別、ゲイン調整方法(INTERACTIVE)とゲイン目標値(80%)、オーバーロード時の対応(WARNING)と再収集の回数(1)、データ・サンプリング・パラメタ(800Hz)、アンチエイリアジング用ローパス・フィルタ(320Hz)、トリガーマード(SOURCE)の設定を行う。

Processing Parameterに関しては、ブロックサイズ(1024)、分析周波数帯域(0~400Hz)、オーバーラップの幅(50%)、平均化回数(30)を設定する。

Measurement Functionに関しては、収集データへの適用処理関数(FRF)、加振数(1)を設定する。

Window Parameterに関しては、時系列データ解析の際リーケージの減少とSN比の改善を目的に行うが、本実験例では、バーストランダム信号加振のため設定しない。

Data Description & Storage Modeに関しては、測定データを幾何学的モデル(GEOMETRY)に使用するか、また、収集後自動的にセーブするか否かの設定をする。

これらの測定設定パラメタ設定後、BIAモードのデジタルスコープ機能を利用して、供試体に対して、上記設定

CADA-X Rev 2.5
wing

Block Input Acquisition Setup		Block Input Acquisition Setup	
Field	Value	Field	Value
1	Test Identification	31	Processing Parameters
2	-----	32	-----
3	Project Name	33	Blocksize
4	Test Identification	34	Center Frequency (Hz)
5	Frontend	35	Bandwidth (Hz)
6	-----	36	Overlap (%)
7	Source Initialization	37	Averaging Type
8	-----	38	Parameter
9	Source Type	39	Count
10	Source Channels	40	Mode
11	-----	41	Refresh Rate
12	Acquisition Parameters	42	-----
13	-----	43	Measurement Function
14	Number of Channels	44	-----
15	First Channel	45	Measurement Function
16	Channel Amplification	46	Number of Inputs
17	Autorange Target	47	-----
18	Overload Mode	48	Window Parameters
19	Overload Retry	49	-----
20	Real Time Check	50	Window Type
21	-----	51	Parameter
22	Sampling Mode	52	Correction
23	Sample Frequency (Hz)	53	Input Window Type
24	Filter Cutoff (Hz)	54	Parameter
25	Trigger Mode	55	Correction
26	Channel	56	-----
27	Value (%)	57	Data Description & Storage Mode
28	Pretrigger (%)	58	-----
29	Timebase (s)	59	Id Mask
30	Acquisition Duration (s)	60	Storage Mode
			GEOMETRY
			INTERACTIVE

図付 1.1 測定設定例

信号を加振し、加振、応答信号出力モニターより、センサ、加振信号のチェック、およびゲインの調整を行い目標ゲイン(80%)を達成し、測定の設定を終了する。

以上が、バーストランダム、一点加振で周波数伝達関数を求めるためのデータ測定設定の概略である。

測定データの処理関数の種類は、次の通りである。時間信号記録、インパルス応答、自己相関、相互相関、確率密度、確率分布、ヒストグラム、リニア・スペクトラム、オートパワースペクトラム、クロス・スペクトラム、周波数伝達関数(H_1 , H_2 , H_v)、コヒーレンス関数、パーシャル・コヒーレンス、バーチャル・コヒーレンス、プリンシパル・コンポーネント、インテンシティー。

これらは必要に応じて出力される。

付録2 ロボット・ティーチング・プログラム例

自動データ収集処理を行うために、予めロボットに測定位置と移動タイミングを記憶したプログラムを作成する必要がある。作成は、ロボットのプログラミング機能を利用して行う。センサにレーザ式非接触振動速度計を用いた時のティーチングの一例を示す。座標系は、直交座標を用いる。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供試体測定点付近に引出し、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認識しながら位置合せを行う。移動方法および速度は、ジョイスティックの傾き方向および傾き角度、あるいは先端の回転およびその量によって制御する。測定位置合せ終了後、測定位置と移動速度(減速速度指定パーセンテージ)と検出角度を指示し、位置制御命令としてメモリーに記憶する。次の測定点の位置合わせを同じ方法で行う。この動作を繰返し、測定点全点の位置制御、移動速度、検出方向の命令を測定順に記憶する。作成したプログラムの一例を図付2.1に示す。図中のメインプログラム(No.10)のライン10~30は基本命令である。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。ライン40は、ロボットの移動開始、停止等ワークステーションとデータ収集のタイミングを取るためのハンドシェイク用サブプログラム名、ライン50が位置制御命令である。ライン40、50で1点の移動、停止、データ収集を行う命令、ライン60、70、

Main Program

```

PROG10 TCP 0 FRAME 0
RECT COORD V=100MM/S                                100%
~~~~~
10  V=100MM/S MAX=1000MM/S
20  TCP0
30  MODERECT 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
100 CALL PROGRAM 100
110 POS V=100% FINE
120 CALL PROGRAM 100
130 POS V=100% FINE
140 RETURN

```

Sub Program

```

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

```

図付2.1 ティーチング・プログラム例

80, 90, 100, 110, 120, 130と合計で5点のデータ収集を行う例である。サブプログラム(No.100)はHP 375 CHのIEEE-488インタフェースとロボット自身のデジタルI/Oインタフェースとの間でCADA Xソフトウェアのユーザコマンドを用いてカスタム化した“irbcomm”によりハンドシェイクを行い、移動停止のタイミングを取る。また測定点座標の転送もRS-232Cインタフェースを介して行う。これは、以後のモーダル解析のワイヤフレーム表示に利用するジオメトリファイルの基本データとして使用する。

航空宇宙技術研究所資料 683号

平成7年5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丁目44番地1
電話三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社三興印刷
東京都新宿区西早稲田2-1-18
