

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

多軸振動非接触自動計測システム(MaVES)の 機能拡張と全システム概要

神田 淳, 佐俣 喜芳

2013年10月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

目 次

Abstract.....	1
概要.....	1
1. はじめに.....	1
2. システムの概要.....	2
2.1. MaVES の概要.....	2
2.1.1. システムの構成.....	2
2.1.2. 計測の仕組み.....	3
2.2. MaVES-c の概要.....	3
3. MaVES の詳細.....	4
3.1. 3D スキャニング振動計.....	4
3.1.1. 振動計の構成.....	4
3.1.2. 振動計の仕様.....	5
3.1.3. 計測機能.....	5
3.1.4. 光学系.....	5
3.1.5. 振動速度検出性能.....	6
3.1.6. PSV ソフトウェアの機能.....	6
3.2. センサー位置制御ロボット.....	7
3.2.1. ロボットの構成.....	7
3.2.2. ロボットの仕様.....	7
3.2.3. ロボットの座標系.....	7
3.2.4. ロボットの機能.....	8
3.3. 統合ソフトウェア.....	9
3.3.1. ソフトウェアの役割.....	9
3.3.2. 統合ソフトウェアの機能.....	9
3.4. モーダル解析ソフトウェア.....	9
3.4.1. ソフトウェアの構成.....	10
3.4.2. モーダル解析ソフトウェアの機能.....	10
3.5. その他.....	10
3.5.1. セーフティライトバリア.....	10
3.5.2. Scanning Head 取り付け治具.....	10
3.5.3. ロボット架台.....	10
3.5.4. PC とネットワーク.....	10
3.5.5. レーザー振動計.....	13
3.5.6. 定盤.....	13
4. MaVES-c の詳細.....	15
4.1. 1D スキャニング振動計.....	15

4.1.1.	振動計の構成.....	15
4.1.2.	振動計の仕様.....	16
4.1.3.	計測機能.....	16
4.1.4.	光学系.....	16
4.1.5.	振動速度検出性能.....	16
4.1.6.	PSV ソフトウェアの機能.....	16
4.2.	センサー位置制御ロボット.....	16
4.2.1.	ロボットの構成.....	16
4.2.2.	ロボットの仕様.....	16
4.3.	その他.....	16
4.3.1.	安全フェンス.....	16
4.3.2.	Scanning Head 取り付け.....	16
4.3.3.	ロボット架台.....	16
4.3.4.	定盤.....	17
5.	計測方法.....	20
5.1.	計測の流れ.....	20
5.2.	計測準備.....	20
5.2.1.	供試体と計測機器の設置.....	20
5.2.2.	システムの切り替え.....	20
5.2.3.	MaVES の起動.....	20
5.3.	光学系の設定.....	20
5.3.1.	PSV の Preference 設定.....	20
5.3.2.	2D アライメントの設定.....	20
5.3.3.	3D アライメントの設定.....	20
5.3.4.	Base 座標系のキャリブレーション.....	21
5.4.	ロボット位置のティーチング.....	22
5.5.	計測点の設定.....	22
5.6.	計測点の解析.....	23
5.7.	計測条件の設定.....	25
5.8.	自動計測の実行.....	25
5.9.	計測結果の処理.....	25
6.	計測例.....	25
6.1.	固有モード計測.....	25
6.1.1.	供試体.....	25
6.1.2.	計測のセッティング.....	25
6.1.3.	ロボット位置.....	25
6.1.4.	ジオメトリ.....	25
6.1.5.	計測条件.....	26
6.1.6.	実稼働解析.....	26
6.1.7.	モード解析.....	26

6.2. 超音波弾性波伝播計測.....	26
6.2.1. 供試体.....	26
6.2.2. 計測のセッティング.....	26
6.2.3. ジオメトリ.....	28
6.2.4. 計測条件.....	31
6.2.5. 超音波弾性波伝播.....	32
7. 特別教育.....	34
8. おわりに.....	34
参考文献.....	34

多軸振動非接触自動計測システム (MaVES) の機能拡張と 全システム概要*

神田 淳^{*1}, 佐俣 喜芳^{*2}

Enhancement of Multi-axis Vibration Evaluating System (MaVES) and Outline of Entire System*

Atsushi KANDA^{*1} and Kiyoshi SAMATA^{*2}

Abstract

The MaVES (Multi-axis Vibration Evaluating System) is able to measure automatically three directional vibration characteristics of objects in non-contact and analyze modal characteristics and operating deflection shapes. This system consists of three laser Doppler sensors, a 6-axis robot and a control software. The MaVES was originally developed in 2010 and has been enhanced in sampling frequency, accuracy of measurement point geometry and analysis function. In 2013, the MaVES has been moved to new area and secured by safety light barriers during measurements. In addition, the MaVES-c has been developed as portable-type of MaVES. This paper shows entire system specification, functions, measurement procedures and examples.

Keywords: *robot, laser, vibrometer, modal characteristics, MaVES, MaVES-c*

概要

多軸振動非接触自動計測システム MaVES (Multi-axis Vibration Evaluating System) は、レーザードップラー式センサーと 6 軸ロボットを用いて物体の 3 軸方向の振動を非接触かつ自動で計測し、モーダル解析や実稼働振動解析を行うことができるシステムである。2010 年の開発以降、サンプリング周波数の拡張、計測点の位置精度の向上、解析機能追加等の機能拡張等を実施している。2013 年には新しい計測エリアの整備および安全装置としてのセーフティライトバリアの追加を実施して MaVES を移設した他、さらに高い可搬性を目指して小型多軸振動非接触自動計測システム MaVES-c のパイロット型を開発した。本資料では、これらの機能拡張後の MaVES および MaVES-c のシステム概要、仕様詳細、計測方法について示すとともに計測例（固有モード計測、超音波弾性波伝播計測）について示す。

1. はじめに

宇宙航空研究開発機構では、物体の 3 次元振動特性を計測することが可能なシステムとして、多軸振動非接触自動計測システム MaVES (Multi-axis Vibration Evaluating System) を 2010 年 3 月に開発している。MaVES は 3 台のレーザースセンサーにより非接触で物体の 3 次元振動を計測できるとともに、6 軸のアーム型ロボットでレーザースセンサーを移動させることにより、物体全体の振動特性を自動で計測できるシステムである。MaVES 開発

後、機構内外のさまざまな振動計測を実施してきたが、計測に対する要求が年々増加していることから、サンプリング周波数の拡張、計測点の位置精度の向上、解析機能追加等の機能拡張を逐次実施してきた。さらに 2013 年 3 月には、新しい計測エリアの整備および安全装置としてのセーフティライトバリアを追加して MaVES を移設 (Fig.1.1)、さらに高い可搬性を目指して小型多軸振動非接触自動計測システム MaVES-c のパイロット型 (Fig.1.2) を開発するなど大規模な拡張を行った。

* 平成 25 年 8 月 5 日受付 (Received 5 August 2013)

*1 航空本部 構造技術研究グループ
(Structures Research Group, Institute of Aeronautical Technology)

*2 航空本部 運航システム・安全技術研究グループ
(Operation Systems and Safety Technology Research Group, Institute of Aeronautical Technology)



Fig.1.1 多軸振動非接触自動計測システム (MaVES)

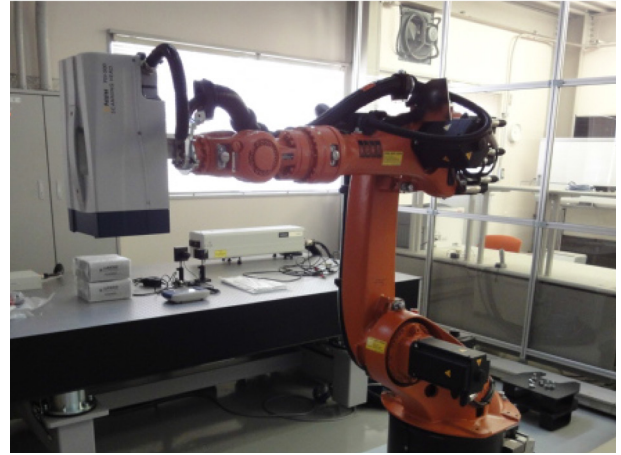


Fig.1.2 小型多軸振動非接触自動計測システム (MaVES-c)

本資料では、これら MaVES および MaVES-c について、機能拡張を含めた全体のシステム概要、仕様、機能、計測方法について述べるとともに、計測例として固有モード計測および超音波弾性波伝播計測を紹介する。

2. システムの概要

多軸振動非接触自動計測システム MaVES および小型多軸振動非接触自動計測システム MaVES-c の各システム概要について述べる。

2.1. MaVES の概要

2.1.1. システムの構成

MaVES は、振動特性の計測から解析までを行うため

に、3D スキャニング振動計とセンサー位置制御ロボット、これらの制御を同期させる統合ソフトウェア、モーダル解析ソフトウェア、セーフティライトバリアから構成される (Fig.2.1)。3D スキャニング振動計、センサー位置制御ロボット、モーダル解析ソフトウェアはそれぞれ汎用品であり、独立して使用することが可能である。

3D スキャニング振動計は、このシステムのコアとなる部分で、レーザーにより3軸方向の振動（面外、面内）を時間または周波数領域で計測できる。また内蔵のソフトウェア（PSV ソフトウェア）により、計測点の設定から計測データの表示、実稼働解析結果の表示までを行うプリポスト機能、センサー部のミラーを制御することで一定のエリアのレーザーสキャンを行う機能を有している。

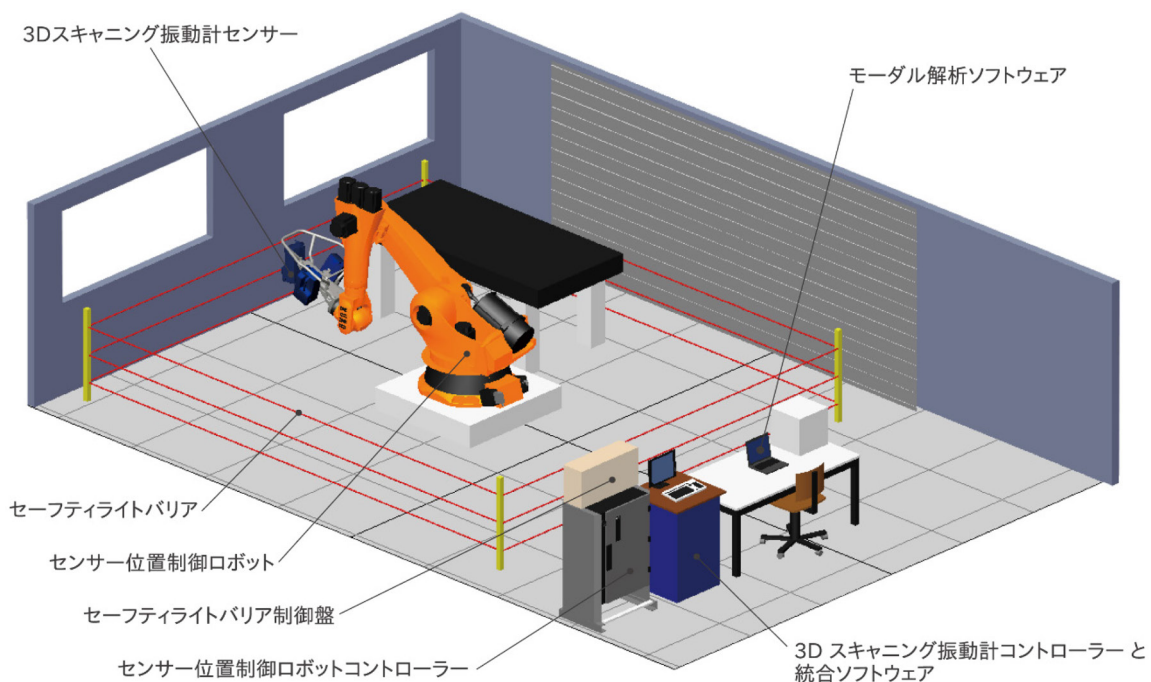


Fig.2.1 MaVES の構成

センサー位置制御ロボットは、3D スキャニング振動計のセンサーの位置決めを行うためのアーム型の6軸関節ロボットである。従来のように三脚や架構でセンサーをセットする手間がなく、センサーを希望の位置に簡便にセットすることができる。

統合ソフトウェアは、3D スキャニング振動計とロボットの作動を同期させることで、広い範囲の計測点の振動を自動で計測できるようにするためのソフトウェアである。

モーダル解析ソフトウェアは、3D スキャニング振動計（およびセンサー位置制御ロボット、統合ソフトウェア）によって取得した振動特性データを用いて、モード解析を行うためのソフトウェアである。

2.1.2. 計測の仕組み

振動計測は、レーザーセンサーを用いて、振動している供試体の振動速度を検出することで行う。レーザードップラー効果を利用しているため、レーザーの軸方向の振動速度のみが検出できる。MaVESでは、3台のレーザーセンサーを同軸にならないように配置することで、3方向の振動速度を検出し、各方向の成分を演算することでX、Y、Zの直交する3軸の振動速度を計測できる仕組みである。

基本的に1回の計測で、任意の1点の3軸方向振動速度を計測できるが、センサーのレーザーのスキャニング機能を用いて複数の計測点を順次スキャンすることで、複数計測点の計測が可能となる。レーザーのスキャニングは、センサーに内蔵のガルバノミラーを作動させるこ

とで実現している。ミラーの作動範囲内であれば、ロボットおよび同期用の統合ソフトウェアを使用することなく、3D スキャニング振動計のみで振動計測が可能である。より広い範囲の計測に対しては、センサーを搭載しているロボットを動かすことで実現させている。ロボットの動作、センサーのスキャニング機能、データの取り込みを同期させる仕組みが備わっており、結果として広い範囲にある複数の計測点を自動で計測することが可能となっている。

さらにレーザーセンサーにはCCDカメラが内蔵されており、PC上にビデオ画像を表示して計測点を画面上で設定することができる。同じくセンサーに内蔵の測長ユニット (Geometry Scan Unit) を用いてセンサーから測定点までの距離を計測することで、ロボットの位置座標から計算したセンサーの位置座標を基に、計測点の座標を計算することができる。

2.2. MaVES-c の概要

MaVES-cは、可搬性を高めることを目的としてMaVESを小型化したものである。1D スキャニング振動計とセンサー位置制御ロボット、安全フェンスから構成される (Fig.2.2)。1D スキャニング振動計、センサー位置制御ロボットはそれぞれ汎用品であり独立して使用することが可能である。

1D スキャニング振動計は、レーザーにより1軸方向振動を時間または周波数領域で計測できる。また内蔵のソフトウェア (PSV ソフトウェア) により、計測点の設定から計測データの表示、実稼働解析結果の表示までを行

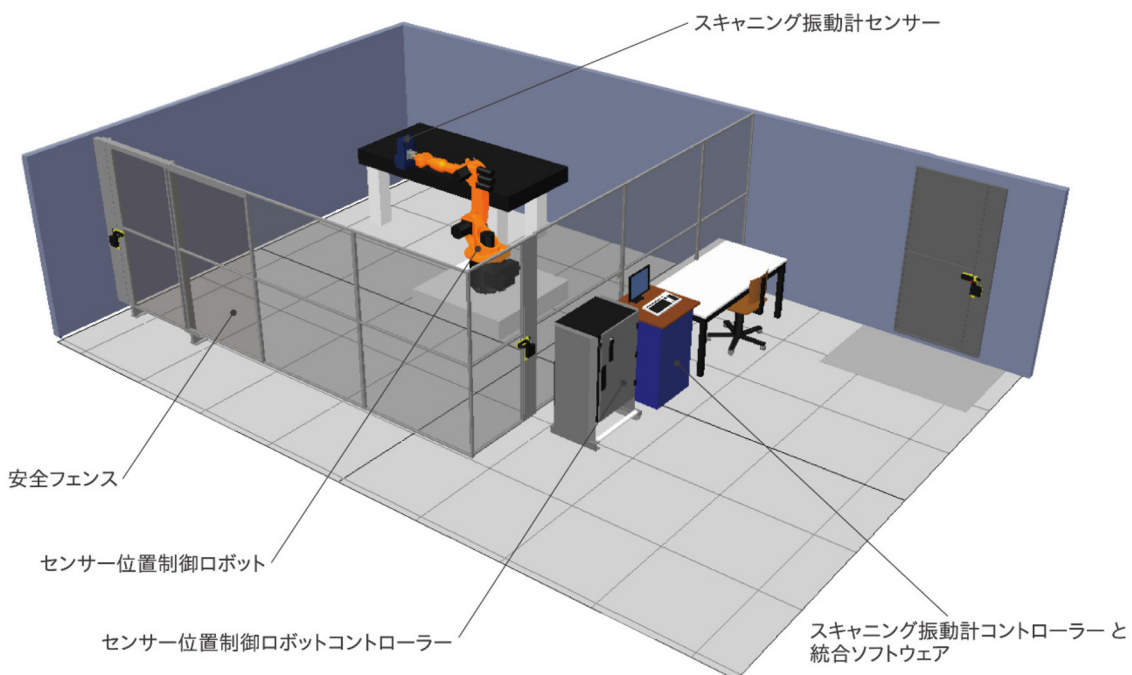


Fig.2.2 MaVES-c の構成

うプリポスト機能、センサー部のミラーを制御することで一定のエリアのレーザースキャンを行う機能を有している。レーザーセンサーには CCD カメラが内蔵されており、PC 上にビデオ画像を表示して計測点を画面上で設定することができる。同じくセンサーに内蔵の測長ユニット (Geometry Scan Unit) を用いてセンサーから測定点までの距離を計測できる。

センサー位置制御ロボットは、1D スキャニング振動計のセンサーの位置決めを行うためのアーム型の 6 軸関節ロボットである。従来のように三脚や架構でセンサーをセットする手間がなく、センサーを希望の位置に簡便にセットすることができる。

なお現在の MaVES-c はパイロット型で開発中であり、スキャニング振動計とロボットの作動を同期させるための統合ソフトウェアは搭載しておらず、振動計とロボットによる自動計測には対応していない (将来的に対応予定)。しかしロボットを手動で操作して振動計を任意の位置にセットし、振動計のスキャニング機能で一定のエリア内を自動でスキャンして計測することは可能である。

MaVES に含まれるモーダル解析ソフトウェアを用いて、MaVES-c で計測した振動特性データを解析することが可能である。

3. MaVES の詳細

本章では、MaVES の各ハードウェア、ソフトウェアについて詳細を示す。

3.1. 3D スキャニング振動計

3.1.1. 振動計の構成

3D スキャニング振動計 (Polytec 社製 PSV-400-3D) は、Fig.3.1 に示すように、3 台の Scanning Head (PSV-I-400)、3 台の Controller (OFV-5000)、Junction Box (PSV-401-3D および PSV-E-408)、Data Management System (PSV-W-400-3D、Fig.3.1 では単に PC と表示) から構成される。Scanning Head 以外の機器はラックに収納されている (Fig.3.2)。

3 台の Scanning Head (それぞれ TOP, RIGHT, LEFT) は次節で述べるセンサー位置制御ロボットのアーム先端に搭載され (Fig.3.3)、レーザーの照射と受光を行う。なお、各 Scanning Head には CCD 方式の Video Camera が内蔵されている。さらに、TOP の Scanning Head には Geometry Scan Unit (PSV-A-420) が取り付けられている。参考として Scanning Head の三面図を Fig.3.4 に示す。

Junction Box はアナログ/デジタル信号の入出力を行う。PSV-401-3D は 4 入力 4 出力であるが、PSV-E-408 を加えることでさらに 4 入力が増え、併せて 8 入力 4 出力となっている。

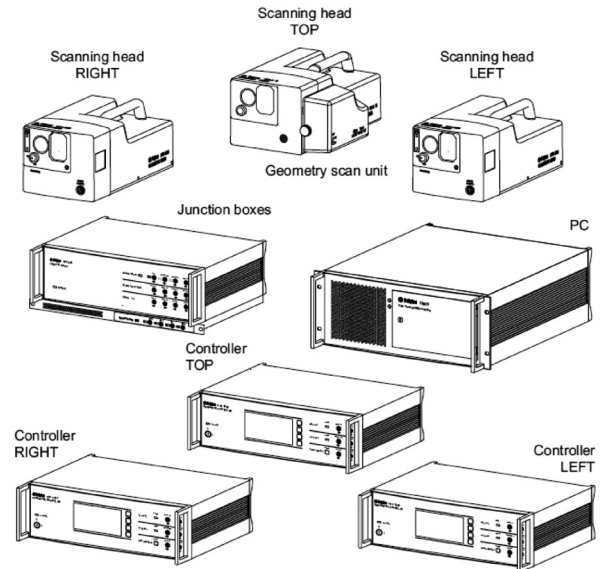


Fig.3.1 3D スキャニング振動計の構成

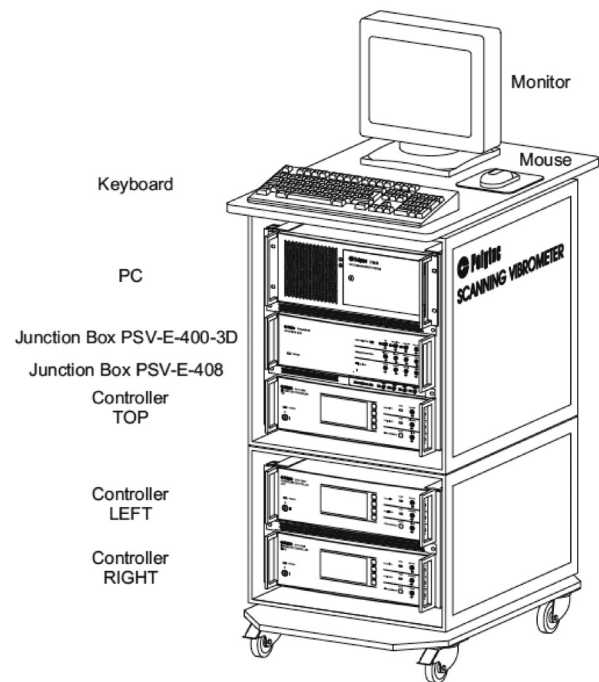


Fig.3.2 3D スキャニング振動計の構成 (ラック)



Fig.3.3 Scanning Head

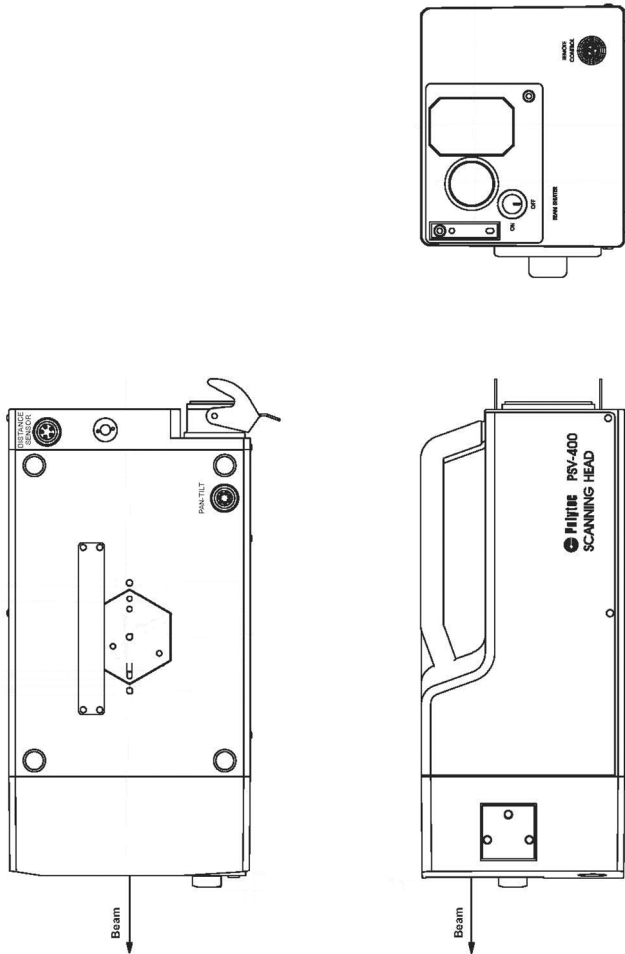


Fig.3.4 Scanning Head の三面図

Data Management System は、PC および PSV ソフトウェアから構成され、Junction Box とのデータの送受信や、計測データの処理を行う。

3.1.2. 振動計の仕様

Scanning Head およびレーザーダイオード式の Geometry Scan Unit のレーザーは、波長レンジが 400nm から 700nm の範囲の可視光放射で出力が 1mW 未満であるため、レーザー光の安全基準である EN60825-1 において laser class 2 に分類される。これは、直接光源が目に入っても、まばたき等の反感反応により目への安全性が保たれるレベルである。

なお MaVES では振動速度検出性能や入出力チャンネル数が異なる 2 種類のシステム (PSV-3D-400-H と PSV-3D-400-M, それぞれ H システム, M システムと称する) を一つにまとめており、切り替えて使用できる。

3.1.3. 計測機能

Scanning Head から照射するレーザーにより供試体の振動速度を検出することができるが、ドップラー効果を

利用しているため、検出できるのはレーザーの光軸方向の振動速度のみである。しかし、3 台の Scanning Head を用いて 1 点に 3 本のレーザーを照射することにより 3 方向の振動速度を検出し、直交方向成分に分解することで x, y, z の 3 方向の振動速度成分を計測可能である。なお、各 Scanning Head は、レーザーの光軸をガルバノミラーによりスキャンできる機構 (2 方向へ各 ±20°) を有しており、Scanning Head 自体を動かすことなく、一定エリア (目安として、Scanning Head と対象物の距離を 700mm とした場合に、400 ~ 500mm 四方) を計測可能である。

Scanning Head に内蔵された CCD 方式の Video Camera によるビデオ画像から、PC 上で計測点を設定することが可能である。Video Camera は各 Scanning Head に内蔵されているが、通常は TOP の Scanning Head に内蔵の Video Camera のみを使用する。

さらに、計測点の位置座標も求めることができる。これは、ロボットの位置座標を基に得られる Scanning Head の位置と角度、加えて TOP の Scanning Head の Geometry Scan Unit で計測した供試体と Scanning Head 間の距離を基に求める仕組みである。測長用レーザーは、速度計測用レーザーと光源を切り替えて使用し、同じスキヤニングミラーを使用する。

3.1.4. 光学系

Scanning Head は修正 Mach-Zehnder 干渉計を内部に有しており、その光学系のコンフィギュレーションを Fig.3.5 に示す。使用するレーザーは、キャリア周波数 40MHz の He-Ne レーザーである。光源から出た偏向レーザービームはスプリッター BS1 で Object Beam と Reference Beam に分けられ、そのうち Object Beam はスプリッター BS2 および λ/4 プレートを通じて、供試体に照射される。供試体から反射した Object Beam と Reference Beam はスプリッター BS3 で一緒になり、Detector でその干渉を計測する。なお Bragg Cell は逆方向振動速度の検出のために周波数をオフセットさせる役割を果たしている。

レーザーはマルチモードレーザーであるため、モード間の干渉が存在し、反射光の信号レベルが距離によって変化する。距離と信号レベルの関係を Fig.3.6 に示す。Scanning Head と対象物の距離 (Stand-off Distance) についての最適値 L(mm) は、

$$L = 99 + n * (204 \pm 1)$$

となっている。ここで n は整数 (0,1,2,...) である。なお Scanning Head のフロントレンズは LR (Long Range) と MR (Mid Range) の 2 種類があるが、MaVES では LR が採用されている (両者では、最短の Stand-off Distance が異

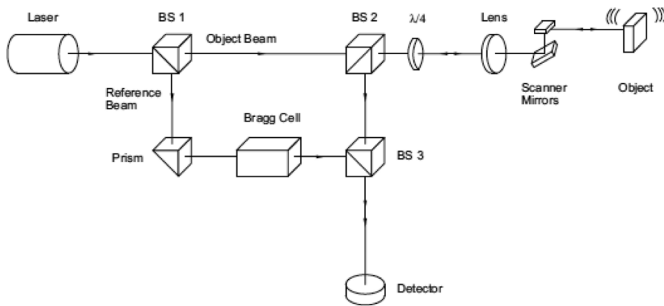


Fig.3.5 光学系のコンフィギュレーション

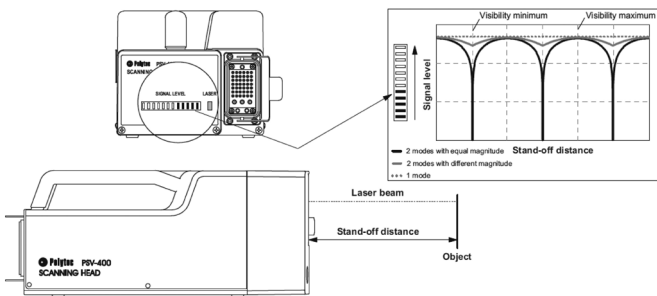


Fig.3.6 距離と信号レベル

なり、LR では 350mm、MR では 40mm となっている)。

3.1.5. 振動速度検出性能

振動速度検出性能の異なる 2 種類のシステム (PSV-3D-400-H と PSV-3D-400-M) が用意されており用途に応じて切り替えて使用する仕組みになっている。

PC には 2 種類の Data Acquisition Board (National Instruments 製 PCI-4462 および PCI-6110) が内蔵されており、PSV-3D-400-H では PCI-4462 が用いられ 80kHz までの振動 (最高サンプリング周波数 204.8kHz) を 24bit の分解能で計測可能となっている。PSV-3D-400-M では PCI-6110 が用いられ 1MHz までの振動 (最高サンプリング周波数 2.56MHz) を 16bit の分解能で計測可能となっている。

振動速度の検出能力は、Controller に内蔵の Decoder に依存する。Decoder は 2 種類 (VD-08, VD-09) を搭載している。VD-08 は 8 種類のレンジ設定が可能であり、最大 0.5m/s の振動速度を、0.2 ~ 25kHz のサンプリング周波数で計測が可能である。比較的低い周波数に特化することで感度を最適化している。VD-09 は 8 種類のレンジ設定が可能であり、最大 10m/s の振動速度、0.1 ~ 2.5MHz のサンプリング周波数で計測が可能である。

3.1.6. PSV ソフトウェアの機能

3D スキャニング振動計の制御や設定は基本的に全て PSV ソフトウェアで行う。制御や設定項目について下記

に示す。

(1) 光学系の設定

- ハードウェアの制御：レーザービームの位置決め・フォーカス調整・ON/OFF, ビデオカメラのズーム・フォーカス調整
- ライブビデオ画像の画像設定：コントラスト・明度・彩度の設定
- 2D アライメントの実行：マウスを使用して Video Camera 画像上でレーザーを任意の位置に移動させて計測点を定義するための、レーザー位置のアライメント
- 3D アライメントの実行：計測点の座標の基準となる、原点および座標軸を設定

(2) 計測点の設定

計測点は PC に表示された Video Camera 画像上で設定を行う。このとき、2種類のモード(スタンダードモードおよびポイントモード)で設定を行うことができるが、設定中のモードの移行は、スタンダードモードからポイントモードへの移行のみが可能であり、逆の移行はできない仕様である。

- スタンダードモードでの計測点設定：線、矩形、楕円形、多角形の各図形の描画・編集、図形への計測点の配置
- ポイントモードでの計測点設定：個別の計測点設定と微調整、計測点間の線接続の定義および編集
- ビデオトライアングルレーションの設定：ビデオ画像により三角測定を行うための設定
- ジオメトリ スキャンの実行：作成した計測点の座標を計測し、座標値を割り当てる
- フォーカス値の割り当て：各計測点へのレーザーのフォーカス値の割り当て

(3) 計測条件の設定

計測データの取り込み等に関する計測条件の設定には、下記の種類がある。

- General (一般設定)：測定モード (FFT, Fast Scan, Time), アベレーシングの種類 (Off, Amplitude: 参照信号が無い場合に振幅のみの平均化, Complex: 振幅と位相の両方を平均化, Peak Hold: 最大値, Time), アベレーシングの回数, 自動再測定の ON/OFF (下記の SE の項目を参照), 主成分分析による MIMO (Multi-Input Multi-Output) 測定の設定を行う
- Channels (測定チャンネルの設定)：チャンネルの有効/無効, レンジ, Coupling, 計測方向, 物理量, 校正値, 単位の設定を行う

- **Filter** (入力信号のデジタルフィルタの設定) : バンド幅制限, 微分, 積分フィルタなどの種類と各フィルタのパラメータの設定を行う
- **Frequency** (FFT 測定での周波数設定) : バンド幅, 周波数範囲, FFT ライン数の設定を行う. FFT ライン数は最大で 816, 200 ラインである.
- **Window** (入力信号の窓関数の設定) : 窓関数 (Rectangular, Hanning, Hamming, Blackman Harris, Bartlett, Flat Top, Exponential) の設定を行う
- **Trigger** (トリガの設定) : トリガの対象とするチャンネル, トリガ条件 (信号の立ち上がり / 立ち下がり, しきい値, プレトリガー) の設定を行う
- **SE** (信号の拡張設定) : レーザーの反射率等の問題で感度が低下したときに自動的にアベレージングの回数を増やして S/N の向上を図る自動再測定の設定. その際, レーザーの照射位置を少しずつずらして (測定距離が 1 m の場合で約 50 μ m) 計測を行うスペクトルトラッキングの ON/OFF の設定もある.
- **Vibrometer** (Decoder の設定) : 使用する Decoder の種類やレンジの設定を行う
- **Generator** (ファンクションジェネレータの設定) : 加振波形 (正弦波, 矩形波, 三角波, ランプ波, スイープ, 周期チャープ, 疑似ランダム, パーストチャープ, パーストランダム, ユーザー定義), 定常状態になるまでの遅延時間の設定, 信号の振幅とオフセットの設定を行う.
- **FastScan** (FastScan 測定モードの設定) : 時間領域の最小二乗法の回帰計算により, 各周波数で高速スキャンを行うための設定. 周波数やバンド幅を設定する.
- **Time** (Time 測定モードの設定) : Time 測定モードにおいて, サンプリング周波数とサンプル数を設定する. 最大 64 メガサンプル (67, 108, 864 サンプル) まで設定可能.

(4) 計測の実行

シングルポイント測定 (1 点のみの測定) とスキャン測定 (複数点を連続して測定) の 2 種類がある. スキャン測定の場合は, スキャンの進行状況を画面上で確認できる.

(5) データの表示

計測データ (Time, パワースペクトル, FRF (H1, H2), コヒーレンス, PSD, ESD, Principal Inputs 等) の表示が可能である. また FFT モードで測定したデータに対しては, スペクトラムの表示と, 選択した周波数に対する実稼働アニメーションを表示できる. Time モードで

測定したデータに対しては, 時間領域の実稼働アニメーションの表示が可能である.

(6) データのエクスポート

スペクトラムやジオメトリ等の各種データについて, ASCII ファイル形式, ME' Scope ファイル形式, UFF (ユニバーサルファイル) 形式でエクスポート可能である.

3.2. センサー位置制御ロボット

3.2.1. ロボットの構成

センサー位置制御ロボット (KUKA 社製 KR-150-2) は, 6 軸多関節のロボット本体, ロボット制御装置, ティーチペンダント KCP で構成される. ロボット制御装置と ティーチペンダント KCP の写真を Fig.3.7 に示す. ティーチペンダントはロボットのティーチングおよびプログラミングを行うための装置で, ディスプレイとキーボード, スペースマウスが備わる (Fig.3.8) .

3.2.2. ロボットの仕様

ロボットの仕様を Table 3.1 に示す. ロボット全体の可動範囲を Fig.3.9 に示す. また, ロボットの各軸の回転方向を Fig.3.10 に, 各軸の可動範囲と速度を Table 3.2 に示す.

3.2.3. ロボットの座標系

ロボット動作の基準となる座標系は次の 4 種類があり, 用途に応じてそれぞれの座標系を適切に設定することで, ロボットを効率的に操作できる.

- **WORLD** 座標系 : ロボットの足先に固定されたデカルト座標系
- **ROBROOT** 座標系 : デフォルトでは WORLD 座標系と一致している. WORLD 座標系からのオフセット



Fig.3.7 ロボット制御装置とティーチペンダント KCP



2-15: KCP 前面

- | | |
|-------------------|---------------|
| 1 モード選択スイッチ | 10 テンキー |
| 2 駆動系 ON | 11 ソフトキー |
| 3 駆動系 OFF/SSB-GUI | 12 リバースボタン |
| 4 非常停止ボタン | 13 スタートボタン |
| 5 スペースマウス | 14 停止ボタン |
| 6 右ステータスキー | 15 ウィンドウ切替ボタン |
| 7 入力ボタン | 16 ESCボタン |
| 8 カーソルキー | 17 左ステータスキー |
| 9 キーボード | 18 メニューキー |

Fig.3.8 ティーチペンダント KCP

Table 3.1 KR150-2 ロボットの仕様

Type	KR 150-2
Maximum reach	2,700 mm
Rated payload	150 kg
Suppl. Load, arm/link arm/rotating col.	50/100/300 kg
Suppl. Load, arm + link arm, max.	100 kg
Maximum total load	550 kg
Number of axes	6
Mounting position	Floor, ceiling
Variant	Cleanroom, Foundry
Positioning repeatability	±0.06 mm
Controller	KR C2 edition2005
Weight (excluding controller), approx.	1,245 kg
Temperature during operation	+10°C to + 55°C
Protection classification	IP 65
Robot footprint	1,006 mm × 1,006 mm
Connection	7.3 kVA
Noise level	< 75 dB

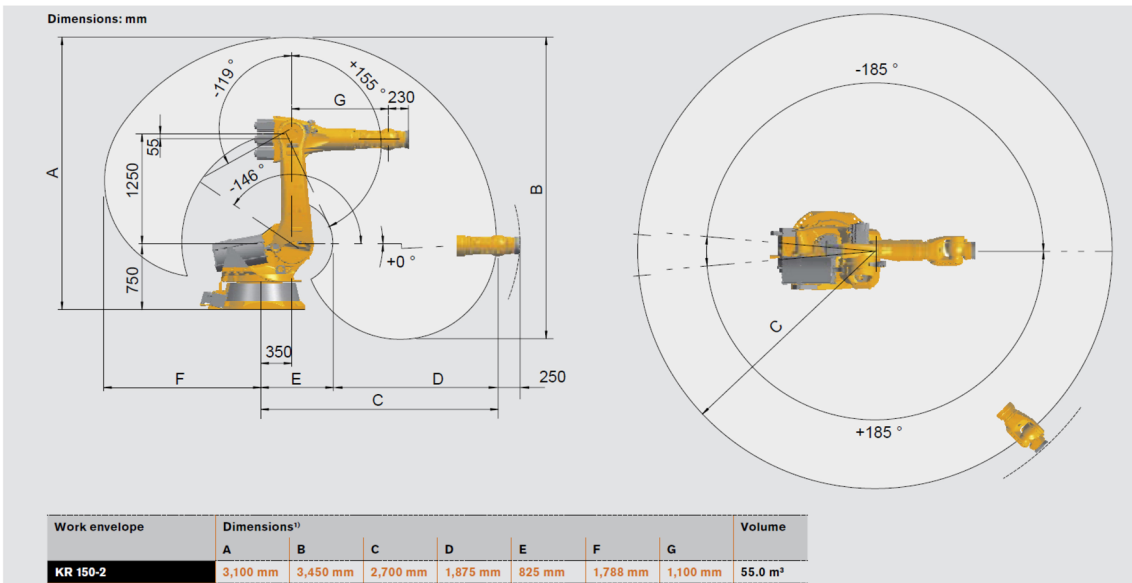


Fig.3.9 ロボットの可動範囲

トを定義することで、ROBROOT 座標系を設定する

- ・ BASE 座標系：対象物を基準とする座標系
- ・ TOOL 座標系：ロボット先端に取り付けるツールを基準とする座標系

ロボットの各座標系のイメージを Fig3.11 に示す。

3.2.4. ロボットの機能

ロボットは手動モード (T1：手動低速モード, T2：手

動高速モード) と自動モード (AUT：自動モード, AUT EXT：外付け自動システムモード) を備えている。手動モードでは、ロボットの手動操作、プログラミング (ティーチング) を行う。自動モードでは、プログラムの自動運転を行う。なお MaVES では、3D スキャニング 振動計の Scanning Head の保護のためにロボットの最高移動速度を 250mm/s に制限している関係で、T2 モードは無効としている。AUT EXT モードは、外付けシステ

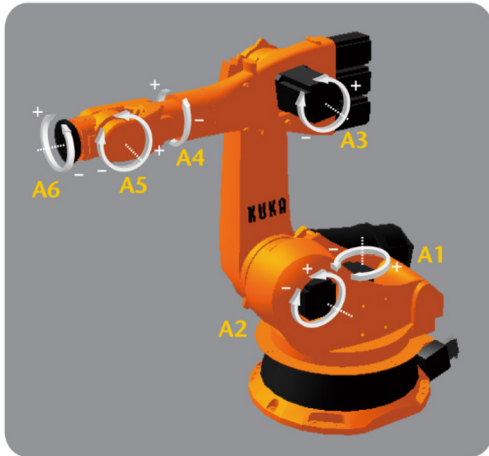


Fig.3.10 ロボットの軸

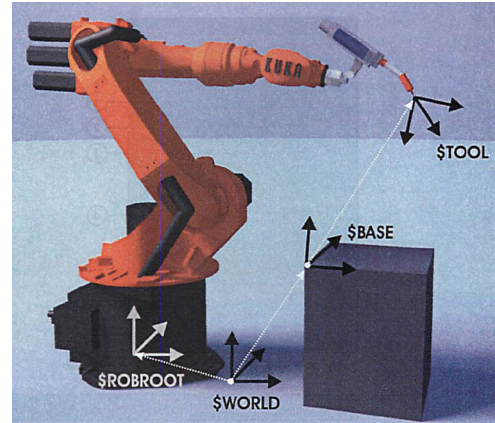


Fig.3.11 ロボットの座標系

Table 3.2 KR150-2 ロボットの各軸の可動範囲と速度

Axis data	Range (software)	Speed with rated payload 150kg
Axis 1 (A1)	$\pm 185^\circ$	110°/s
Axis 2 (A2)	0° / - 146°	110°/s
Axis 3 (A3)	+155° / - 119°	100°/s
Axis 4 (A4)	$\pm 350^\circ$	170°/s
Axis 5 (A5)	$\pm 125^\circ$	170°/s
Axis 6 (A6)	$\pm 350^\circ$	238°/s

ムと同期をとる自動モードであるが、MaVES では使用しない。

(1) 手動操作

ティーチペンダントのスペースマウスまたはキーボードにより、ロボットをコントロールする。手動操作は、各座標系 (WORLD 座標系 /BASE 座標系 /TOOL 座標系) の X, Y, Z, A (Z 軸周りの回転), B (Y 軸周りの回転), C (X 軸周りの回転) の各軸をコントロールするか、直接ロボットの関節軸をコントロールするかのいずれかの方法で行う。

(2) プログラミング

ロボットの運動を自動で行うために高級言語 KRL を用いてプログラミングを行う。プログラミングが可能な運動は以下のとおり。

- PTP 運動 (Point-to-Point 運動): 一番早い経路に沿って運動
- LIN 運動 (直線運動): 直線経路に沿って運動
- CIRC 運動 (円運動): 指定した円に沿って運動
- SPLINE 運動 (スプライン運動): 指定した点を滑らかに結ぶように運動

このほか、制御命令 (LOOP, IF, SWITCH, WHILE, REPEAT, FOR 等) や関数 (WAIT 等) を用いたプログラミングが可能である。

3.3. 統合ソフトウェア

3.3.1. ソフトウェアの役割

統合ソフトウェア (Polytec 社製 RoboVIB) は、センサー位置制御ロボットの制御ソフトウェアと PSV ソフトウェアをコントロールし、ロボットの動作と計測の同期を行う。自動計測の要となるソフトウェアであり、Data Management System の PC にインストールされている。

3.3.2. 統合ソフトウェアの機能

統合ソフトウェアは主に次の機能を備えている。

(1) ロボットの位置座標の取得

ロボットの位置座標を取得することで、PSV ソフトウェアにおいて計測点の位置座標を決定することが可能となる。

(2) ティーチングしたロボットの位置に対応する計測点の割り当て

ティーチング済みのロボット位置に対し、精度良く計測可能な計測点を割り当てる。計測可能かどうかの判定は、最大計測距離、供試体に対するレーザーの角度、計測点が供試体自身の陰になっていないか等の各種条件を基に行われる。結果として計測不可能な点が無いかの判別が可能となる。

(3) ロボットと計測の同期

ロボットプログラムと PSV ソフトウェアによる計測を同期させ、自動計測を可能にする。

3.4. モーダル解析ソフトウェア

モーダル解析ソフトウェア (LMS 社製 Test.Lab) は、ジオメトリの作成、振動計測、実稼働解析、モード解析等が可能なソフトウェアである。このソフトウェア単体でも使用可能であるが、MaVES においては、PSV ソフ

トウェアで得られた振動特性データ（ユニバーサルファイル形式）を Test.Lab にインポートしてモード解析を行うという使い方がメインとなる。

3.4.1. ソフトウェアの構成

ソフトウェアは下記に示す複数のモジュールから構成されている。

- Test.Lab Desktop - Advanced
- Test.Lab Frontend driver (8-channel)
- Test.Lab Impact Testing
- Test.Lab Spectral Testing
- Test.Lab Geometry Workbook
- Test.Lab Modal Analysis
- Test.Lab Time Data Signal Calculator
- Test.Lab Source Control
- Test.Lab Time Recording add-in
- Test.Lab PolyMAX
- Test.Lab Automatic Modal Parameter Selection
- Test.Lab Signature Throughput Processing
- Test.Lab Operational Deflection Shapes & Time Animation Workbook
- Test.Lab Operational Modal Analysis

3.4.2. モーダル解析ソフトウェアの機能

モーダル解析ソフトウェアは下記の機能を有する。

(1) ジオメトリの作成

計測点に関する 3 次元形状モデルを作成できる。ここで作成したモデルは計測・解析データに基づいて 3D アニメーションに用いられる。

(2) データの計測

計測チャンネル、センサー、トリガー条件、窓関数、加振信号等の設定を行った後に、ハンマリングまたはシェーカー加振でデータ（Time, Octave, Spectrum, Autopower, Crosspower, FRF, Coherence）を計測する。

(3) モード解析

解析周波数範囲の設定、安定化ダイアグラム計算、ポールの選択（手動選択、自動選択）、カーブフィットによる合成 FRF の計算、モードシェープの計算、MAC 値の計算等を行う。カーブフィット手法は、LSCE(Least Squares Complex Exponential time-domain) および PolyMAX(Least Squares Complex frequency-domain) の 2 種類を選択可能である。モード解析結果に関し、モードシェープのアニメーション表示や合成 FRF の表示が可能。

(4) 実稼働解析

定常解析およびトラッキング解析を行う。解析結果について、周波数軸 / 時間軸の実稼働アニメーションを表示可能。

(5) 実稼働モード解析

実稼働データをもとに、固有モードの推定解析が可能。

3.5. その他

3.5.1. セーフティライトバリア

セーフティライトバリアは、SICK 社製 M4000 スタンドの投光器と受光器を一つの治具に固定してセットにしたものを 4 隅に配置することで 4 辺をレーザーで囲み、レーザーが遮断されると自動運転中のロボットが緊急停止する安全装置である。セーフティライトバリアの三面図を Fig.3.12 に示し、仕様を Table 3.3 に示す。Fig.3.13 にはセーフティライトバリアの全景を示す。またセーフティライトバリアの制御盤を Fig.3.14 に示す。制御盤はロボット制御装置の天板に設置されている。ライトカーテン電源を入にしてリセットボタンを押し、ライトカーテン 1～4（それぞれ 4 辺に対応する）の通光ランプが緑に点灯すると、安全装置が作動する。4 辺のどこかでレーザーが遮断されると、対応する通光ランプが消灯し、ロボットが緊急停止する。

3.5.2. Scanning Head 取り付け治具

3D スキャニング振動計の Scanning Head は、取り付け治具を介してロボットアームの先端に取り付けられている (Fig.3.15)。取り付け治具について Fig.3.16 に示す。

3.5.3. ロボット架台

ロボットは専用の架台 (Fig.3.17) に設置され、架台を床に 4 本のアンカーボルトで固定される。このアンカーボルトを外すと、パレットトラッカによりロボットを架台ごと移動できる。

3.5.4. PC とネットワーク

MaVES では、以下の 3 台の PC と NAS が使用されており、ローカルネットワークで接続されている。3D スキャニング振動計用 PC には Microsoft Windows 7、そのほかの PC には Microsoft Windows XP がインストールされ、ワークグループ名は MAVES-NET である。

- 3D スキャニング振動計用 PC（コンピュータ名：PSV400, IP:192.168.100.1）
- センサー位置制御ロボット用 PC（コンピュータ名：KR150, IP:192.168.100.11）
- モーダル解析ソフトウェア用 PC（コンピュータ名：MAVES, IP:192.168.100.2）

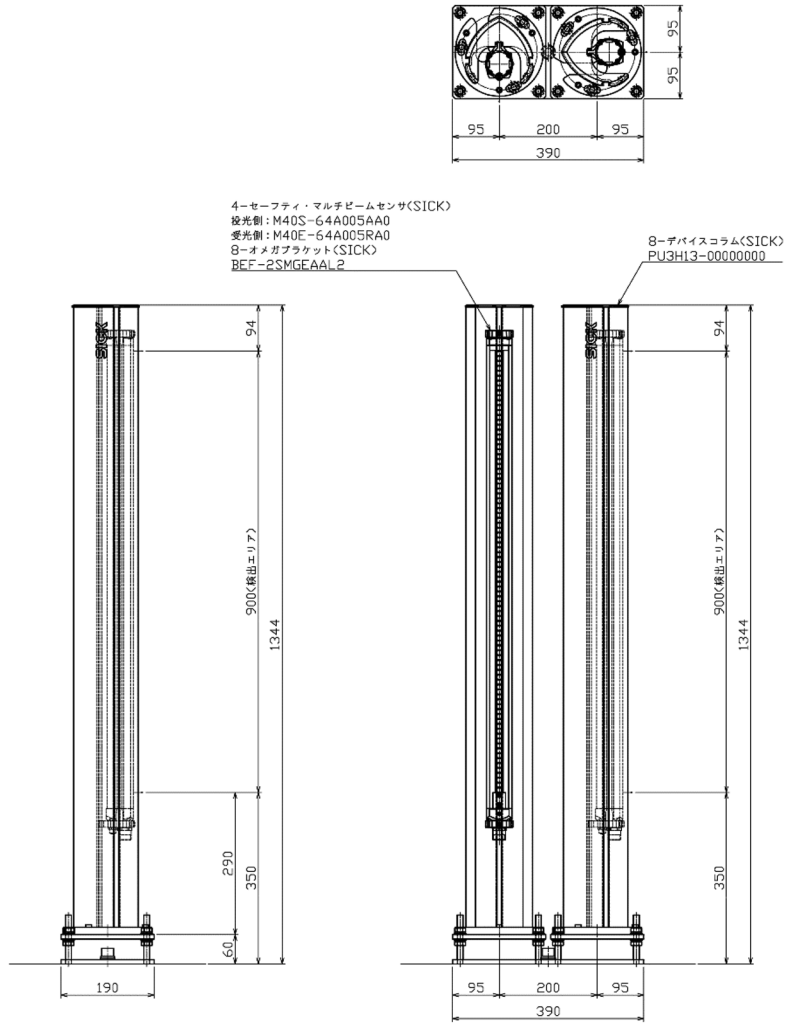


Fig.3.12 セーフティライトバリアの三面図

Table 3.3 セーフティライトバリアの仕様

	投光器	受光器
対象検出物体	60mm	
モニタリング対象エリアの長さ	900mm	
検出距離	—	0.5m ~ 6m / 5m ~ 19m (設定可能)
応答時間	—	最大 17ms
保護クラス	Ⅲ (EN 50178:1998)	
保護構造	IP 65 (EN 60529)	
同期	光学的 (同期用光軸による)	
安全カテゴリー	Type 4 (IEC 61496)、SIL3 (IEC 61508)	
使用周囲温度の範囲	-0°C ~ +55°C	
保管温度の範囲	-25°C ~ +70°C	
周囲湿度	15% ~ 95%、結露がないこと	
ハウジング断面	52mm x 55.5mm	
耐振動	5g、10Hz ~ 55Hz (IEC 60068-2-6)	
耐衝撃	10g、16ms (IEC 60068-2-29)	
ハウジング材料	アルミニウム合金 ALMGSI 0.5	
フロントスクリーン材料	ポリカーボネート樹脂、傷防止コーティング	



Fig.3.13 セーフティライトバリアの全景

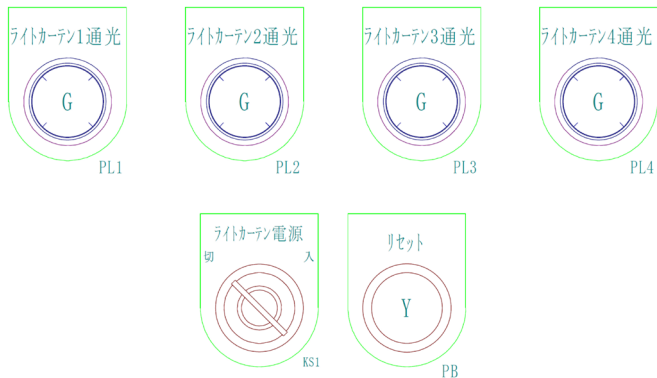


Fig.3.14 セーフティライトバリアの制御盤

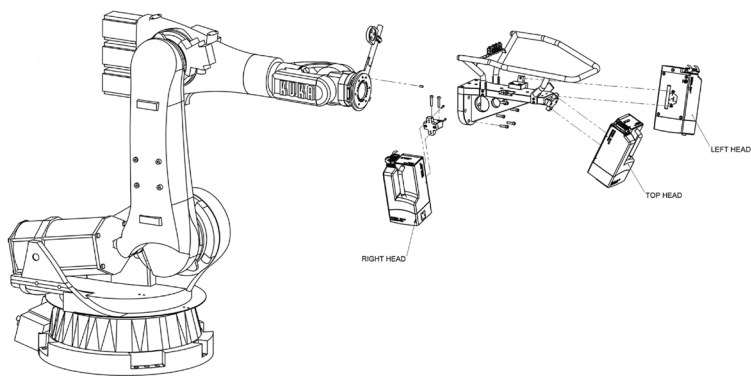


Fig.3.15 ロボットと Scanning Head

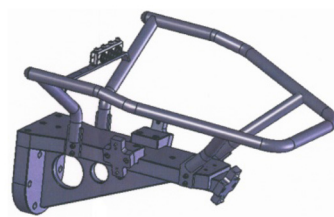


Fig.3.16 Scanning Head 取り付け治具

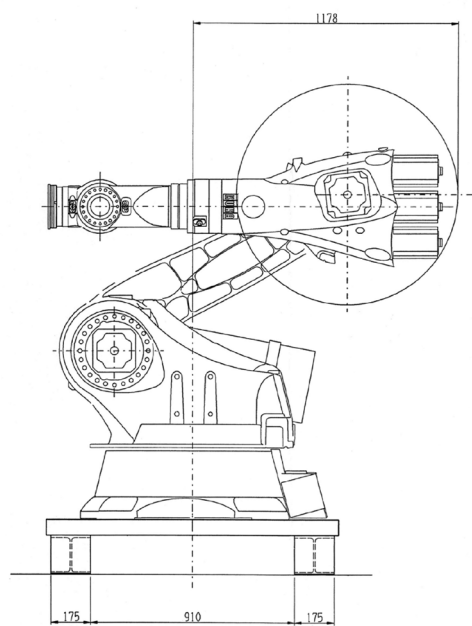
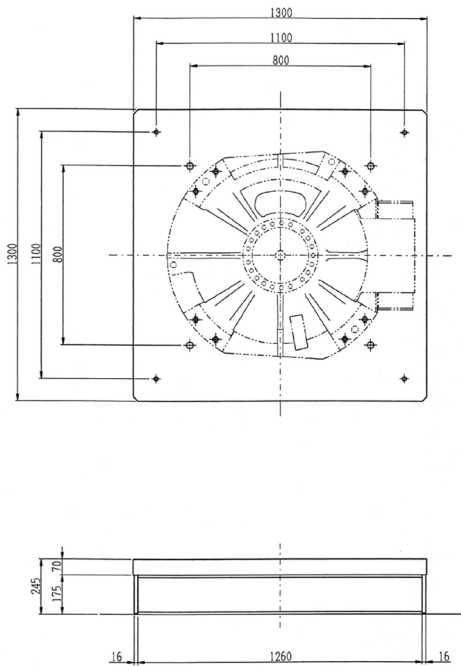


Fig.3.17 ロボット架台の三面図

- データ保存用 NAS (コンピュータ名: MAVENAS, IP:192.168.0.4)

3.5.5. レーザー振動計

3D スキャニング振動計の他に、さらに別のレーザー振動計 Polytec 製 NLV-2500 を備えている (Fig.3.18)。レーザー振動計はセンサヘッドとコントローラ (NLV-2500-5) から構成される。コントローラには 8 種類のレンジを設定できる速度 Decoder が搭載され、最大で 10m/s、2.5MHz までの測定レンジをカバーする。RS-232C により 3D スキャニング振動計の PC に接続することで、レンジ設定等を PSV ソフトウェアからコントロール可能である。レーザーの適用基準を Table 3.4 に、システム概要を



Fig.3.18 レーザー振動計 (NLV-2500)

Table 3.5 に、センサヘッドの仕様を Table 3.6 に、振動計コントローラの仕様を Table 3.7 にそれぞれ示す。また、速度および変位のレンジダイアグラムを Fig.3.19 に示す。

3.5.6. 定盤

供試体の設置や光学系の設置のために光学定盤 (シグマ光機社製 h-HOS-2412LA, Fig.3.20) を用意している。天板は 2400mm × 1200mm で、全面に M6 のタップ穴 (深さは 5mm) が 25mm の間隔で加工されている。なお、一番外周のタップ穴は定盤端から 25mm 位置にある。必要に応じてエアポンプによりエアを供給することで空気バネによる防振が可能である。総重量は 866kg で、搭載可能重量はおよそ 400kg である。

Table 3.4 NLV-2500 レーザ振動計 (適用基準)

規格	
レーザ安全規格	IEC/EN 60825-1 (CFR 1040.10、CFR 1040.11)
電気安全規格	IEC/EN 61010-1
EMC	IEC/EN 61326

Table 3.5 NLV-2500 レーザ振動計 (システムの概要)

構成装置	コントローラ	センサヘッド
外形寸法 [L x W x H]	450mm x 355mm x 150mm	201mm x 38mm x 71mm
重量	11kg	800g
保護等級	I (保護接地)	IP64
電源	100 ~ 240VAC ±10%、50/60Hz、最大 75W	
動作温度	+5 ~ +40°C	
保管温度	-10°C ~ +65°C	
相対湿度	最大 80%、結露なきこと	
光ファイバケーブル長	3m (コントローラ-センサヘッド間)	
出力電圧	±10V	
外部インタフェース	RS-232、最大 115kBd、振動計コントローラ用シリアルポート	
フィルタ	ハイパスフィルタ: 100Hz / off ローパスフィルタ: 5kHz / 20kHz / 100kHz / off トラッキングフィルタ: slow / fast / off	

Table 3.6 NLV-2500 レーザ振動計 (NLV-2500 センサヘッド)

光学仕様	
レーザの種類	ヘリウムネオン (HeNe)
レーザ安全規格	クラス 2、<1 mW、可視光源
レーザの波長	633nm、赤色可視レーザ光
測定距離	200mm (光学アクセサリなしの場合) ~ 無限大
最小スポット径	1.5µm (VIB-A-20xLENS 20 倍対物レンズを使用した場合)
コヒーレンス	287mm + n · 204mm; n=0; 1; 2; ...

Table 3.7 NLV-2500 レーザ振動計 (NLV-2500-5 振動計コントローラ)

デコーダ	デジタル加速デコーダ	デジタル変位デコーダ
レンジ数	8 レンジ	16 レンジ
測定範囲	5 ~ 1,000mm s-1/V	0.05 ~ 5,000µm/V
フルスケール出力	0.05 ~ 10m/s (p)	1 ~ 100,000µm (p-p)
最大デコーダ周波数	100kHz ~ 2.5MHz	2.5MHz
分解能	0.01 ~ 4µm s-1/√Hz	0.015 ~ 1,500nm
最大加速度	3,200 ~ 9,600,000g	-

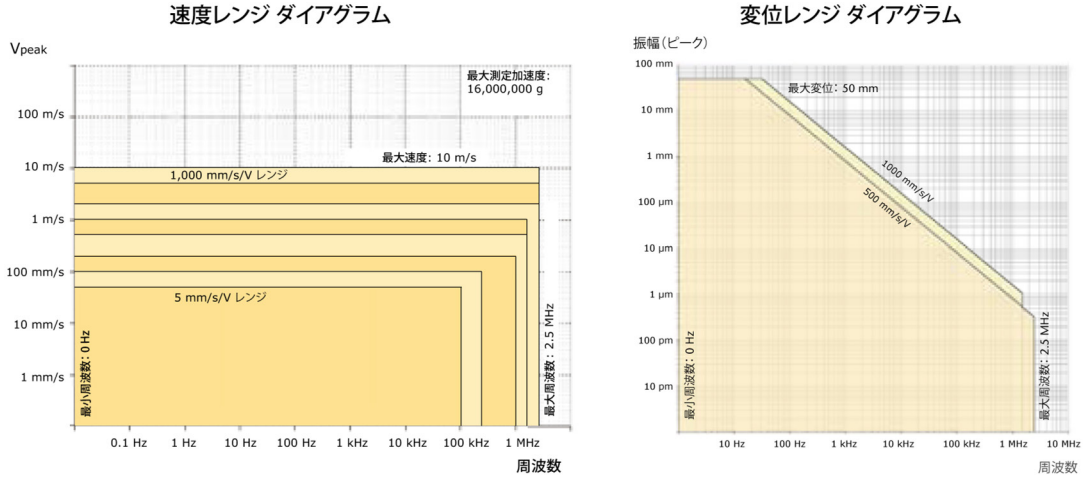


Fig.3.19 レーザー振動計のレンジダイアグラム

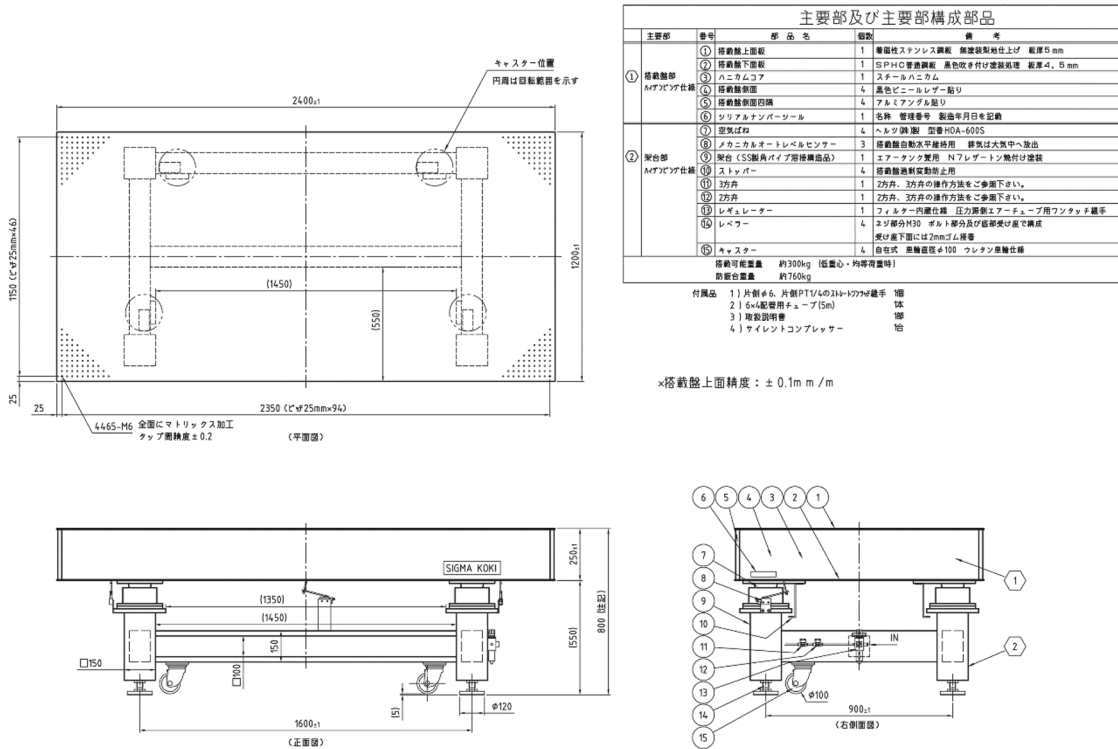


Fig.3.20 定盤

4. MaVES-c の詳細

本章では、MaVES-cの各ハードウェア、ソフトウェアについて詳細を示す。

4.1. 1D スキャニング振動計

4.1.1. 振動計の構成

1D スキャニング振動計 (Polytec 社製 PSV-500-M) は、Fig.4.1 に示すように、1 台の Scanning Head (PSV-I-500)、1 台の Front-end (PSV-F-500-M)、Data Management System (PSV-W-500-M4, Fig.4.1 では単に PC と表示) から構成される。これらの機器のうち、Scanning Head は次節で述べるセンサー位置制御ロボットのアーム先端に搭載され、残りの機器はラックに収納されている (Fig.4.2)。

Scanning Head は Front-end と接続され、レーザーの照射と受光を行う。なお、Scanning Head には CMOS 方式の Video Camera および Geometry Scan Unit (PSV-G-500)、

Coherence Optimizer (PSV-A-560) が取り付けられている。Scanning Head を Fig.4.3 に、Scanning Head の三面図を Fig.4.4 に示す。

Front-end は Scanning Head からの計測信号をデジタルで受け取り D/A 変換したアナログ信号を Data Management System に送る。加えてアナログ信号の入出力を受け持ち、3 入力 1 出力の信号処理が可能である。

Data Management System は、PC および PSV ソフトウェアから構成され、Front-end とのデータの送受信や、計測データの処理を行う。



Fig.4.3 Scanning Head

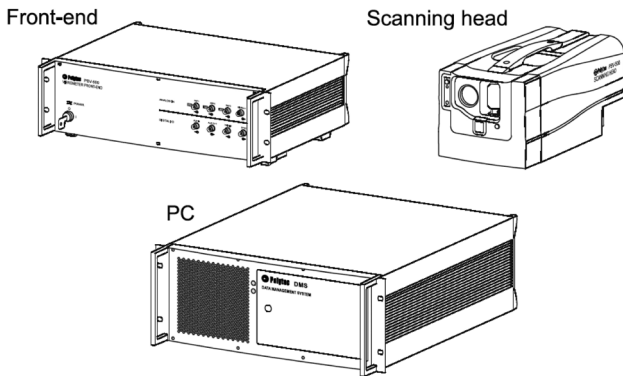


Fig.4.1 1D スキャニング振動計の構成

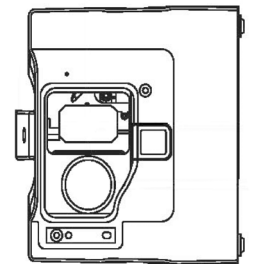


Fig.4.2 1D スキャニング振動計の構成 (ラック)

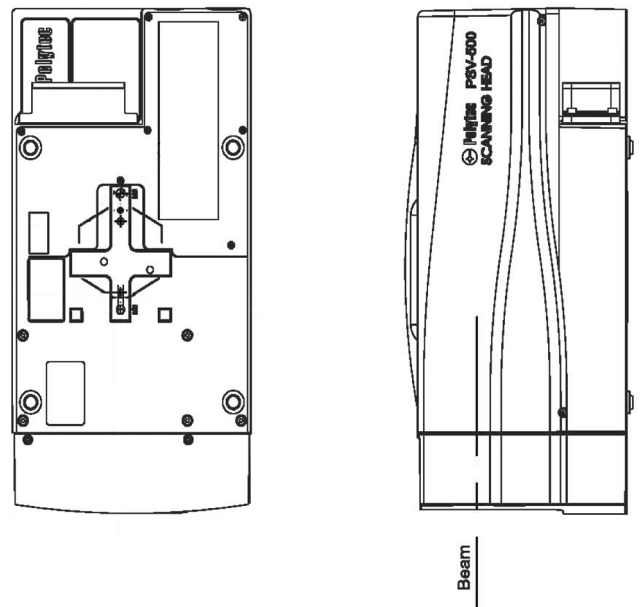


Fig.4.4 Scanning Head の三面図

4.1.2. 振動計の仕様

Scanning Head およびレーザーダイオード式の Geometry Scan Unit のレーザーは、波長レンジが 400nm から 700nm の範囲の可視光放射で出力が 1mW 未満であるため、レーザー光の安全基準である EN60825-1 において laser class 2 に分類される。これは、直接光源が目に入っても、まばたき等の反感反応により目への安全性が保たれるレベルである。

4.1.3. 計測機能

Scanning Head から照射するレーザーにより供試体の振動速度を検出することができるが、ドップラー効果を利用しているため、検出できるのはレーザーの光軸方向の振動速度のみである。なお Scanning Head は、レーザーの光軸をガルバノミラーによりスキャンできる機構 (Scanning Head の水平方向へ $\pm 25^\circ$, 垂直方向へ $\pm 20^\circ$) を有しており、Scanning Head 自体を動かすことなく、一定エリア (目安として、Scanning Head と対象物の距離を 700mm とした場合に、500 ~ 600mm 四方) を計測可能である。

Scanning Head に内蔵された CMOS 方式の Video Camera によるビデオ画像から、PC 上で計測点を設定することが可能である。

さらに、計測点の位置座標も求めることができる。Scanning Head の Geometry Scan Unit で供試体と Scanning Head 間の距離とミラーの角度を基に求める仕組みである。測長用レーザーは、速度計測用レーザーと光源を切り替えて使用し、同じスキャニングミラーを使用する。Scanning Head に内蔵された Coherence Optimizer はレーザーの波長を安定させる役割を果たす。

4.1.4. 光学系

光学系は 3.1.4 節を参照。

4.1.5. 振動速度検出性能

PC には Data Acquisition Board (National Instruments 製 PCI-6110) が内蔵されており、1MHz までの振動 (最高サンプリング周波数 2.56MHz) を計測可能となっている。

振動速度の検出能力は、Controller に内蔵の Decoder に依存する。Decoder は DV-04 を搭載している。DV-04 は 13 種類のレンジ設定が可能であり、最大 10m/s の振動速度を最大 2.56MHz のサンプリング周波数で計測が可能である。

4.1.6. PSV ソフトウェアの機能

1D スキャニング振動計の制御や設定は基本的に全て PSV ソフトウェアで行う。制御や設定項目については、

MaVES の PSV ソフトウェアと同等であり、3.1.6 節を参照のこと。

4.2. センサー位置制御ロボット

4.2.1. ロボットの構成

センサー位置制御ロボット (KUKA 社製 KR16-3) は、6 軸多関節のロボット本体、ロボット制御装置、smartPAD で構成される。ロボット制御装置と smartPAD の写真を Fig.4.5 に示す。smartPAD はロボットのティーチングおよびプログラミングを行うための装置で、タッチパネル式のディスプレイとスペースマウスが備わる (Fig.4.6)。

4.2.2. ロボットの仕様

ロボットの仕様を Table 4.1 に示す。ロボット全体の可動範囲を Fig.4.7 に示す。また、ロボットの各軸の回転方向を Fig.4.8 に、各軸の可動範囲と速度を Table 4.2 に示す。

4.3. その他

4.3.1. 安全フェンス

システムの周囲には安全フェンスが設置されている。フェンスには 2 箇所扉 (一つはスライド式、一つは観音開き式) があり、自動計測中に扉を開けると、ロボットが自動停止する機構を備えている。安全フェンスの三面図を Fig.4.9 に示す。

4.3.2. Scanning Head 取り付け

1D スキャニング振動計の Scanning Head は、取り付け治具を介してロボットアームの先端に取り付けられている。

4.3.3. ロボット架台

ロボットは専用の架台 (Fig.4.10) に設置され、架台を床に 4 本のアンカーボルトで固定される。このアン



Fig.4.5 ロボット制御装置と smartPAD

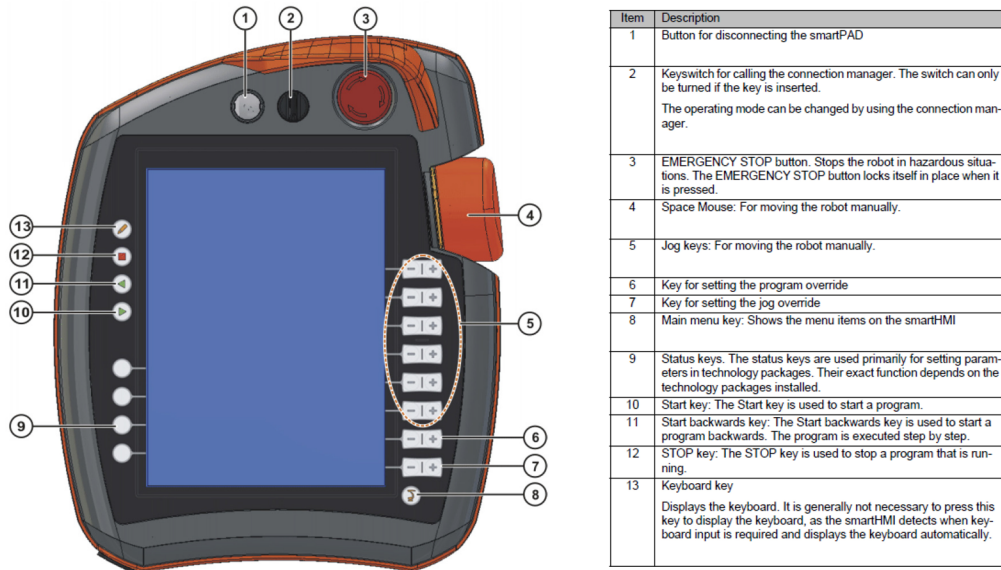


Fig.4.6 smartPAD

Table 4.1 KR16-3 ロボットの仕様

Type	KR 16-3
Maximum reach	1,611 mm
Rated payload	16 kg
Suppl. Load, arm/link arm/rotating col.	10/variable/20 kg
Suppl. Load, arm + link arm, max.	Variable
Maximum total load	46 kg
Number of axes	6
Mounting position	Floor, wall, ceiling
Variant	Cleanroom, Foundry, Explosion-Proof
Positioning repeatability	±0.05 mm
Controller	KR C4
Weight (excluding controller), approx.	235 kg
Temperature during operation	+5°C to + 55°C
Protection classification	IP 65
Robot footprint	500 mm × 500 mm
Connection	7.3 kVA
Noise level	< 75 dB

Table 4.2 KR16-3 ロボットの各軸の可動範囲と速度

Axis data	Range (software)	Speed with rated payload 16kg
Axis 1 (A1)	±185°	156°/s
Axis 2 (A2)	+35°/ - 155°	156°/s
Axis 3 (A3)	+154°/ - 130°	156°/s
Axis 4 (A4)	±350°	330°/s
Axis 5 (A5)	±130°	330°/s
Axis 6 (A6)	±350°	615°/s

カーボルトを外すと、パレットトラッカによりロボットを架台ごと移動できる。

4.3.4. 定盤

第 3.5.6 節に示した光学定盤 (シグマ光機社製 h-HOS-2412LA, Fig.3.20) と同一のものを MaVES-c 用に別途設置している。

Work envelope ¹⁾	Dimensions A	Dimensions B	Dimensions C	Dimensions D	Dimensions E	Dimensions F	Dimensions G	Volume
KR 16-2 S	2,025 mm	2,411 mm	1,611 mm	1,081 mm	530 mm	1,027 mm	670 mm	14.5 m ³

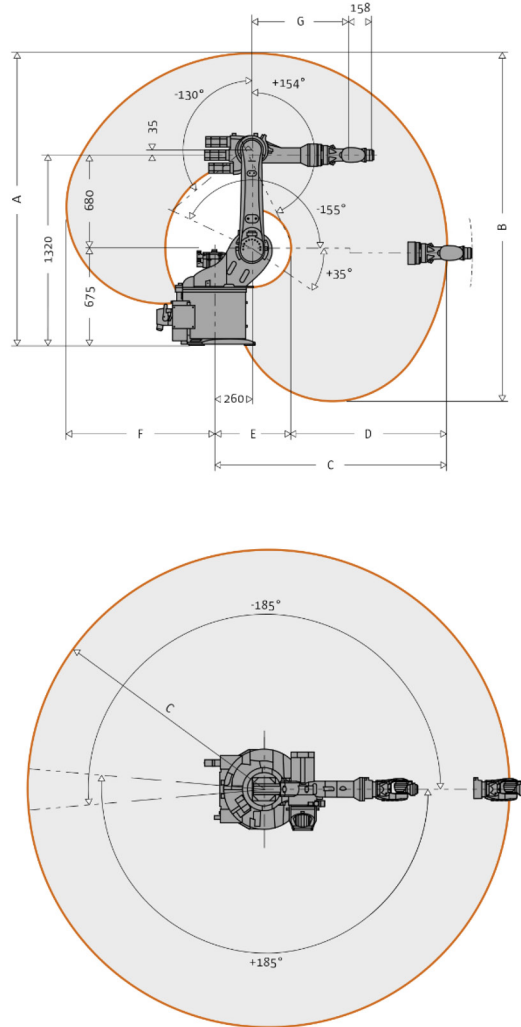


Fig.4.7 ロボットの可動範囲

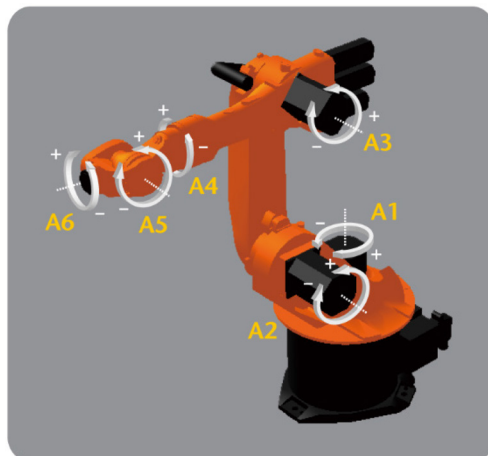


Fig.4.8 ロボットの軸

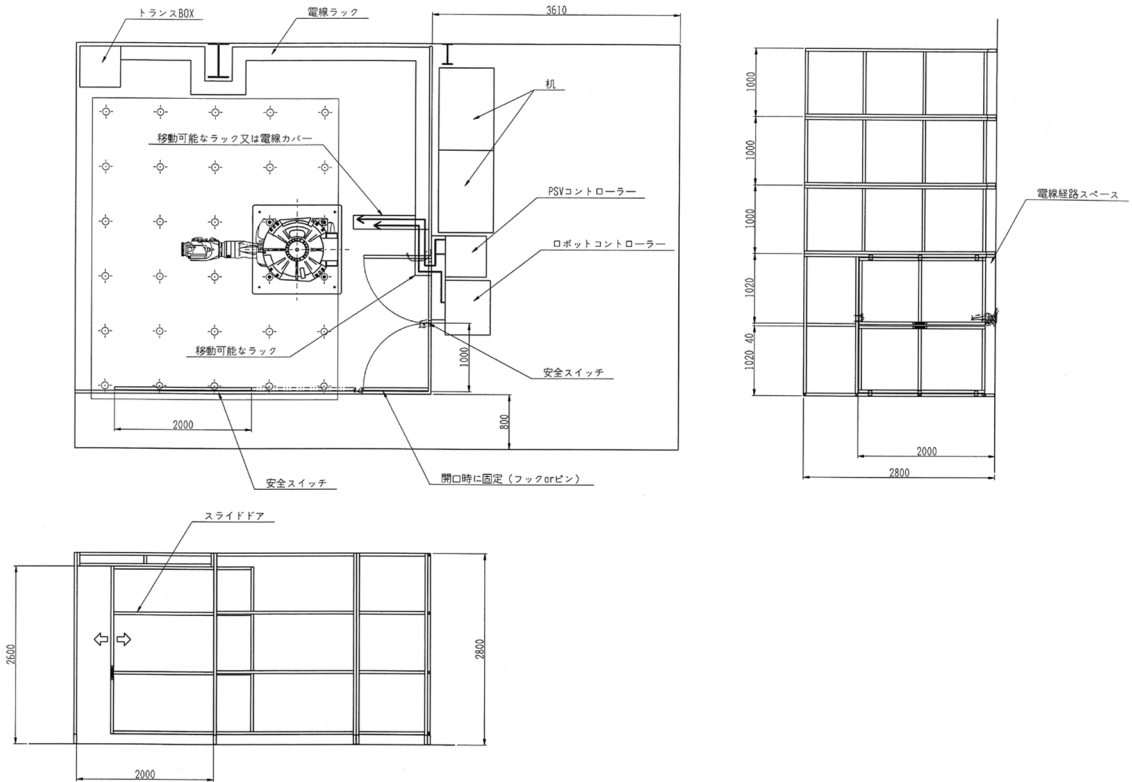


Fig.4.9 安全フェンスの三面図

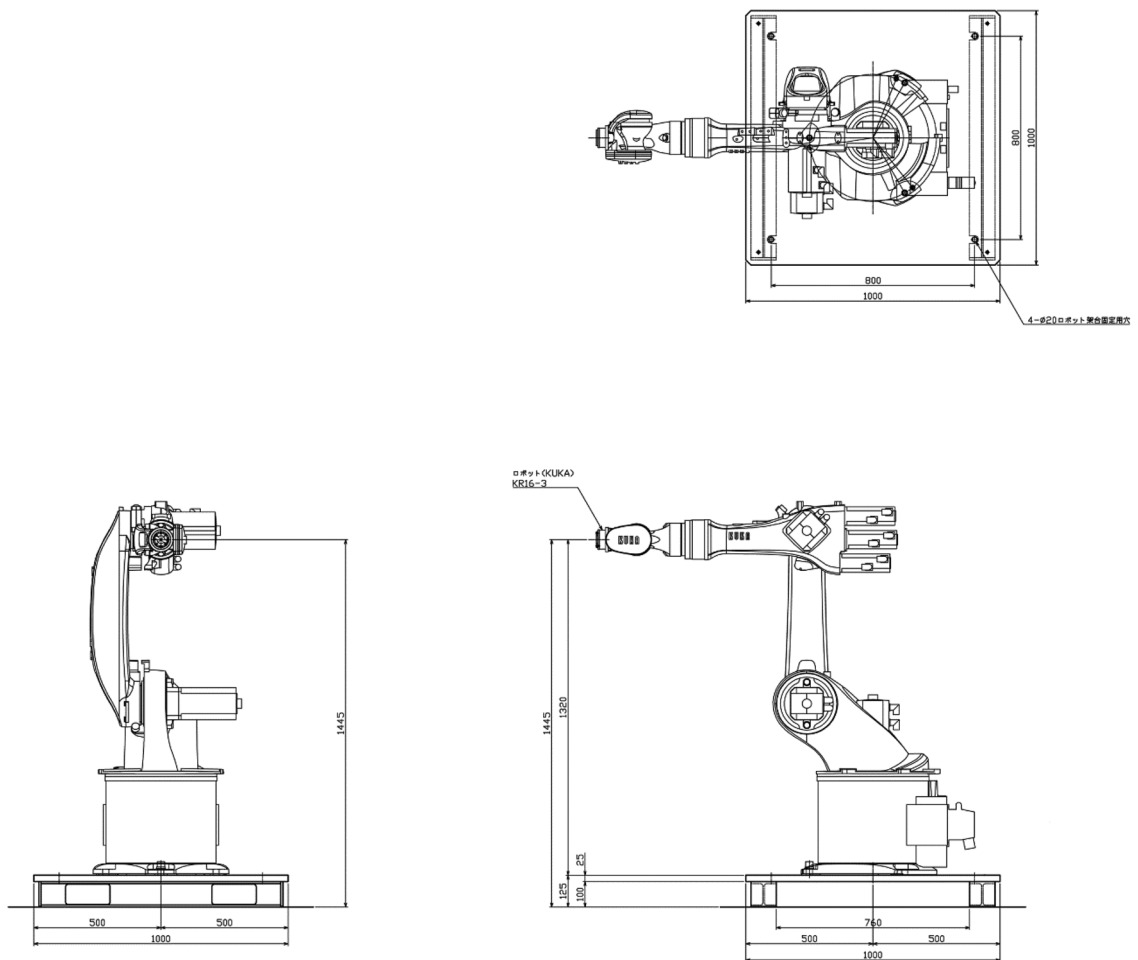


Fig.4.10 ロボット架台の三面図

5. 計測方法

自動計測を行うためにいくつかの準備や設定を行う必要がある。本章では MaVES を例として、計測準備から計測結果の処理までの一連の手順について示す。

5.1. 計測の流れ

自動計測に先立ち、PSV ソフトウェア、RoboVib ソフトウェア、ロボットに対しそれぞれ設定等の操作を行う必要がある。

5.2. 計測準備

5.2.1. 供試体と計測機器の設置

供試体および計測機器を設置する。供試体の設置にあたっては、ロボットの可動範囲を考慮して行う。

5.2.2. システムの切り替え

使用するシステム (PSV-3D-400-H または PSV-3D-400-M) を選択し、PC の背面にある acquisition board (PSV-3D-400-H 用または PSV-3D-400-M 用のうち使用する acquisition board) と junction box をケーブルで接続する。

5.2.3. MaVES の起動

- ロボットの起動：ロボット制御装置の電源を ON にすると、前回終了時の状態に復帰する。
- 3D スキャニング振動計の起動：LEFT および RIGHT の Controller の電源を ON にし (3D 計測を行う場合。1D の場合はこの手順は不要)、次に Junction Box (TOP の Controller と一体) の電源を ON にする。最後に PC の電源を ON にする。これらを ON にすると、Windows 上で、PSV ソフトウェアおよび RoboVib ソフトウェアを起動できるようになる。
- PSV ソフトウェア起動時に、Acquisition Board 選択ウィンドウが表示される。PSV-3D-400-H を選択する場合は "National Instruments PCI-446x" を、PSV-3D-400-M を選択する場合は "National Instruments PCI-611x" を選択する。

5.3. 光学系の設定

光学系の設定には、Preference の設定、2D アライメントの設定、3D アライメントの設定、Base 座標系のキャリブレーションがある。MaVES では、3 台のレーザーセンサーの先端部を結ぶ三角形の重心位置から垂直に 700mm 離れた位置に供試体があることを想定したアライメントデータが用意されている。供試体とセンサーの相対位置をきちんと設定することで、2D アライメン

トおよび 3D アライメントの設定は不要となる。Base 座標系のキャリブレーションについても通常は不要である。なお、3D アライメントの設定を改めて行うことで、700mm 以外の任意のセンサー位置を設定することも可能である。

5.3.1. PSV の Preference 設定

PSV ソフトウェアで Preference の設定を行う (Setup>Preference)。ここでは Scanning Head を何台使用するかを下記のように設定する。

- PSV-E-401-3D : 3 台 (TOP, RIGHT, LEFT) を使用する
- PSV-E-401-3D(1D) : 3 台を起動するが TOP のみを使用
- PSV-E-401-1D : TOP のみを使用

また、Channels タブでは、振動計の制御に使用するチャンネルを設定する。Scanning Head タブでは、Scanning Head に対する詳細な設定を行う。特に Head Angle の設定については、MaVES では 3 台の Scanning Head の取り付けが固定されて角度が決まっており、Top:0°、Left:270°、Right:90° として設定する。Geometry タブでは、Hidden Points の推奨値の計算や焦点値の自動計算の設定を行う。dB Reference タブでは dB の基準を設定する。Messages タブでは表示するシステムメッセージの設定を行う。

5.3.2. 2D アライメントの設定

ビデオ画像上のレーザーの位置を、実際の測定面上にあるレーザーの位置と合うようにアライメントを行う (Setup>2D alignment)。供試体を映し出しているビデオ画像で、供試体上の任意の位置にレーザーをマウスの中ボタンで移動させ、レーザーが照射されている点をマウスで指定する。これを TOP, LEFT, RIGHT の各レーザーにつき、それぞれ 6 点以上指定することで、2D アライメントを行う。実行後は、ビデオ画像上でマウスクリックした点に 3 つのレーザーが照射されるようになる。ロボットを使う場合は、RoboVib ソフトウェアで設定済のアライメントデータを使用するため、この項目に示す手動での設定は不要である。

5.3.3. 3D アライメントの設定

測定領域の座標系の設定を手動で行う (Setup>3D alignment)。実際の供試体上で、3 つのレーザーを 1 点に一致させながら、原点、X 軸の点、Y 軸方向の正の点等を指定して、座標系を決定する。ロボットを使う場合は、RoboVib ソフトウェアで設定済のアライメントデータを使用するため、この項目に示す手動での設定は不要

である。

5.3.4. Base 座標系のキャリブレーション

Base 座標系のキャリブレーションは、ロボットの Base 座標系を設定するために行う。Base 座標系のキャリブレーションは、既に (Base 座標系に基づいた) 計測点が設定された供試体を、ロボットに対し相対移動させた場合に大きな利点がある。これは、Base 座標系をキャリブレーションにより定義し直すだけで過去の計測点の設定を活用できるためである。

過去の計測点の設定を再利用する場合を除けば、本項に示す Base 座標系のキャリブレーションは不要である。

(1) キャリブレーションポイントの設定

- ・ 供試体上に、4 点のキャリブレーションポイントを設定する。このとき 4 点が同一直線上に並ばないようにする
- ・ 各キャリブレーションポイントの座標値を決める

(2) レーザーを原点へ移動

- ・ PSV ソフトウェアで、acquisition mode の 3D Alignment に入る

- ・ Select and Check Point を実行する
- ・ リスト中の最初の alignment point をクリックし、レーザーを原点へ移動する

(3) ロボットプログラムの作成

- ・ ロボットプログラムを新規に開く (Fig.5.1)。なおティーチング時に、プログラムは全て START_PSV_MOVEMENTS の行と PTP HOME の行の間に記述する。
- ・ 3つのレーザーが 1 点目のキャリブレーションポイントに当たるように、ロボットを移動させ、ロボット位置をティーチングする。その際、動作方法は PTP (Point-to-Point) 動作とする。プログラム上でポップアップする PTP インラインフォームにおいて、2 カラム目に設定するロボット位置の名称は B1 とする。3 カラム目は空白とし、4 カラム目および 5 カラム目はデフォルトのままとする (Fig.5.2)
- ・ 残り 3 点のキャリブレーションポイントに対し、インラインフォームの 2 カラム目の名称をそれぞれ B2, B3, B4 とし、ティーチングを繰り返す。
- ・ ロボットプログラムを保存する

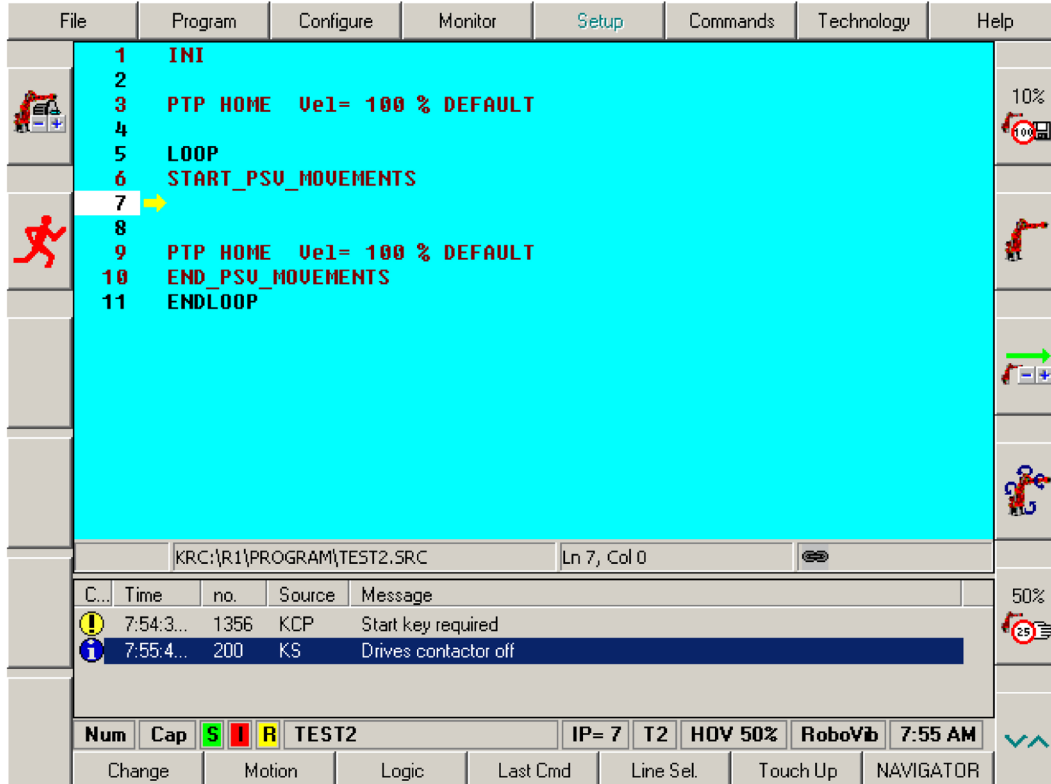


Fig.5.1 ロボットプログラム



Fig.5.2 PTP インラインフォーム

(4)Base キャリブレーションの実行

- RoboVib ソフトウェアの Preferences で、ティーチング済みのロボットプログラムのプログラムパスを入力する
- Setup > Base Calibration を選択し、Base Calibration ウィンドウを開く。
- 4 点のキャリブレーションポイントの座標を入力する。Base 座標系が計算され、ロボットコントローラーに転送される。これにより、ロボットの Base 座標系である BASE[1] が更新される。

5.4. ロボット位置のティーチング

自動計測においてロボットを動かす場合に、予めロボット位置をティーチングしてロボットプログラムを作成する必要がある。ロボット位置については、3 台のレーザーセンサーの先端部を結ぶ三角形の重心位置から垂直に 700mm 離れた位置に供試体があるように設定する (S/N 比とスキャニングの範囲のバランスから 700mm を基準に 3D アライメントデータが設定されている)。レーザーセンサーと供試体の位置関係を Fig.5.3 に示す。

(1) ロボットプログラムの新規作成

ティーチペンダントで、ロボットプログラムを新規作成する (Fig.5.1 を参照)。なおティーチング時に、プログラムは全て START_PSV_MOVEMENTS の行と PTP HOME の行の間に記述する。なお、いくつかのサブプログラムに分割し、メインのプログラムからサブプログラムを呼び出すプログラミングも可能である。

(2) ロボット位置のティーチング

ティーチペンダントによりロボット位置をティーチングする。その際、動作方法は PTP (Point-to-Point) 動作とし、PTP インラインフォームにおいて、2 カラム目に設定するロボット位置の名称は、順番に M1, M2・・・とする。3 カラム目は空白とし、4 カラム目の Tool 座標系を Tool [1] とし、5 カラム目の Base 座標系を Base[0] とする。なお、ロボットと供試体の衝突を防止することを目的として、計測を行わないダミーのロボット位置を設定する必要がある。この場合も PTP 動作とするが、インラインフォームにおいてロボット位置の名称は P1, P2・・・とし、さらに 3 カラム目に CONT を指定する (目標点で止まらないことの指定)。座標系は前述のものと同様、Tool 座標系を Tool [1] とし、Base 座標系を Base[0] とする。

なおレーザーを実際にスキャンさせて計測可能な範囲の目安を確認しながら、ロボット位置をティーチングすることが可能である。これは PSV ソフトウェアのマクロプログラム "ShowScanRangeAndZeroPos" (Examples\

Macros\ShowScanRanges.bas) を実行することにより行う。実行中は常にレーザーがスキャンされ、レーザーの照射範囲が確認できる状態となる。

(3) ロボットプログラムを保存する。

5.5. 計測点の設定

実際に計測を行う点を設定し、ジオメトリ (計測点の集合体) を作成する。レーザーのフォーカスを各計測点に対し最適化する。

(1) ロボット位置の移動

ティーチングしたポジションにロボットアームを移動

(2)3D アライメントの設定

下記を実行することで、新しいロボット位置に対して 3D アライメント (2D アライメントも含む) を設定する。

- RoboVib ソフトウェアの System Control ウィンドウを開く (Setup>System Control)
- Read Position をクリックして、現在のロボット位置を読み込む (読み込まれて表示されるロボット位置座標は、Tool[1], Base[1] の座標系における座標である)
- Set 3D Alignment をクリックして、3D アライメントを設定する

(3) ジオメトリを作成

PSV ソフトウェア上で、CCD カメラの画像上に、計測点を作成していく。作成後、Geometry Scan を実行すると (Scan> Geometry Scan), 各計測点の座標を計測し、ジオメトリが完成する。

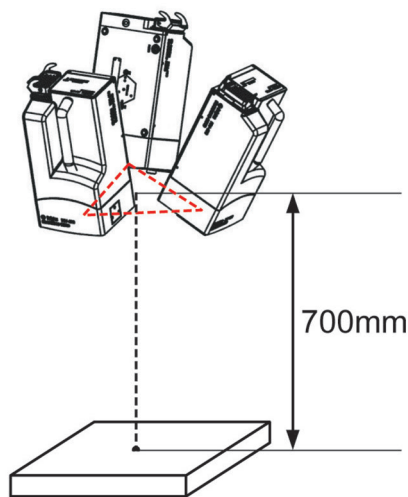


Fig.5.3 センサーと供試体の位置関係

他にもティーチングしたロボット位置が存在する場合は下記を実行の上、(1) から (3) を繰り返す。

- ・ 作成済みのジオメトリを全て選択し、どれか1点の上で右クリックメニュー>Change Indices を選択し、他のジオメトリの計測点番号と重ならないようにオフセットをかける
- ・ Universal File にジオメトリを Export する

全てのジオメトリの作成が終了した後、全ての Universal File を Import Geometry コマンドでインポートして、ジオメトリを完成させる。

(4) フォーカスの設定

- ・ 全ての計測点を選択、そのうち1点の上で右クリックメニュー→ Recalculate Focus Values
- ・ 全ての計測点が Laser Focus Status において Calculated になっているか確認
- ・ Scan>Focus during Scan にチェック (計算した Focus を有効にする)

(5) ビデオトライアングレーションの設定

- ・ Video 画像での三角法により、3点のレーザーを1点に精度良く一致させる場合は、Scan>Video Triangulation during Scan で、Standard か Fast を選択
- ・ Standard は3点を一致させた後、ジオメトリを書き換える。一方 Fast は、3点を一致させるがジオメトリは書き換えない。
- ・ なお、ビデオトライアングレーションを実行すると計測時間が増加する。

(6) 設定ファイルを保存

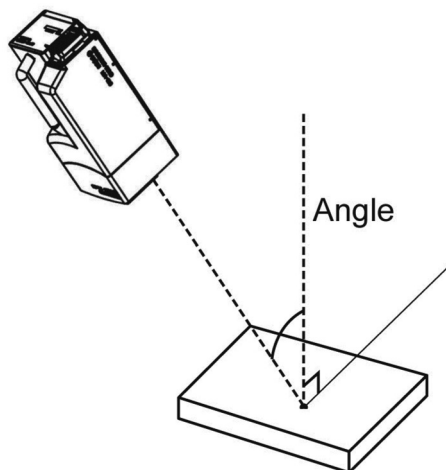


Fig.5.4 Angle of Incidence

5.6. 計測点の解析

計測点を解析し、ティーチングしたロボット位置に対し、作成した計測点の割り当てを行う。全ての計測点に対し計測可能かどうかの判定も行う。

(1) 解析条件の設定

RoboVib ソフトウェア上で、解析条件の設定を行う (Setup>Preference)。設定は Preference ウィンドウで行うが、このウィンドウには General タブと System1 タブがある。General タブでは下記の設定を行う。

- ・ Scan Point Definition File : 計測点が定義された設定ファイルを指定
- ・ Quality Control Folder : 品質コントロールのためのファイルを保存するフォルダを指定
- ・ Maximum Angle of Incidence : 供試体表面に当たるレーザーの最大角度 (供試体表面の法線方向とレーザービームのなす角度) を指定 (Fig.5.4)。もし実際の角度がこの値を超える場合は、計測不可と判断される。
- ・ Maximum Measurement Distance : 計測可能な最大距離の設定 (Fig.5.5)。もし実際の距離がこの値を超える場合は、計測不可と判断される。
- ・ Calculate Hidden Points : チェックボックスを ON にすると、RoboVib ソフトウェアがジオメトリの形状により隠れてしまう計測点 (Hidden Points) を計算する。
- ・ Tolerance for Calculating Hidden Points : Hidden Points の判定に用いる許容値を入力する。許容値より短い距離にある計測点は Hidden Points と判定される (Fig.5.6)。通常、PSV ソフトウェアの Preference の設定ウィンドウの Geometry タブで計算した許容値をそのまま入力する (5.3.1 項参照)。

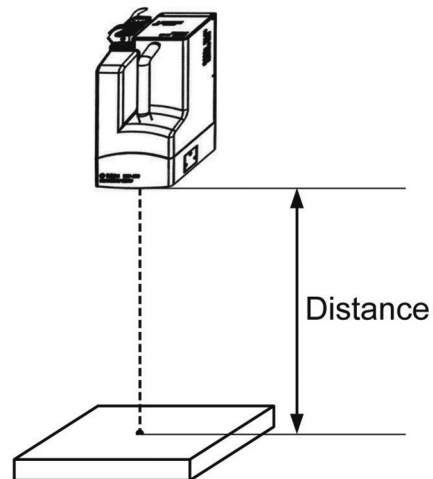


Fig.5.5 Measurement Distance

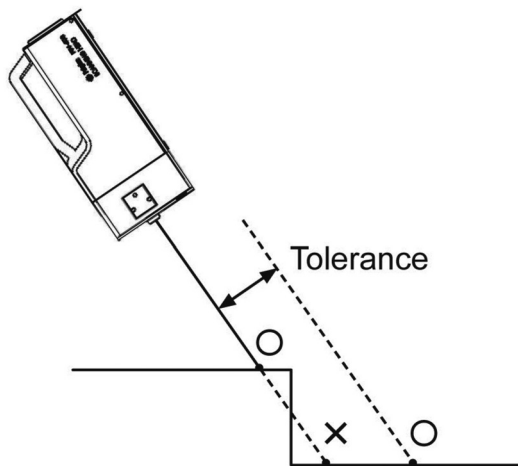


Fig.5.6 Hidden Point

- Calculate 3D Edges: どの計測点が 3D edge 上にあるかを計算させる場合はチェックする。計測点を外れると供試体にレーザーが当たらなくなる可能性がある点を 3D edge と判定する。Fig.5.7 に 3D edge と判定される点とされない点の例について示す。
- Robot Settling Time before Scan: ロボットがティーチングされた位置に移動してから計測が開始されるまでの余裕時間を設定する。ロボットの移動により、センサー自体の振動が励起される場合に、振動が収まるまで計測の開始を遅らせる場合に用いる。

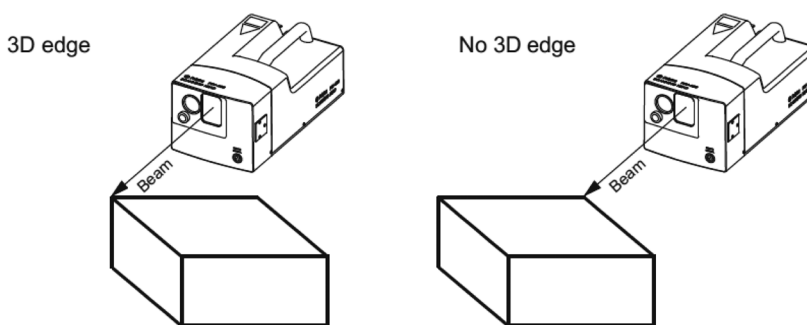


Fig.5.7 3D edge

System1 タブでは下記の設定を行う。

- 3D Alignment File : 3D アライメントの設定データファイルを指定。通常はデフォルトのまま、変更する必要はない。
- Robot Positions File : ティーチング時に作成したロボットプログラムを指定

(2) 解析の実行

設定した解析条件に基づいて、計測点の解析を行う (Action > Prepare Measurement Settings)。解析が終了すると、全ての計測点は 1 つまたは複数のジオメトリコンポーネント (計測点の集合体) に割り当てられ、Quality Control Folder および Measurement Settings Folder に設定ファイルが作成される。

計測点全てに対する割り当ての結果は、Quality Control Folder 内に作成された設定ファイル” MPOS_ALL.set”で確認できる。設定した解析条件と照らし合わせて計測可能と判断された計測点は、対応するロボット位置の名称 (M1, M2, ...) と同じ名称のジオメトリコンポーネントに割り当てられる。計測不可能と判断された計測点は、既定のジオメトリコンポーネント (Table 5.1) に割り当てられる。ここで必要であれば、計測点の修正、解析条件の変更等を行う。

最終的に、Measurement Settings Folder 内にジオメトリ

Table 5.1 既定のジオメトリコンポーネント

コンポーネント名	概要
ANGLE_TOL	計測不可点 (Maximum Angle of Incidence の設定値を超えている)
DIST_TOL	計測不可点 (Maximum Measurement Distance の設定値を超えている)
3D-EDGE	計測不可点 (3D edge と判定されている)
HIDDEN	計測不可点 (Hidden Point と判定されている)
NOT_REACHABLE	計測不可点 (角度がスキャニングの範囲を超えている)
MEASURED	計測可能な点
ANGLE_NOT_BEST	表示しているロボット位置からは計測不可点である (Maximum Angle of Incidence の設定値を超えている) が、他のロボット位置から計測可能 (結果的に計測可能な点)

コンポーネント毎に作成された設定ファイルに従って自動計測が行われる。

5.7. 計測条件の設定

PSV ソフトウェアで、加振条件やデータ取り込み条件などの計測条件を設定する (Acquisition > Settings)。設定する項目は、

- General (一般設定)
- Channels (測定チャンネルの設定)
- Filter (入力信号のデジタルフィルタの設定)
- Frequency (FFT 測定での周波数設定)
- Window (入力信号の窓関数の設定)
- Trigger (トリガの設定)、SE (信号の拡張設定)
- Vibrometer (Decoder の設定)
- Generator (ファンクションジェネレータの設定)
- FastScan (FastScan 測定モードの設定)
- Time (Time 測定モードの設定)

である。

5.8. 自動計測の実行

次の手順で自動計測を開始する。

- 安全フェンスの全ての扉を閉める
- ロボットを自動モード (AUT) にして、プログラムを開始する
- RoboVib ソフトウェアで、measurement sequence を開始する (Action > Start Measurement Sequence)
- 計測結果を保存するファイルを指定する

以上で、自動計測が始まり、進捗状況がウィンドウ上に表示される。

5.9. 計測結果の処理

PSV ソフトウェア上では、計測結果の実稼働表示が可能である (Fig.5.8)。モード解析が必要な場合は、計測結果をユニバーサルファイルにエクスポートし、モード解析ソフトウェアで読み込んで解析を行う。

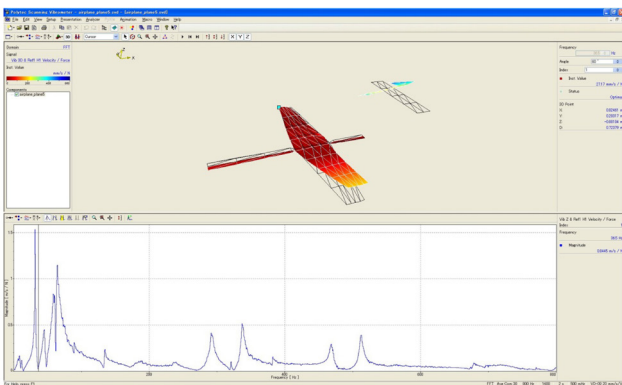


Fig.5.8 計測結果の表示

6. 計測例

本章では実際の計測例 (固有モード計測および超音波弾性波伝播計測) を示す。

6.1. 固有モード計測

飛行機を模擬した供試体の 3 軸振動計測を行い、得られたデータから実稼働解析およびモード解析を行った。

6.1.1. 供試体

計測に用いた供試体は、飛行機を模擬した形状となっており、胴体・主翼・垂直尾翼・水平尾翼 (全て Al 製) で構成されている。供試体は、Ti 製の棒でその胴体後端を支持している。なお主翼の翼端後縁側に、加振用ロッド取り付けの穴がある。供試体の写真を Fig.6.1 に、供試体の三面図を Fig.6.2 に示す。

6.1.2. 計測のセッティング

右主翼の翼端後縁部を、ロッドを介して、シェーカー (本体: B&K 製 4801, ヘッド: 4814, アンプ B&K2707) で 1 点加振を行う。ロッドと模型の間にフォーストランスデューサー (B&K8200) を設置している。フォーストランスデューサーはチャージアンプ B&K2635 に接続し、ここから得られた力信号を参照信号としている。

6.1.3. ロボット位置

ティーチングしたロボット位置は順番に M1 (主翼上方)、M2 (水平尾翼上方)、M3 (垂直尾翼の法線方向) の 3 カ所である。また、M2 から M3 にロボットが移動する際に、模型との接触を避けるために、ダミーのロボット位置 P1 を設定している。それぞれのロボット位置を Fig.6.3 に示す。

6.1.4. ジオメトリ

作成したジオメトリを Fig.6.4 に示す。全計測点数は 83 点である。ジオメトリはロボット位置に対応した 3



Fig.6.1 供試体の写真

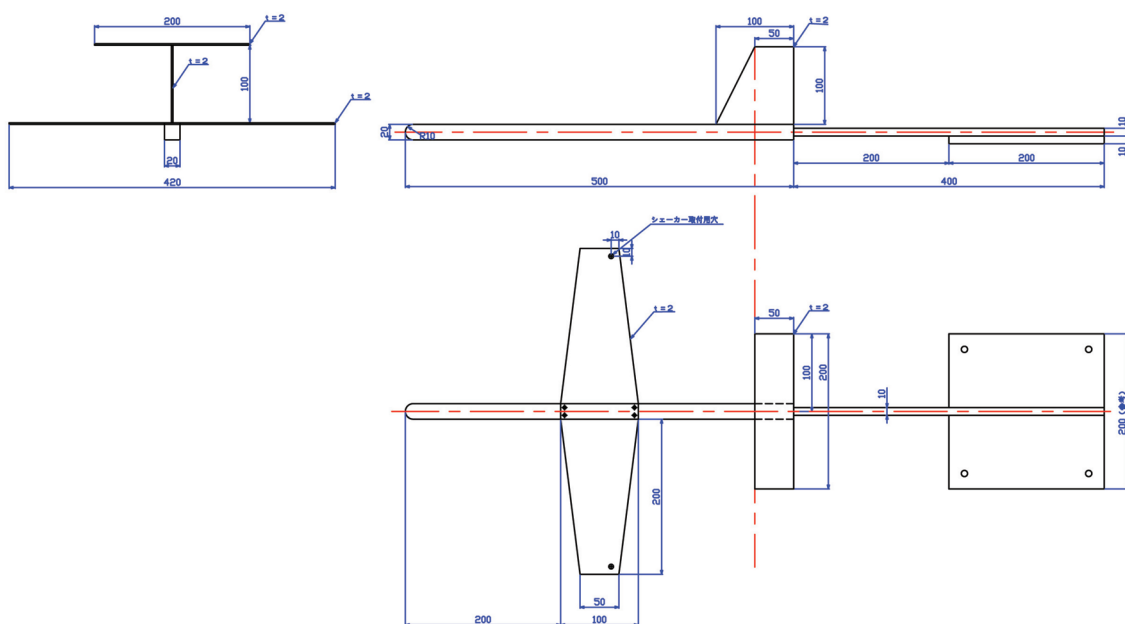


Fig.6.2 供試体の三面図

つのジオメトリコンポーネント (M1, M2, M3) から構成され, それぞれ計測点数は, 56 点, 18 点, 9 点となっている. 各ジオメトリコンポーネントを Fig.6.5 に示す. なお, 図中に 3 個の頂点と各頂点から 4 本の直線が描かれているが, これは頂点が 3 台の Scanning Head (TOP, RIGHT, LEFT) の位置を示し, 直線がスキャン範囲を示している.

6.1.5. 計測条件

力に対する速度の FRF を計測する. 計測条件は, 0-500Hz 帯域でスペクトルライン数は 400 としている (サンプリング周波数 1280Hz, 分解能 1.25Hz, 計測時間 800ms/フレーム). 加振はバーストランダム (1 フレームに対する加振領域 1%-40%) である. 窓関数は, 力・速度ともに Exponential を適用している. Decoder は VD-08 (Range は 10mm/s/V) を選択した. アベレーシング回数は 30 回である.

6.1.6. 実稼働解析

FRF の計測結果 (全ての計測点の平均 FRF) を Fig.6.6 に, 実稼働解析の結果を Table 6.1 に示す.

6.1.7. モード解析

全ての計測点に対応した FRF およびジオメトリを モーダル解析ソフトウェア Test.Lab にエクスポートし, モード解析を行った. Test.Lab 上のジオメトリを Fig.6.7 に, 64 個の固有値解析による安定化ダイアグラムを

Fig.6.8 に示す. PolyMAX 法によるモード解析結果について, Table 6.2 に示す. また, MAC (Modal Assurance Criterion) マトリクスについて, Fig.6.9 および Table 6.3 に示す.

6.2. 超音波弾性波伝播計測

平板供試体の超音波弾性波 (Lamb 波) 計測を行い, 伝播の状況を可視化した.

6.2.1. 供試体

供試体はアルミニウム合金 A2024T3 材の平板である. 平面寸法は 400 × 400mm とし, 板厚は 2.0mm である. 供試体の写真を Fig.6.10, 形状を Fig.6.11 に示す.

6.2.2. 計測のセッティング

供試体は作業台上に平置きとし, 供試体固定穴は本計測では使用していない. また計測レーザーは 1 軸 (TOP) のみを用いた. ジェネレーターは NF 回路設計 Multifunction Generator WF1974, アンプは NF 回路設計 BA4825, AE センサーは Physical Acoustics 社製 R6 (60kHz 共振型) を使用した. 加振は, ジェネレーターから信号を発信して, アンプで増幅し, AE センサーで加振する方式をとった. 計測セットアップ状況を Fig.6.12 に示す.

計測エリアは供試体パネル全面 400mm × 400mm の範囲とし, 超音波弾性波 (Lamb 波) をアルミ板中に励起させるため, AE センサーはシリコングリースで供試体表面に固定した. AE センサー取り付け位置を Fig.6.13



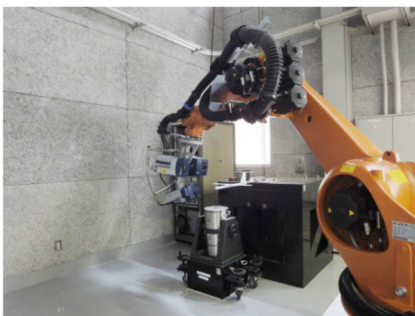
ポジション M1



ポジション M2



ポジション P1



ポジション M3

Fig.6.3 ロボット位置

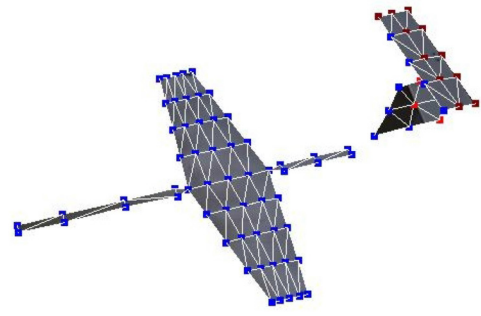
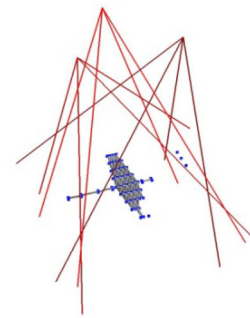
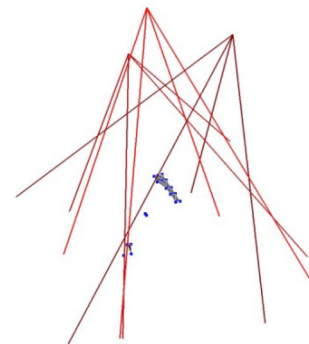


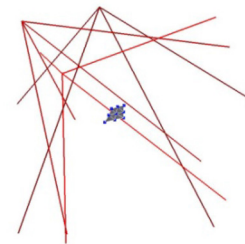
Fig.6.4 ジオメトリ



ジオメトリコンポーネント M1



ジオメトリコンポーネント M2



ジオメトリコンポーネント M3

Fig.6.5 ジオメトリコンポーネント

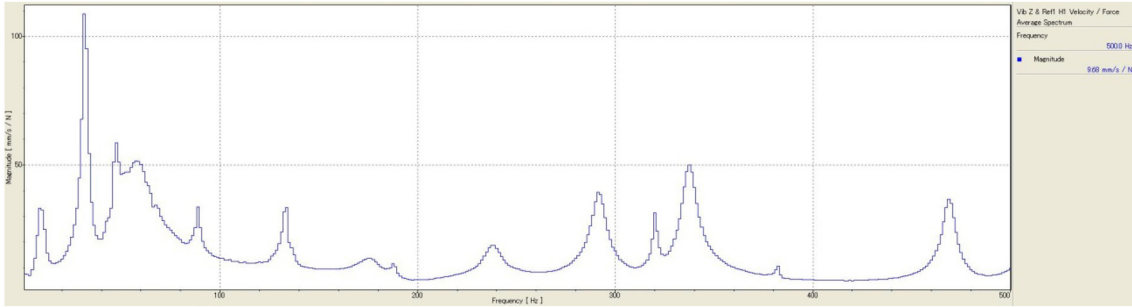


Fig.6.6 周波数応答関数

Table 6.1 実稼働解析

番号	1	2	3	4	5	6	7
形状							
周波数 [Hz]	10	31	48	58	89	134	176
番号	8	9	10	11	12	13	14
形状							
周波数 [Hz]	188	239	291	320	338	383	469

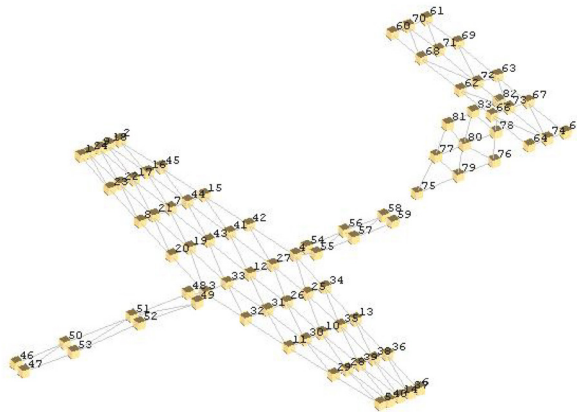


Fig.6.7 Test.Lab 上のジオメトリ

に示す。またアルミ表面に斜めからレーザーを照射した場合に反射光がセンサーに戻りにくいため、供試体表面に光を乱反射させるための現像液を塗布してレーザー受光量を十分に確保した。

6.2.3. ジオメトリ

計測に先立ち、光学系の設定として3Dアライメント

(計測点の座標の基準となる原点および座標軸の設定)、計測点を設定してジオメトリスキャンの実行(作製した計測点の座標の計測と、座標値の割り当て)を行った。作成したジオメトリを Fig.6.14 に示す。全計測点数は4759点である。なお、AEセンサー部、AEセンサーの配線部分、供試体固定穴の部分はレーザーの反射光を計測できないためにジオメトリから除外している。

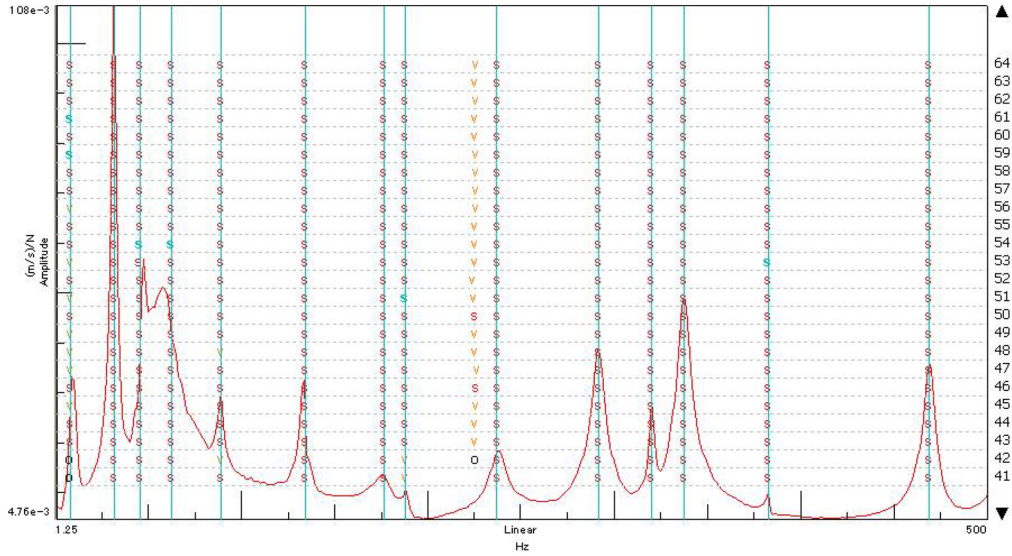


Fig.6.8 安定化ダイアグラム

Table 6.2 モード解析

番号	1	2	3	4	5	6	7
形状							
周波数 [Hz]	8	32	45	63	89	134	176
減衰率 [%]	6.09	3.06	4.19	10.22	0.73	1.09	3.56
番号	8	9	10	11	12	13	14
形状							
周波数 [Hz]	188	237	292	320	337	382	469
減衰率 [%]	0.45	1.87	1.12	0.30	0.95	0.26	0.63

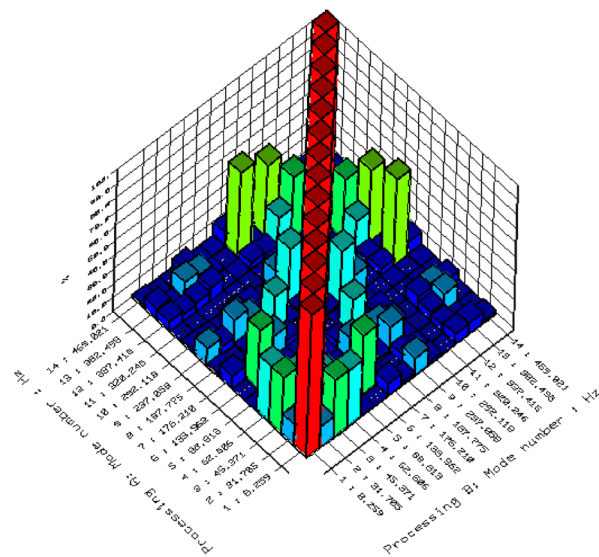


Fig.6.9 MAC マトリクス

Table 6.3 MAC マトリクス

	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5	Mode 6	Mode 7	Mode 8	Mode 9	Mode 10	Mode 11	Mode 12	Mode 13	Mode 14
Mode 1	100	15.041	40.084	39.42	0.448	0.082	9.032	2.287	12.029	2.373	0.151	7.133	8.219	2.03
Mode 2	15.041	100	28.792	5.607	0.059	41.452	0.601	0.03	6.014	1.522	0.014	4.802	0.4	0.057
Mode 3	40.084	28.792	100	20.88	1.437	4.617	9.941	2.249	17.959	0.684	0.16	6.136	12.221	0.136
Mode 4	39.42	5.607	20.88	100	1.882	1.141	15.11	2.618	10.888	5.392	0.06	9.315	10.017	6.014
Mode 5	0.448	0.059	1.437	1.882	100	0.912	4.839	27.725	2.155	4.942	0.241	0.125	1.243	0.581
Mode 6	0.082	41.452	4.617	1.141	0.912	100	0.244	0.554	2.415	0.029	0.006	0.472	0.277	0.614
Mode 7	9.032	0.601	9.941	15.11	4.839	0.244	100	2.006	38.893	14.639	0.021	5.147	59.873	9.491
Mode 8	2.287	0.03	2.249	2.618	27.725	0.554	2.006	100	0.458	1.248	0.012	3.374	1.014	1.187
Mode 9	12.029	6.014	17.959	10.888	2.155	2.415	38.893	0.458	100	5.757	0.765	22.018	50.722	2.381
Mode 10	2.373	1.522	0.684	5.392	4.942	0.029	14.639	1.248	5.757	100	0.142	43.495	1.164	0.064
Mode 11	0.151	0.014	0.16	0.06	0.241	0.006	0.021	0.012	0.765	0.142	100	0.275	0.404	0.01
Mode 12	7.133	4.802	6.136	9.315	0.125	0.472	5.147	3.374	22.018	43.495	0.275	100	2.174	0.014
Mode 13	8.219	0.4	12.221	10.017	1.243	0.277	59.873	1.014	50.722	1.164	0.404	2.174	100	8.528
Mode 14	2.03	0.057	0.136	6.014	0.581	0.614	9.491	1.187	2.381	0.064	0.01	0.014	8.528	100

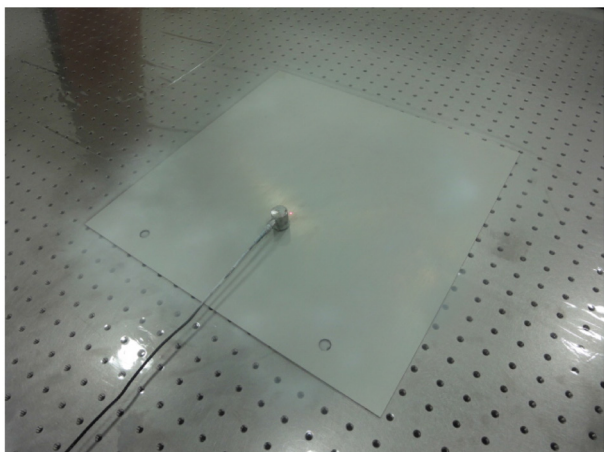


Fig.6.10 供試体の写真

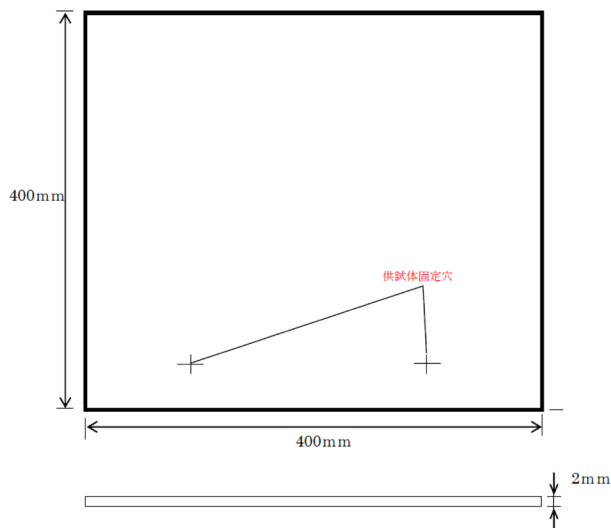


Fig.6.11 供試体の形状



Fig.6.12 計測セットアップ状況

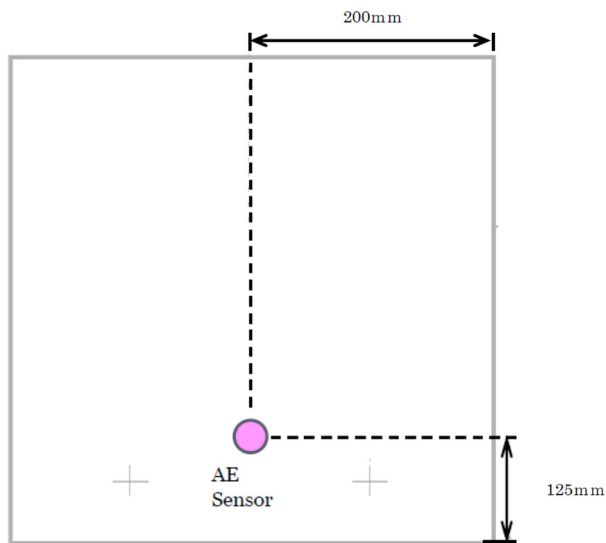


Fig.6.13 AE センサー取り付け位置

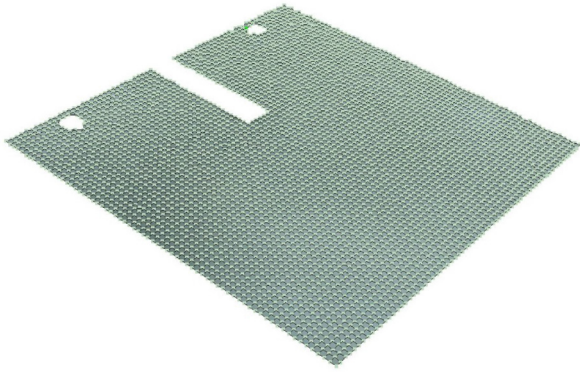


Fig.6.14 ジオメトリ

6.2.4. 計測条件

AEセンサーによる効果的な加振周波数を求めるために、本計測に先立って加振周波数と応答スペクトルの確認を行った。計測はAEセンサー近傍の1点を代表計測点 (Fig.6.15) として周波数帯域0 ~ 200kHz (FFT LINE 数400) でPeriodic Chirp加振を行った。計測の結果、最大応答を発生させる加振周波数は93.5kHzであった。Periodic Chirp加振波形をFig.6.16、代表計測点の応答スペクトルをFig.6.17に示す。

弾性波伝播計測の計測条件は、計測時間400 μ s (サンプリング周波数2.56MHz, サンプル数1024), Data Management SystemのdecoderはVD-09で、レンジは100mm/s/Vを選択し、トリガは計測時間(400ms)の4%の時間をプリトリガとして設定した。トリガ波形をFig.6.18に示す。また、計測信号のフィルタとしてBand

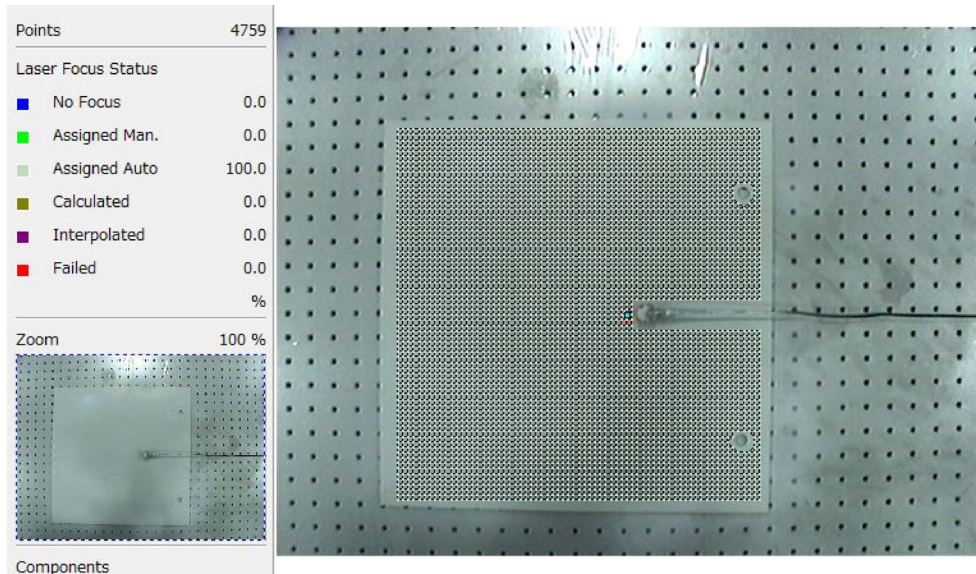


Fig.6.15 代表計測点

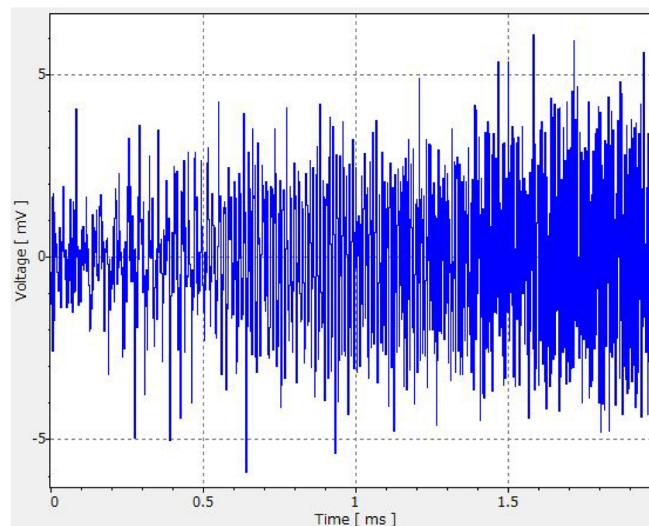


Fig.6.16 Periodic Chirp 加振

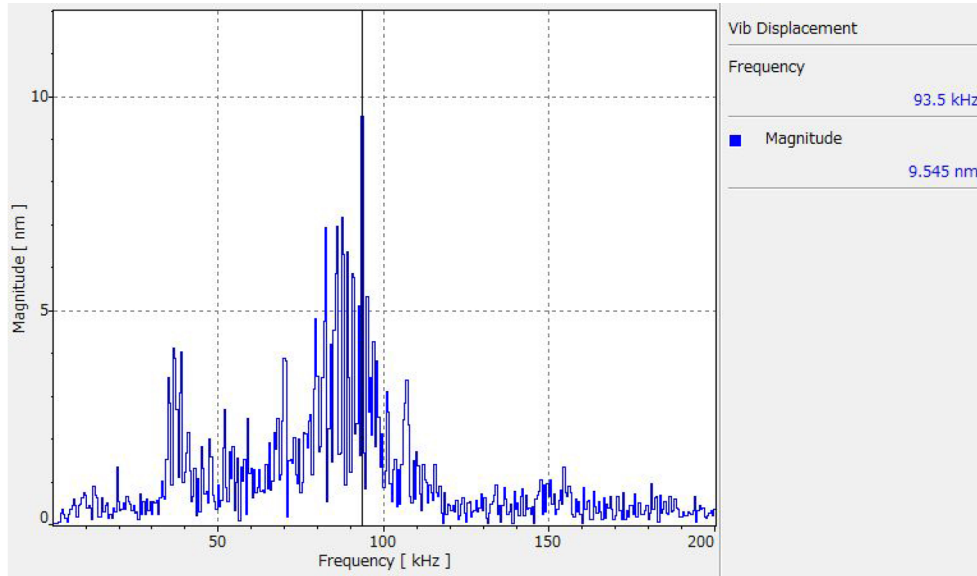


Fig.6.17 応答スペクトル (代表計測点)

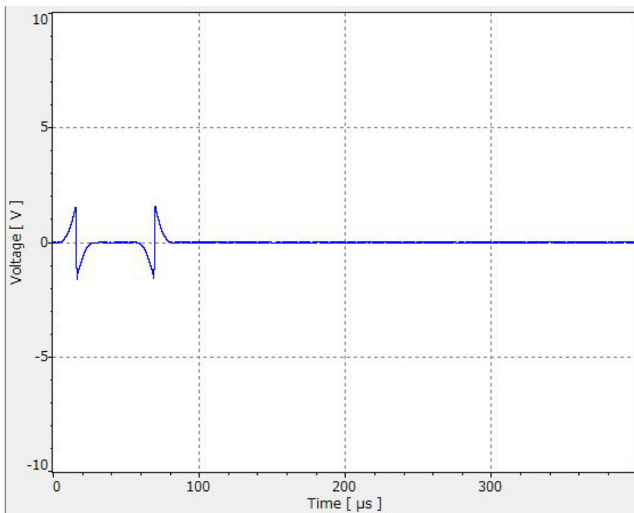


Fig.6.18 トリガ波形

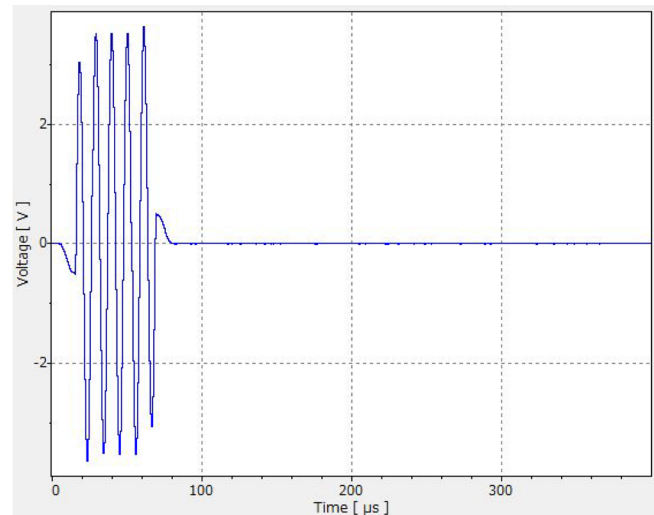


Fig.6.19 加振波形

Pass Filter を Cut Off 周波数 1kHz/300kHz で設定した。アベレーシング回数は各測定点に対して 50 回である。加振波形は 93.5kHz の Burst Sine を 5 波、Sine 波の振幅を 7Vp-p とし、30ms 毎に 5 波ずつ発振させた。アンプはゲインを 20 倍として、Output Range を $\pm 150V$ とした。加振波形を Fig.6.19、代表計測点の応答波形を Fig.6.20 に示す。

6.2.5. 超音波弾性波伝播

伝播の状況を 3D 画像で可視化したものを Fig.6.21 に示す。Fig.6.21 では、加振開始から 200 μs までの伝播の状況を 20 μs 毎に示している。超音波弾性波 (Lamb 波) が板を伝播し、さらに供試体端部で反射していることが明確に分かる。

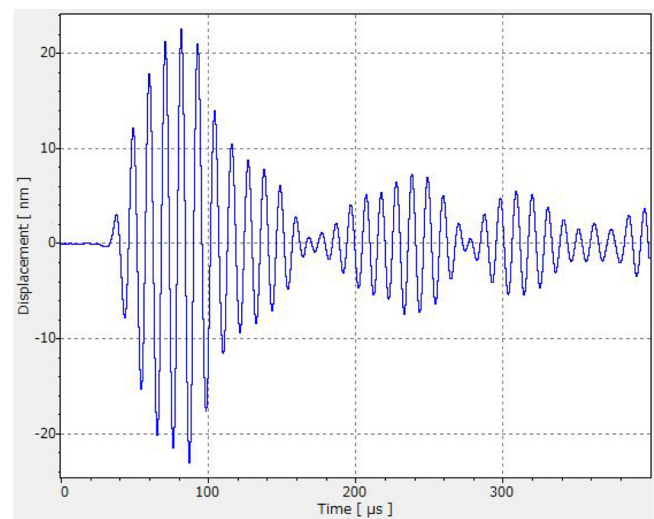


Fig.6.20 応答波形 (代表計測点)

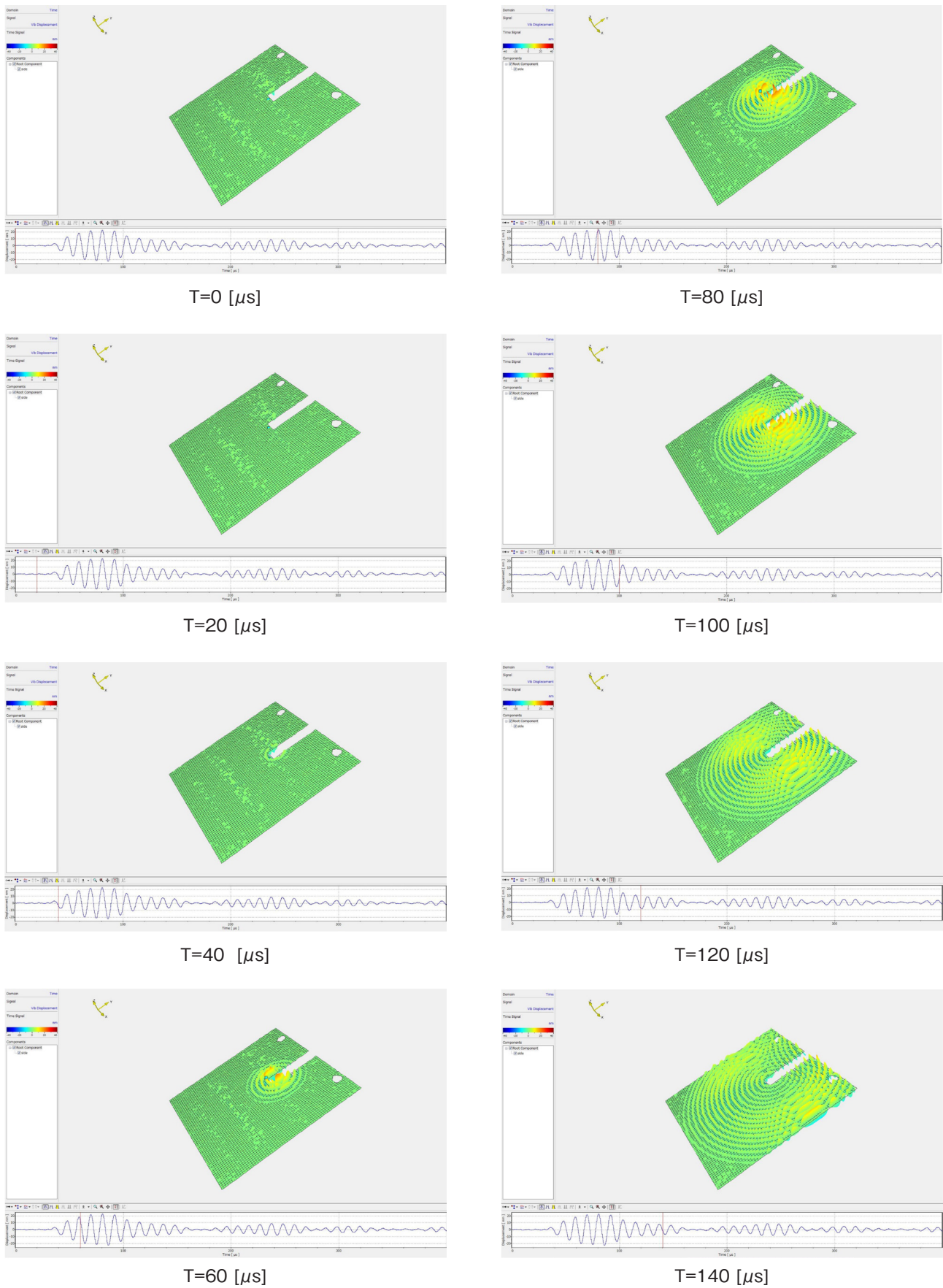
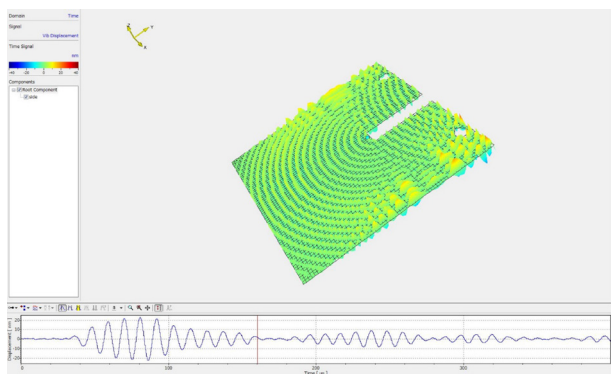
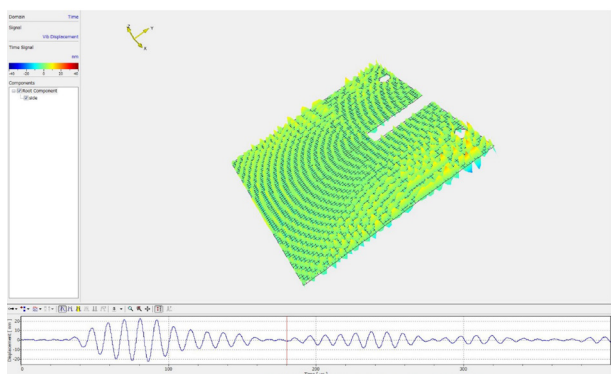


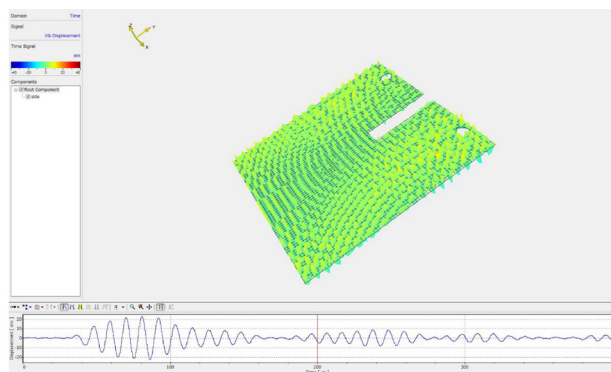
Fig.6.21 弾性波伝播



T=160 [μs]



T=180 [μs]



T=200 [μs]

Fig.6.21 弾性波伝播

7. 特別教育

労働安全衛生法第 59 条、労働安全衛生規則第 36 条第 31 号および第 32 号により、産業用ロボットについて教示等又は検査等の業務に従事する者は、特別教育を受けている必要がある²⁾。ここで産業用ロボットとは「マニプレータ及び記憶装置を有し、記憶装置の情報に基づきマニプレータの伸縮、屈伸、上下移動、左右移動若しくは旋回の動作又はこれらの複合動作を自動的に行うことができる機械」という定義があり、MaVES や MaVES-c を構成するロボットも対象となる。

8. おわりに

多軸振動非接触自動計測システム MaVES の機能拡張を実施し、より高周波数の振動特性をさらに高精度に計測することが可能となった。加えて可搬性を高めることを目的として小型多軸振動非接触自動計測システム MaVES-c のパイロット型の開発を行った。これらの機能拡張や開発にあたり、ポリテックジャパン社および KUKA ロボティクスジャパン社の多大な協力を得た。

なお各種ハードウェアやソフトウェアの仕様については、各種ハードウェアおよびソフトウェアに付属のマニュアル・データシートより抜粋している。

参考文献

- 1) 神田淳；多軸振動非接触自動計測システム (MaVES) の開発，宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-10-010(2010)
- 2) 中央労働災害防止協会，産業用ロボットの安全必携，中央労働災害防止協会

