

# 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)の開発

神田 淳

2010年9月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

## 目次

1.	はじめに	1
2.	システムの概要	3
2.1.	システムの構成	3
2.2.	計測の仕組み	3
3.	システムの詳細	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	12
3.1.4.	光学系	12
3.1.5.	振動速度検出性能	13
3.1.6.	PSV ソフトウェアの機能	13
3.2.	センサー位置制御ロボット	14
3.2.1.	ロボットの構成	14
3.2.2.	ロボットの仕様	15
3.2.3.	ロボットの座標系	16
3.2.4.	ロボットの機能	16
3.3.	統合ソフトウェア	16
3.3.1.	ソフトウェアの役割	16
3.3.2.	統合ソフトウェアの機能	16
3.3.3.	拡張機能	17
3.4.	モーダル解析ソフトウェア	17
3.4.1.	ソフトウェアの構成	17
3.4.2.	モーダル解析ソフトウェアの機能	17
3.5.	その他	17
3.5.1.	安全フェンス	17
3.5.2.	Scanning Head 取り付け治具	18
3.5.3.	ロボット架台	19
3.5.4.	PC とネットワーク	19
4.	計測方法	20
4.1.	計測の流れ	20
4.2.	計測準備	21
4.2.1.	供試体と計測機器の設置	21

4.2.2.	MaVES の起動	21
4.3.	光学系の設定	21
4.3.1.	PSV の Preference 設定	21
4.3.2.	2D アライメントの設定	21
4.3.3.	3D アライメントの設定	23
4.3.4.	Base 座標系のキャリブレーション	23
4.4.	ロボット位置のティーチング	25
4.5.	計測点の設定	26
4.6.	計測点の解析	26
4.7.	計測条件の設定	28
4.8.	自動計測の実行	30
4.9.	OverlayTraces 機能による拡張表示	30
4.10.	計測結果の処理	30
5.	計測例	31
5.1.	供試体	31
5.2.	計測のセッティング	31
5.3.	ロボット位置	31
5.4.	ジオメトリ	32
5.5.	計測条件	33
5.6.	実稼働解析	33
5.7.	モード解析	34
6.	特別教育	35
7.	おわりに	35
	参考文献	35

# 多軸振動非接触自動計測システム (MaVES) の開発\*

神田 淳<sup>\*1</sup>

## Development of Multi-axis Vibration Evaluating System (MaVES)\*

Atsushi KANDA<sup>\*1</sup>

### 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. This paper shows system specification, functions, measurement procedures and an example.

Keywords: robot, laser, vibrometer, modal characteristics, ODS

### 概 要

多軸振動非接触自動計測システム MaVES (Multi-axis Vibration Evaluating System) は、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。システムは3台のレーザードップラー式センサ、6軸ロボットおよびこれらをコントロールするソフトウェアから構成される。本資料では、本システムの仕様、機能、計測方法、計測例について示す。

#### 1. はじめに

宇宙航空研究開発機構では、振動特性を非接触かつ自動で計測し、解析まで行うことが可能なシステムとして、動的変位計測システム DDMS (Dynamic Displacement Measurement System) を整備していた (Fig.1.1)。DDMSは1990年に開発されたシステム<sup>1)</sup>で、6軸ロボットとこれに搭載したレーザーセンサー1台、さらにロボットの動作と同期を取りながら振動計測を行う制御コンピュータおよびソフトウェアから構成されていた。非接触式の

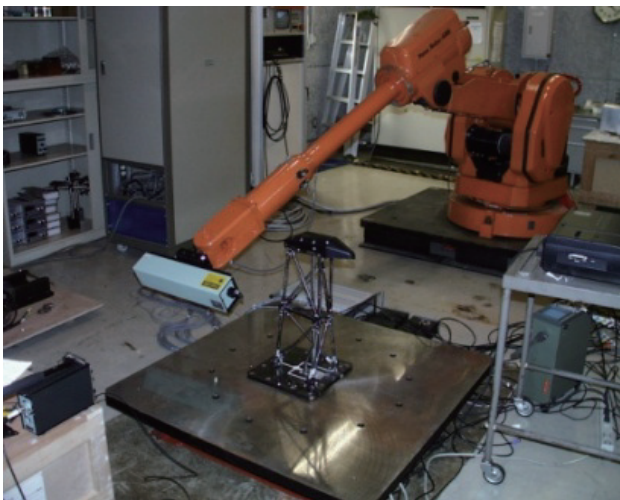


Fig.1.1 動的変位計測システム (DDMS)

レーザーセンサーを用いることで測定対象の供試体の振動特性に影響を与えないこと、各計測点に対するセンサーの位置をロボットに予めティーチング (教示) させておくことで、自動で供試体全体の面外振動を計測できることが大きな特徴であった。このシステムを用いて HOPE-X 全機動特性試験模型、SST ロケット実験機全機模型・翼模型、SST 打ち上げロケットフィン模型、H-IIA 補助エンジントラス模型といった風洞試験用の各種供試体から、FA-200<sup>2)</sup>や ALFLEX<sup>3)</sup>等の実機体に至るまで多数の振動特性の高精度計測を効率的に行ってきた。



Fig.1.2 多軸振動非接触自動計測システム (MaVES)

\* 平成 22 年 7 月 20 日受付 (Received 20 July 2010)

\*1 研究開発本部 機体構造グループ (Airframes and Structures Group, Aerospace Research and Development Directorate)

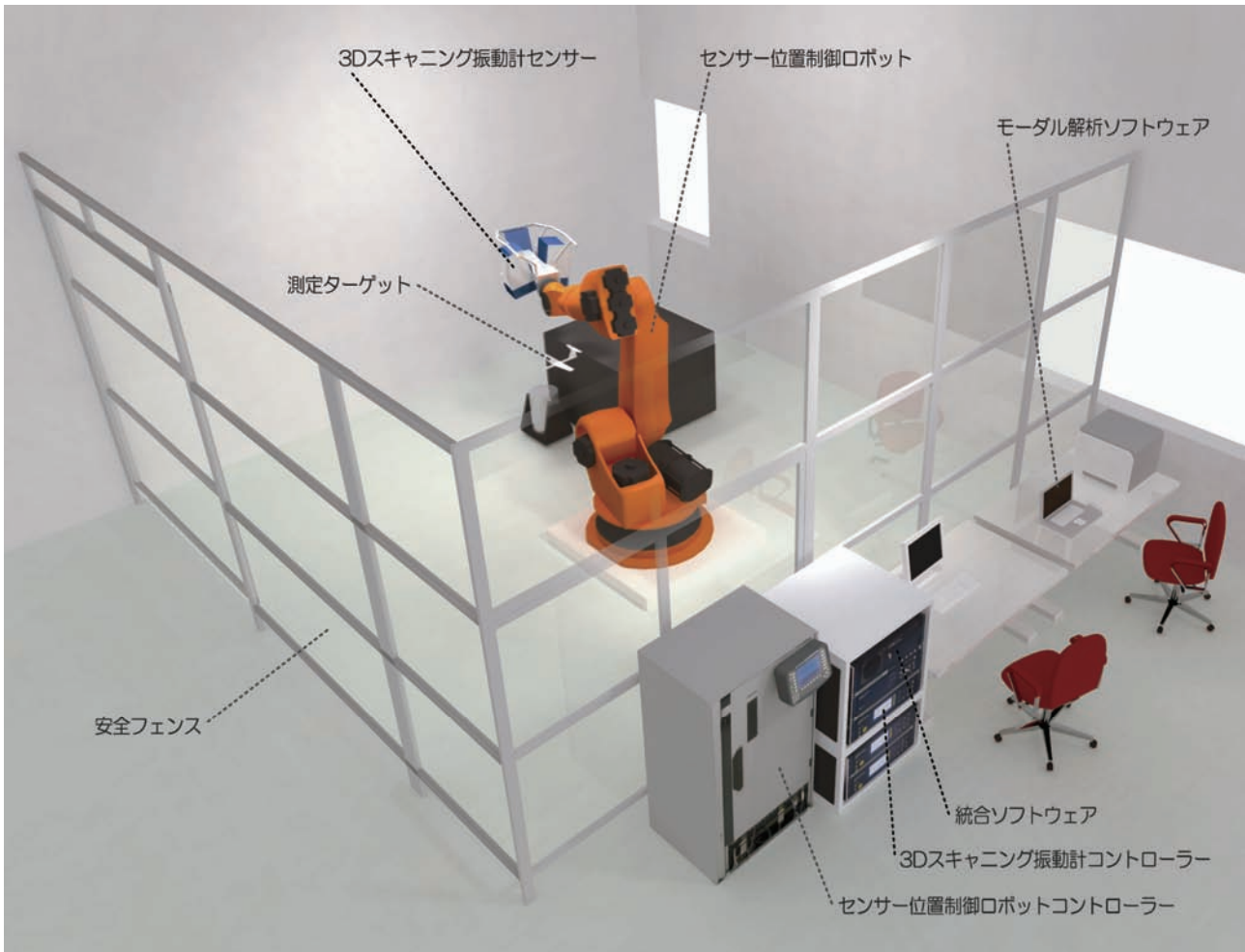


Fig.2 MaVES の構成

この間、1999年にロボット制御用コンピュータの更新<sup>4)</sup>、および2002年にロボット制御機能の改良<sup>5)</sup>を行うなど、老朽化対策や機能向上を行ってきた。しかしロボットおよびレーザーセンサー本体の機能・性能については開発当時のままであり、計測に対する精度要求の増大に応えることが困難になってきたことに加え、老朽化による故障や不具合が相次いだため2008年に事実上運用を停止していた。

後継システムについて、この動的変位計測システムの老朽化による不具合が頻発するようになった2004年から検討を始めた。後継システムでは、従来の非接触・自動計測という特徴を踏襲し、さらに計測性能・機能を向上させることを目標とした。その結果、面内振動の計測、CCDカメラを用いた形状データ作成効率化等の以前のシステムより優れた機能を備えた、多軸振動非接触自動計測システム MaVES (Multi-axis Vibration Evaluating System) が2010年3月に完成した (Fig.1.2)。

本資料では、この新システムの計測の仕組みと概要、仕様、機能、計測方法について述べるとともに、計測例を紹介する。

## 2. システムの概要

### 2.1. 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から構成される (Fig.2) . 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スキャンを行う機能を有している。

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単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。

### 2.2. 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。



### 3. システムの詳細

本章では、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-H) 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。これらの機器のうち、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.3.2)、残りの機器はラックに収納されている (Fig.3.3)。参考として Scanning Head の三面図を Fig.3.4 に示す。

Scanning Head は Controller と各々接続され、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。

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。

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。

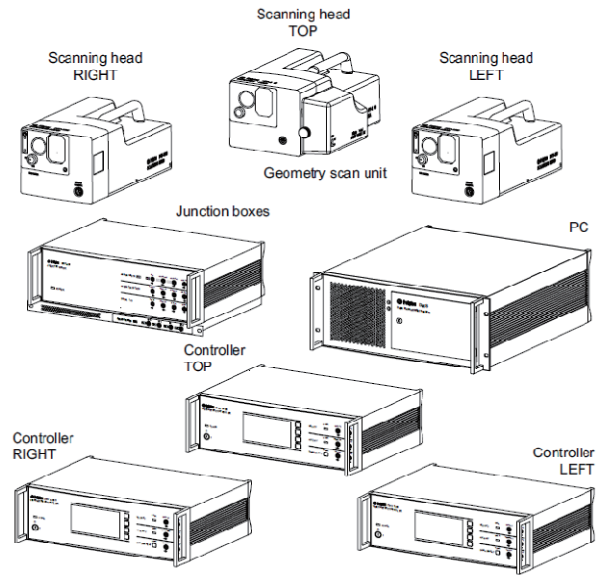


Fig.3.1 3D スキャニング振動計の構成



Fig.3.2 Scanning Head

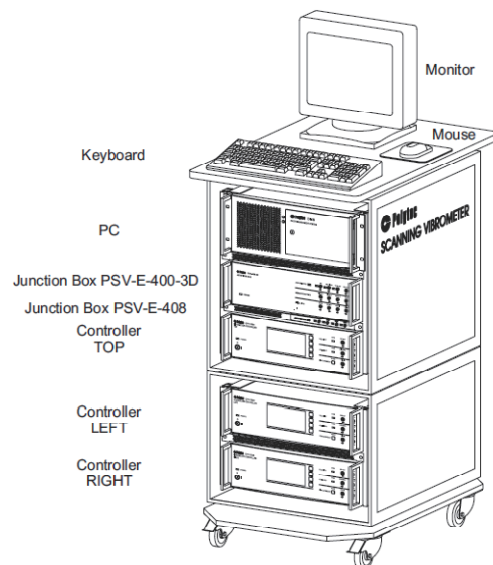


Fig.3.3 3D スキャニング振動計の構成 (ラック)

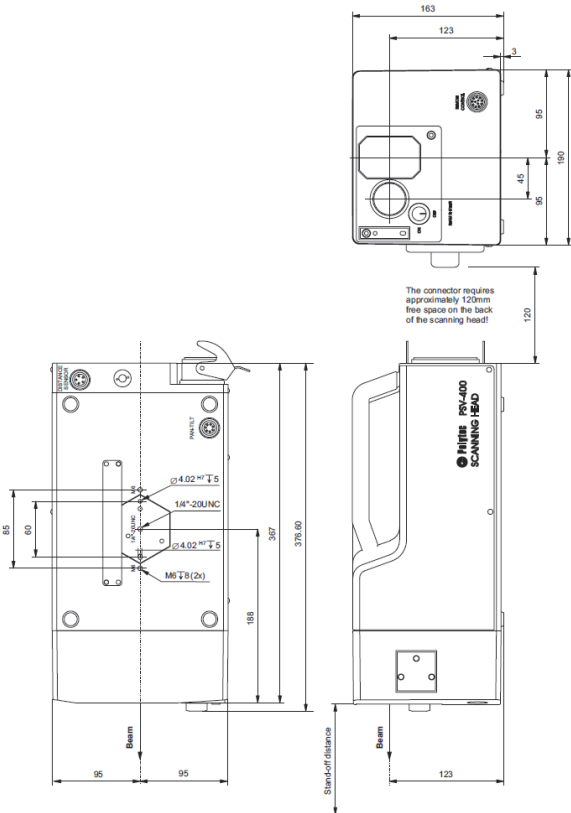


Fig.3.4 Scanning Head の三面図

3.1.2. 振動計の仕様

振動計に適用されている基準を Table 3.1 に示す。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。

Controller の仕様を Table3.2~3.8 に、Junction Box の仕様を Table 3.9~3.13 に、Data Management System の仕様を Table 3.13~3.16 に、Scanning Head の仕様を Table 3.17~3.22 に示す。

Table 3.1 Standard Applied

Laser safety	IEC/EN 60825-1:2003-10 (safety of laser products, complies to US21 CFR 1040.10 and 1040.11 except for deviations pursuant to laser notice no.50, dated 26 July 2001)
Electrical safety	IEC/EN 61010-1:2002-08 (safety requirements for electrical equipment for measurement, control and laboratory use)
EMC	IEC/EN 61326-1:2006-10 (EMC requirements on Emission and Immunity electrical equipment for measurement, control and laboratory use) Emission: Limit Class B IEC/EN 61000-3-2 and 61000-3-3 Immunity: IEC/EN 61000-4-2 to 61000-4-6 and IEC/EN 61000-4-11

Table 3.2 Controller OFV-5000 (General Data)

Mains Connection	Mains voltage	100 – 240VAC±10%, 50/60Hz
	Power consumption	max. 100VA
	Fuses	2.0A/slow-blow
	Safety class	I (protective grounding)
Ambient Conditions	Operating temperature	+5°C – +40°C (41°F – 104°F)
	Storage Temperature	-10°C – +65°C (41°F – 149°F)
	Relative humidity	max. 80%, non-condensing
Housing	Dimension	450mm x 360mm x 150mm (19", 84HP/3U)
	Weight	10kg
Calibration	Calibration recommended	every 2 years



Table 3.3 Controller OFV-5000 (Digital Interfaces)

RS-232	8 data bit, 1 stop bit, no parity; baud rate: 115200Baud; cable to junction box: 2 × 9-pin Sub-D jack, null modem cable (cross-wired)
DIGITAL OUT Optical	TOSLINK output with S/P-DIF standard
DIGITAL OUT Electrical	TRIAx output with S/P-DIF standard
External Decoder	special interface for an external digital displacement decoder (not used)

Table 3.4 Controller OFV-5000 (Analog Signal Outputs)

VELOCITY OUTPUT	Output swing	max. 20V <sub>p-p</sub>
	Output impedance	nom. 50Ω
	Load resistance	min. 10kΩ (-0.5% additional error)
	Overrange indicator threshold	typ. 90% of full scale
SIGNAL	DC offset	max. 20mV
	Voltage range	0V – 3VDC
	Load resistance	≥10kΩ

Table 3.5 Controller OFV-5000 (Decoder Specific Properties - Velocity decoder VD-08)

Measurement range [mm/s/V]	0.2	0.5	1	2	5	10	20	50
Full scale (peak) [m/s]	0.002	0.005	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5
Frequency range f <sub>min</sub> [Hz] f <sub>max</sub> [kHz]	0 5	0 5	0 10	0 10	0 20	0 20	0 25	0 25
Max. acceleration [g]	6.4	16	64	256	640	1280	3200	8000
Frequency response 0.05Hz – 3kHz [dB] 3kHz – 4kHz [dB] 4kHz – 5kHz [dB]	±0.05 +0.1/-0. 3 +0.1/-1	±0.05 +0.1/-0. 3 +0.1/-1	- - - +0.1/-1	- - - - +0.1/-1	- - - ±0.05 +0.1/-0. 3 +0.1/-1	- - - ±0.05 +0.1/-0. 3 +0.1/-1	- - - - - +0.1/-0. 3 +0.1/-1	- - - - - +0.1/-0. 3 +0.1/-1
0.05Hz – 7kHz [dB] 7kHz – 8kHz [dB] 8kHz – 10kHz [dB]	- - - +0.1/-1	- - - +0.1/-1	±0.05 +0.1/-0. 3 +0.1/-1	- - - - +0.1/-1	- - - ±0.05 +0.1/-0. 3 +0.1/-1	- - - ±0.05 +0.1/-0. 3 +0.1/-1	- - - - - +0.1/-0. 3 +0.1/-1	- - - - - +0.1/-0. 3 +0.1/-1
0.05Hz – 10kHz [dB] 10kHz – 14kHz [dB] 14kHz – 20kHz [dB]	- - - +0.1/-1	- - - +0.1/-1	- - - +0.1/-1	±0.05 +0.1/-0. 3 +0.1/-1	±0.05 +0.1/-0. 3 +0.1/-1	±0.05 +0.1/-0. 3 +0.1/-1	- - - +0.1/-0. 3 +0.1/-1	- - - +0.1/-0. 3 +0.1/-1
0.05Hz – 11kHz [dB] 10kHz – 16kHz [dB] 16kHz – 25kHz [dB]	- - - +0.1/-1	- - - +0.1/-1	- - - +0.1/-1	- - - - +0.1/-1	- - - - +0.1/-1	- - - - +0.1/-1	±0.1 +0.1/-0. 3 +0.1/-1	±0.1 +0.1/-0. 3 +0.1/-1
Resolution frequency-dependent [μm/s/√Hz] typically [μm/s/√Hz]	< 0.01 < 0.005	< 0.01 < 0.005	< 0.02 < 0.01	< 0.02 < 0.01	< 0.02 < 0.01	0.01 – 0.04 < 0.02	0.2 – 0.08 < 0.03	0.04 – 0.2 < 0.05
Frequency-dependent phase shift p <sub>D</sub> (typ.) [°/kHz]	-107	-107	-105	-49.3	-33.8	-33.8	-8.7	-8.7
Signal delay t <sub>D</sub> (typ.) [μs]	297	297	290	137	94	94	24.3	24.3
Calibration error [%] T <sub>U</sub> = +5°C – +40°C (T <sub>U</sub> = 41°F – 104°F)	±1	±1	±1	±1	±1	±1	±1	±1
Linearity error [%]	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Harmonic distortions [dBc]	< -50	< -50	< -54	< -54	< -54	< -54	< -54	< -54
Spurious signals (non-harmonic) [dBFS]	< -60	< -68	< -74	< -80	< -83	< -86	< -90	< -90

Table 3.6 Controller OFV-5000 (Decoder Specific Properties – Velocity decoder VD-09) (Part 1 of 2)

Measurement range [mm/s/V]	5	10	20(LP)	20	50(LP)	50	100(LP)	100
Full scale (peak) [m/s]	0.05	0.1	0.2	0.2	0.5	0.5	1	1
Frequency range								
$f_{min}$ [Hz]	0	0	0	0	0	0	0	0
$f_{max}$ [kHz]	100	250	250	1000	250	1500	250	1500
Max. acceleration [g]	3200	16000	32000	128000	80000	480000	160000	960000
Frequency response								
0.05Hz – 50kHz [dB]	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	-	-	-	-
50kHz – 100kHz [dB]	+0.1/-1	+0.1/-0.	±0.1	±0.1	-	-	-	-
100kHz – 250kHz [dB]	-	2	+0.1/-1	±0.1	-	-	-	-
250kHz – 1MHz [dB]	-	+0.1/-1	-	+0.2/-0. 5	-	-	-	-
0.05Hz – 100kHz [dB]	-	-	-	-	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1
100kHz – 250kHz [dB]	-	-	-	-	+0.1/-1	±0.1	+0.1/-1	±0.1
250kHz – 1MHz [dB]	-	-	-	-	-	±0.2	-	±0.2
1MHz – 1.5MHz [dB]	-	-	-	-	-	+0.2/-0. 5	-	+0.2/-0. 5
Resolution								
frequency-dependent [ $\mu\text{m/s}/\sqrt{\text{Hz}}$ ]	0.01 – 0.04	0.01 – 0.07	0.2 – 0.08	0.02 – 0.25	0.04 – 0.2	0.04 – 0.35	0.07 – 0.4	0.06 – 0.4
typically [ $\mu\text{m/s}/\sqrt{\text{Hz}}$ ]	0.02	0.04	0.05	0.12	0.06	0.18	0.1	0.2
Frequency-dependent phase shift $p_D$ (typ.) [°/kHz]	-7.45	-5.54	-5.8	-3.2	-5.4	-2.94	-4.54	-2.94
Signal delay $t_D$ (typ.) [ $\mu\text{s}$ ]	20.7	15.4	16.1	8.9	15.0	8.16	12.6	8.16
Calibration error [%]								
$T_U = (25\pm 3)^\circ\text{C}$ ( $T_U = (77\pm 5)^\circ\text{F}$ )	±1	±1	±1	±1	±1	±1	±1	±1
$T_U = +5^\circ\text{C} - +40^\circ\text{C}$ ( $T_U = 41^\circ\text{F} - 104^\circ\text{F}$ )	±1	±1	±1	±1.5	±1	±1.5	±1	±1.5
Linearity error [%]	0.5		0.5		0.5		0.5	
Harmonic distortions [dBc]								
0.05Hz – 100kHz	< -44	< -52	< -52	< -54	< -52	< -54	< -54	< -54
100Hz – 250kHz	-	< -46	< -46	< -46	< -46	< -46	< -54	< -54
>250kHz	-	-	-	< -38	-	< -36	-	< -38
Spurious signals (non-harmonic) [dBFS]	< -83	< -86	< -90	< -90	< -90	< -90	< -90	< -90

Table 3.7 Controller OFV-5000 (Decoder Specific Properties – Velocity decoder VD-09) (Part 2 of 2)

Measurement range [mm/s/V]	200(LP)	200	500(LP)	500	1000(LP)	1000
Full scale (peak) [m/s]	2	2	5	5	10	10
Frequency range						
$f_{min}$ [Hz]	0	0	0	0	0	0
$f_{max}$ [kHz]	250	2500	250	2500	250	1500
Max. acceleration [g]	320000	3200000	800000	8000000	1600000	9600000
Frequency response						
0.05Hz – 100kHz [dB]	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1
100kHz – 250kHz [dB]	+0.1/–1	±0.1	+0.1/–1	±0.1	+0.1/–1	±0.1
250kHz – 1MHz [dB]	-	±0.2	-	±0.2	-	±0.2
1MHz – 1.5MHz [dB]	-	±0.2	-	±0.2	-	+0.2/–0.5
1.5MHz – 2.5MHz [dB]	-	+0.5/–1.5	-	+0.5/–1.5	-	-
Resolution						
frequency-dependent [ $\mu\text{m/s}/\sqrt{\text{Hz}}$ ]	0.13 – 0.8	0.1 – 1	0.25 – 2	0.25 – 2	0.5 – 4	0.5 – 4
typically [ $\mu\text{m/s}/\sqrt{\text{Hz}}$ ]	0.15	0.5	0.25	0.6	0.5	0.7
Frequency-dependent phase shift $p_D$ (typ.) [°/kHz]	–4.75	–1.35	–2.10	–1.34	–2.57	–2.14
Signal delay $t_D$ (typ.) [ $\mu\text{s}$ ]	13.2	3.76	5.83	3.73	7.13	5.95
Calibration error [%]						
$T_U = (25\pm 3)^\circ\text{C}$ ( $T_U = (77\pm 5)^\circ\text{F}$ )	±1	±1	±1	±1	±1	±1
$T_U = +5^\circ\text{C} - +40^\circ\text{C}$ ( $T_U = 41^\circ\text{F} - 104^\circ\text{F}$ )	±1	±1.5	±1	±1.5	±1	±1.5
Linearity error [%]	0.5		0.5		0.5	
Harmonic distortions [dBc]						
0.05Hz – 100kHz	< –54	< –54	< –54	< –54	< –54	< –54
100Hz – 250kHz	< –54	< –54	< –54	< –54	< –54	< –50
>250kHz	-	< –38	-	< –36	-	< –38
Spurious signals (non-harmonic) [dBFS]	< –90	< –90	< –90	< –90	< –90	< –90

Table 3.8 Controller OFV-5000 (Analog Low Pass and High Pass Filter)

	Low Pass Filter	High Pass Filter
Filter type	Bessel 3rd order	Butterworth 4th order
Cutoff frequencies	5kHz, 20kHz, 100kHz (adjustable)	100Hz
Frequency roll-off	–60dB/dec = –18dB/oct	–80dB/dec = –24dB/oct
Stop band attenuation	> 70dB	> 70dB

Table 3.9 Junction Box PSV-E-401-3D (General Data)

Mains Connection	Mains voltage	100 – 240VAC±10%, 50/60Hz
	Power consumption	max. 100VA
	Fuses	3.15A/slow-blow
	Safety class	I (protective grounding)
Ambient Conditions	Operating temperature	+5°C – +40°C (41°F – 104°F)
	Storage Temperature	–10°C – +65°C (41°F – 149°F)
	Relative humidity	max. 80%, non-condensing
Housing	Dimensions	450mm × 360mm × 150mm (19", 84HP/3U)
	Weight	9kg

Table 3.10 Junction Box PSV-E-401-3D (Digital Interfaces)

RS-232 (TOP, LEFT, RIGHT)	8 data bit, 1 stop bit, no parity; Transfer rate: 115200Baud (for PSV-3D); cable to the junction box: 2 × 9-pin Sub-D jack, null modem cable (cross-wired)
USB	Universal Serial Bus Type B; cable to the PC: 1× USB Type A, 1 × USB Type B

Table 3.11 Junction Box PSV-E-401-3D (Analog Signal Inputs and Outputs)

VELO TOP, VELO LEFT, VELO RIGHT and REF	Input voltage range	±100mV – ±31.6V, adjustable in the software
	Input impedance	1MΩ parallel with 100pF
	Input coupling	AC/DC, adjustable in the software AC –3dB cutoff frequency: 3.4Hz
	Overvoltage protection	±42V (against damage)
	Operating modes	Single-ended (initial state) Differential (adjustable in the software)
IEPE Mode (ICP®) REF	Sensor supply	nom. 4mA/24V, IEPE compatible (ICP®)
	Lower cutoff frequency	0.02Hz (–3dB), with DC coupling of the REF input
	Time constant	10s
TRIG IN	Compatibility	TTL
	Input voltage	max. +5.5V
GATE IN	Compatibility	TTL
	Input voltage	max. +7.0V
AUX IN	Compatibility	TTL
	Input voltage	max. +7.0V
SIGNAL1 (SIGNAL2, SIGNAL3 and SIGNAL4, only PSV-400-3D-H)	Output voltage swing	max. ±10V
	Output current	max. ±5mA
	Output impedance	50Ω ±10%
	Short-circuit protection	Permanently short-circuit proof
SYNC	Compatibility	TTL
	Output voltage HIGH	min. 4.35V(I <sub>out</sub> =3.5mA)
	Output voltage LOW	max. 0.4V(I <sub>out</sub> =5mA)
AUX OUT	Compatibility	TTL
	Output voltage HIGH	min. 2.4V(I <sub>out</sub> =15mA)
	Output voltage LOW	max. 0.5V(I <sub>out</sub> =64mA)
S-VIDEO OUT	Video signal (Y/C)	1V <sub>p-p</sub> /75Ω

Table 3.12 Junction Box PSV-E-408 (General Data)

Ambient Conditions	Operating temperature	+5°C – +40°C (41°F – 104°F)
	Storage Temperature	–10°C – +65°C (41°F – 149°F)
	Relative humidity	max. 80%, non-condensing
Housing	Dimensions	482mm × 303mm × 23mm
	Weight	1.5kg

Table 3.13 Junction Box PSV-E-408 (Analog Signal Inputs)

REF21, REF22, REF23 and REF24	Input voltage range	$\pm 100\text{mV} - \pm 31.6\text{V}$ , adjustable in the software
	Input impedance	1M $\Omega$ parallel with 100pF
	Input coupling	AC/DC, adjustable in the software AC -3dB cutoff frequency: 3.4Hz
	Overvoltage protection	$\pm 42\text{V}$ (against damage)
	Operating modes	Single-ended (initial state) Differential (adjustable in the software)
IEPE Mode (ICP®) REF21, REF22, REF23 and REF24	Sensor supply	nom. 4mA/24V, IEPE compatible (ICP®)
	Lower cutoff frequency	0.02Hz (-3dB), with DC coupling of the allocate REF input
	Time constant	10s

Table 3.14 PC PSV-W-401-3D (General Data)

Mains Connection	Mains voltage	100 – 240VAC $\pm 10\%$ , 50/60Hz
	Power consumption	max. 350VA
	Safety class	I (protective grounding)
Ambient Conditions	Operating temperature	+5°C – +40°C (41°F – 104°F)
	Storage Temperature	-10°C – +65°C (41°F – 149°F)
	Relative humidity	max. 80%, non-condensing
Housing	Dimensions	450mm x 550mm x 190mm (19", 84HP/4U)
	Weight	18kg

Table 3.15 PC PSV-W-401-3D (PC Configuration)

Processor	min. AMD Athlon™ XP3000+; 2.6GHz; 1GByte RAM
Hard disk drive (HDD)	> 120GB
Operating system	Microsoft® Windows® XP or 2000
Network connector	Ethernet
DVD recorder	Refer to manual of the manufacturer

Table 3.16 PC PSV-W-401-3D (Data Acquisition)

Data acquisition board	2 × PCI-4462
Input channel	8
Resolution	24bit
Maximum bandwidth	80kHz
Internal function generator	PCI-6711
Output channel /simultaneous)	4
Resolution	12bit
Maximum bandwidth	80kHz

Table 3.17 Scanning Head PSV-I-400 (General Data)

Laser	Laser type	Helium neon
	Wavelength	633nm
	Cavity length	204mm ±1mm
	Laser class	2
	Laser power	< 1mW
Electrical Data	Power consumption	approx. 25W (average value)
	Carrier frequency	40MHz
Ambient Conditions	Operating temperature	+5°C – +40°C (41°F – 104°F)
	Storage Temperature	-10°C – +65°C (41°F – 149°F)
	Operating altitude	max. 3048m (10000ft)
	Relative humidity	max. 80%, non-condensing
Housing	Dimensions	Refer to FIGURE 7.1
	Weight	7kg

Table 3.18 Scanning Head PSV-I-400 (Optics)

Front lens model	Long Range (LR)	Mid Range (MR)
Focal length [mm]	100	60
Minimum stand-off distance [mm]	350	40
Aperture diameter (1/e <sup>2</sup> ) [mm]	10 – 11	2 – 6.6
Spot diameter (typ.) [μm]		
@ 100mm	-	31
@ 200mm	-	41
@ 500mm	33	73
@ 1000mm	43	132
@ 2000mm	147	255
@ 3000mm	222	376
@ 5000mm	368	624
@ each additional meter plus	74	126
Visibility maxima	99mm + (n · l); n=0, 1, 2 – ; l=204mm±1mm	

Table 3.19 Scanning Head PSV-I-400 (Visibility Maxima)

Visibility Maxima (in mm) for l=204mm					
99	1731	3363	4995	6627	8259
303	1935	3567	5199	6831	8463
507	2139	3771	5403	7035	8667
711	2343	3975	5607	7239	8871
915	2547	4179	5811	7443	9075
1119	2751	4383	6015	7647	9279
1323	2955	4587	6219	7851	9483
1527	3159	4791	6423	8055	–

Table 3.20 Scanning Head PSV-I-400 (Scanner)

Type	Servo-controlled galvo motor
Maximum deflection	Horizontal: ±20° Vertical: ±20°
Angular resolution	< 0.002°
Point stability	< 0.01°/hour (after warm-up)



Table 3.21 Scanning Head PSV-I-400 (Video Camera)

Video system	CCIR/PAL
Sensor	Color CCD 1/4", 752 × 582 pixel
Signal-to-noise ratio	> 50dB
Zoom	72 × (4× digital zoom)
Lens	F 1.4/f =4.1 – 73mm, auto focus, auto iris, 18-fold
Angle of view (horizontal)	@ wide end: approx. 48° @ max. tele end: approx. 2.7°
Minimum stand-off distance	@ wide end: 10mm @ max. tele end: 800mm
Minimum illumination	3 Lux (F 1.4)

Table 3.22 Scanning Head PSV-I-400 (Geometry Scan Unit PSV-A-420 : General Data)

Laser	Laser type	Laser diode
	Wavelength	620 – 690nm
	Laser class	2
	Laser power	< 1mW
	Accuracy of the measurement distance	±2.5mm
	Max. distance between the focal points of the two laser beams.	< 5mm (2 $\sigma$ ) It will not be necessarily measured in the focal points of the laser beam.
Ambient Conditions	Operating temperature	+5°C – +40°C (41°F – 104°F)
	Storage Temperature	-10°C – +65°C (41°F – 149°F)
	Relative humidity	max. 80%, non-condensing
Housing	Dimensions	Refer also to FIGURE 7.3
	Weight	0.6Kg

### 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 BS2 および  $\lambda/4$  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 が異なり, LR では 350mm, MR では 40mm となっている).

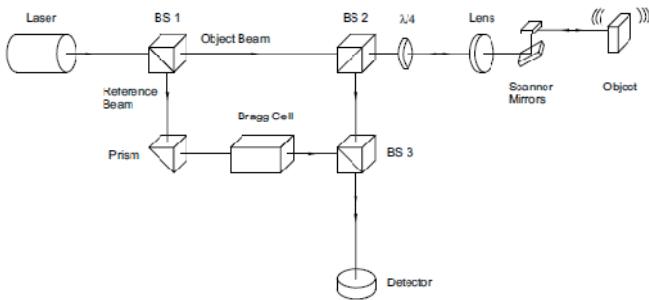


Fig.3.5 光学系のコンフィギュレーション

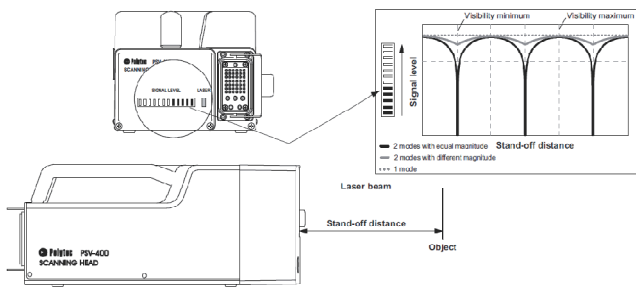


Fig.3.6 距離と信号レベル

### 3.1.5. 振動速度検出性能

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 と VD-09) を搭載しており, 計測用途に応じて切り替えが可能である. 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, 0~25kHz 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 は幅広いサンプリング周波数に対応しており, 最大 10m/s の振動速度, 0~2.5MHz のサンプリング周波数で計測が可能である. ただし PC 内蔵の Data Acquisition Board (National Instruments 製 PCI-4462) の制約上, 80kHz までの振動 (最高サンプリング周波数 204.8kHz) を計測可能となっている. Fig.3.7 に Controller 内の信号ダイアグラムを示す.

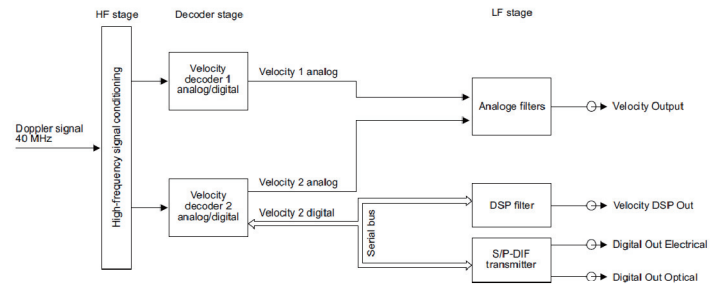


Fig.3.7 Controller 内の信号ダイアグラム

### 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: マウスを使用してライブビデオ画像の計測点を定義したり, レーザービームを移動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 に表示されたビデオ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
- 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 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
- ・ **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) 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シ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づつずらして (測定距離が 1 m の場合で約 50 $\mu$ 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weep, 周期チャープ, 疑似ランダム, バーストチャープ, バーストランダム, 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.3.8 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.3.9) 。



Fig.3.8 ロボット制御装置とティーチペンダント KCP

3.2.2. ロボットの仕様

ロボットの仕様を Table 3.23 に示す. ロボット全体の可動範囲を Fig.3.10 に示す. また, ロボットの各軸の回転方向を Fig.3.11 に, 各軸の可動範囲と速度を Table3.24 に示す.



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.3.9 ティーチペンダント KCP

Table 3.23 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

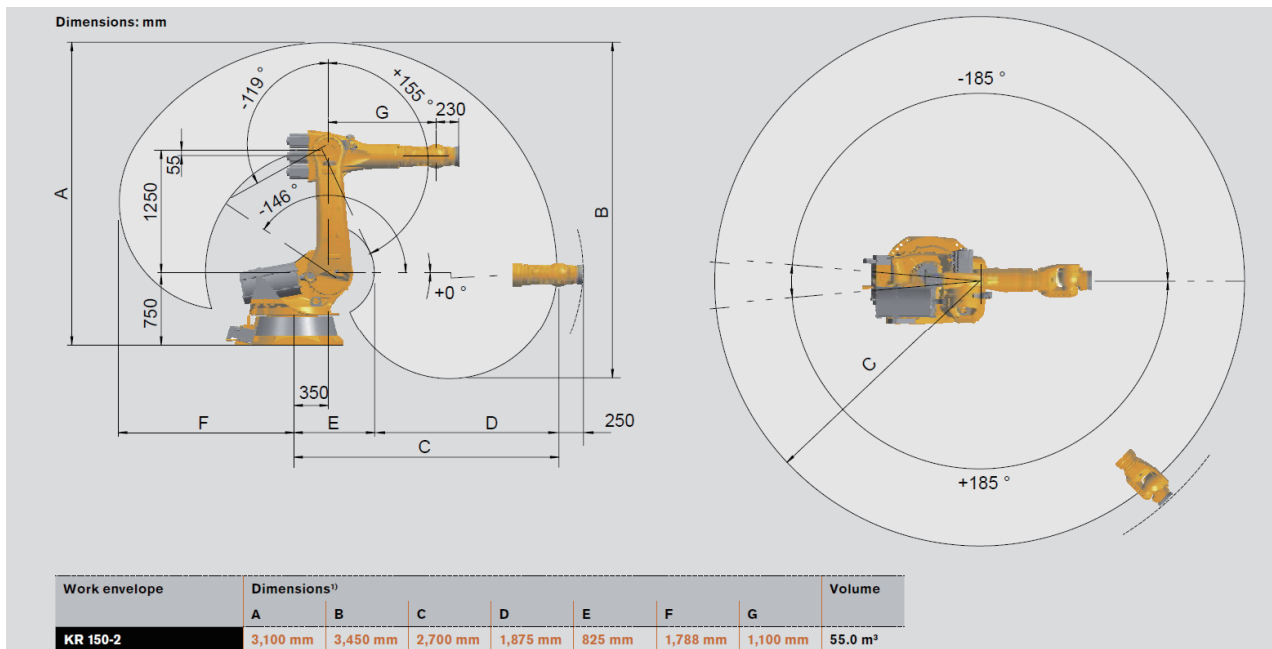


Fig.3.10 ロボットの可動範囲



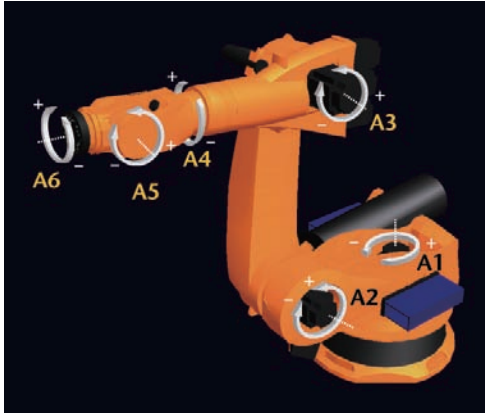


Fig.3.11 ロボットの軸

Table 3.24 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)	±185°	110°/s
Axis 2 (A2)	0°/−146°	110°/s
Axis 3 (A3)	+155°/−119°	100°/s
Axis 4 (A4)	±350°	170°/s
Axis 5 (A5)	±125°	170°/s
Axis 6 (A6)	±350°	238°/s

### 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 Fig3.12 に示す。

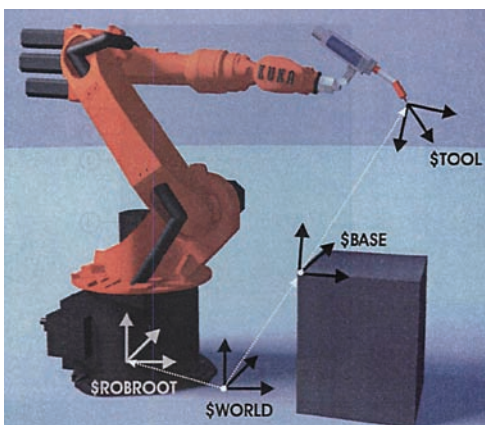


Fig.3.12 ロボットの座標系

### 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

エ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。

### 3.3.3. 拡張機能

統合ソフトウェアによる自動計測中に最大3種類までのデータを1つの表示ウィンドウ内で同時表示するための、OverlayTraces 機能を実装している。外部実行ファイルとして拡張されており、実行すると各計測チャンネルのバッファを読み込み、計測データをウィンドウに表示が可能となる。

## 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

### 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。

## 3.5. その他

### 3.5.1. 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 Fig3.13 に示す。



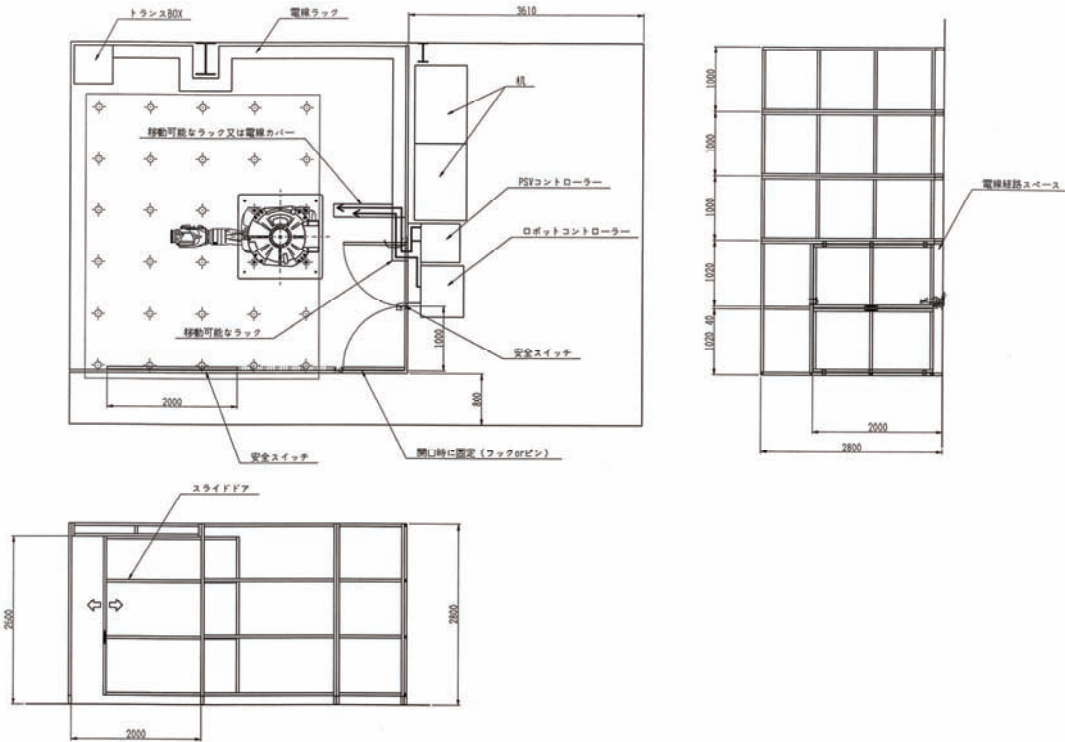


Fig.3.13 安全フェンスの三面図

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.3.14). 取り付け治具について Fig.3.15 および Fig.3.16 に示す.

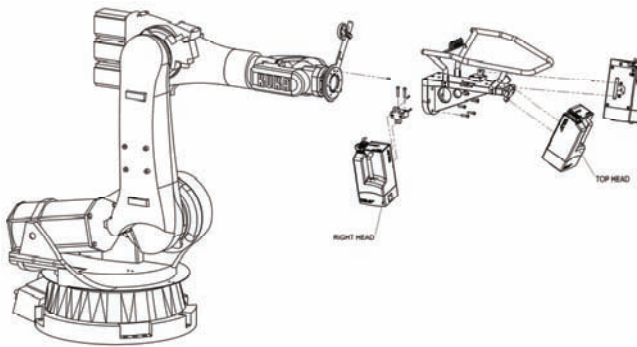


Fig.3.14 ロボットと Scanning Head

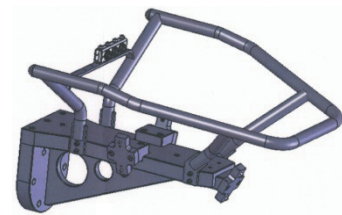


Fig.3.15 Scanning Head 取り付け治具

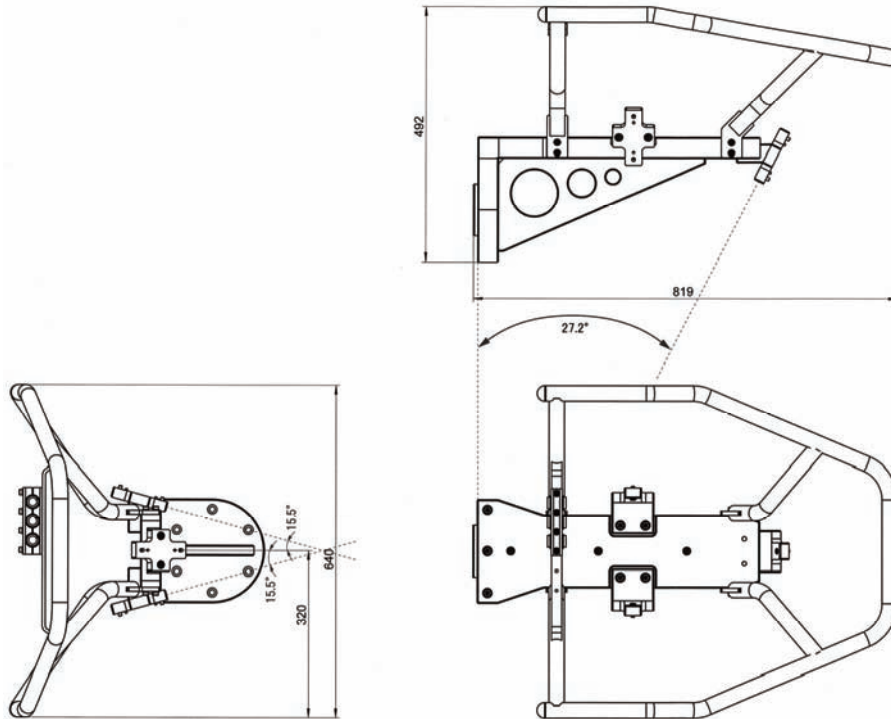


Fig.3.16 取り付け治具の三面図

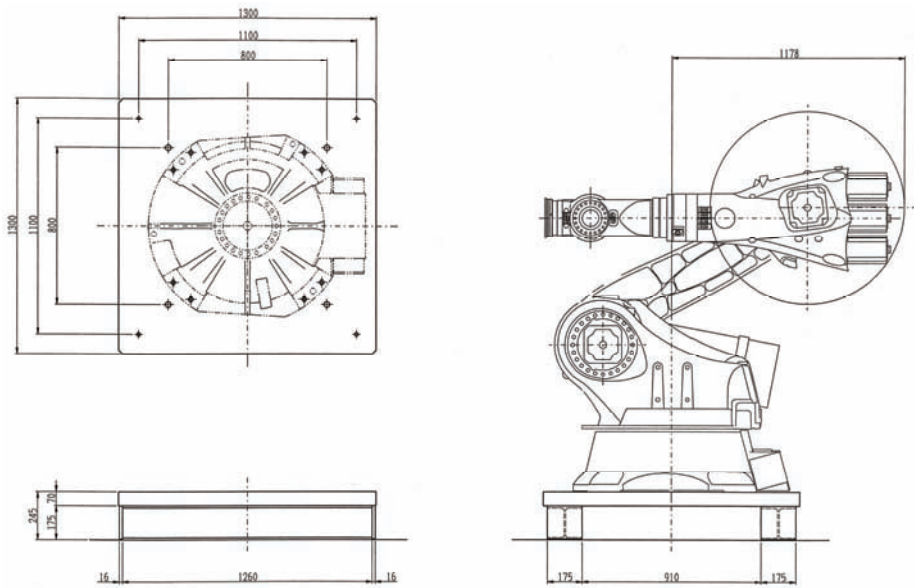


Fig.3.17 ロボット架台の三面図

### 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、パレットトラック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 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。いずれも

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)

4. 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、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。

4.1. 計測の流れ

自動計測の先立ち、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。計測のワークフローをFig.4.1に示す。

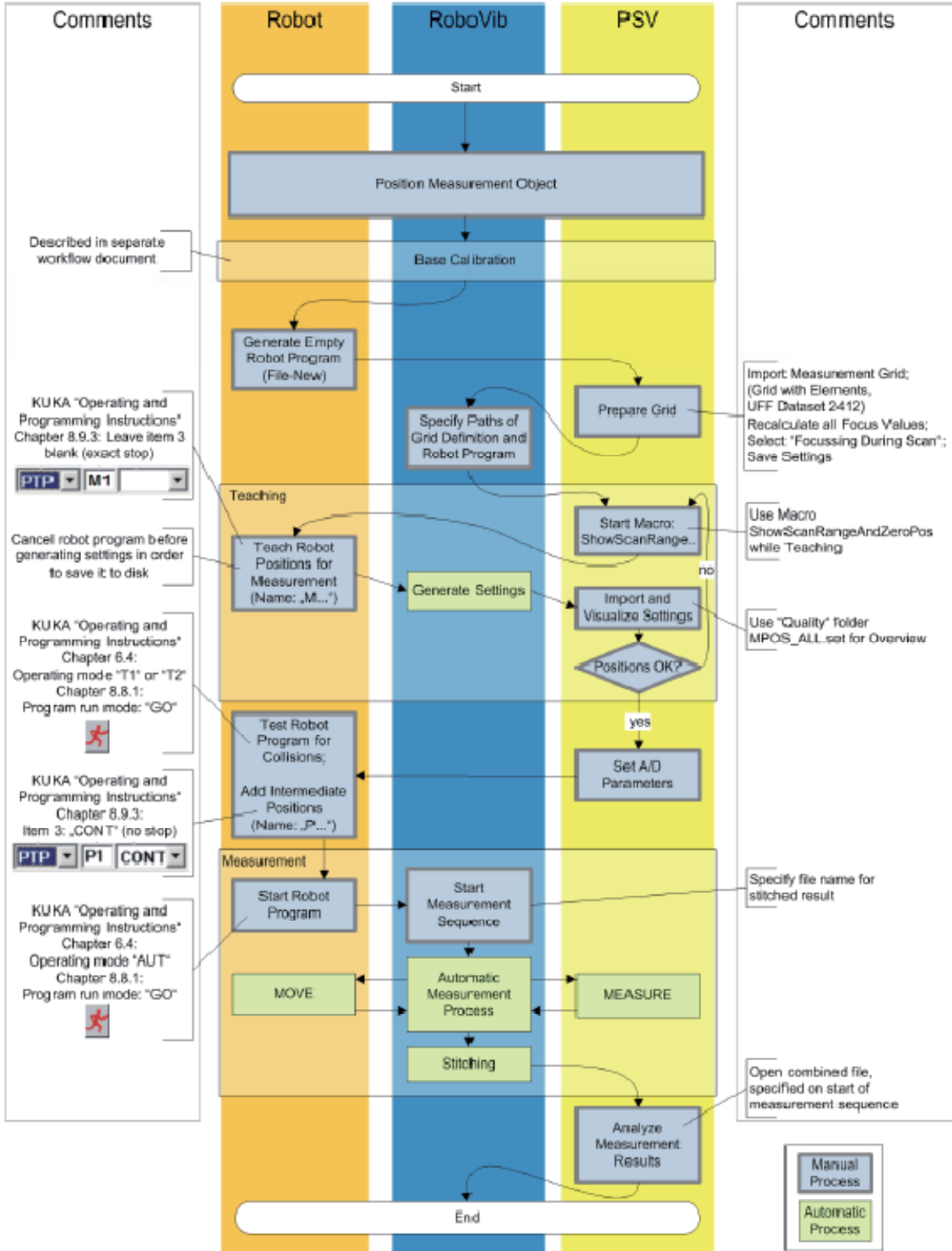


Fig.4.1 計測ワークフロー

## 4.2. 計測準備

### 4.2.1. 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。

### 4.2.2. 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。

## 4.3. 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。

### 4.3.1. PSV の Preference 設定

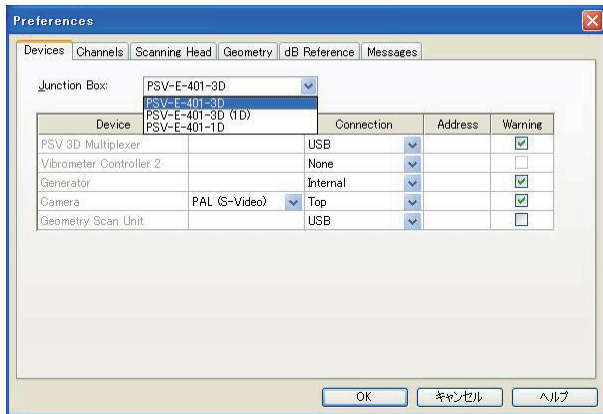
PSV ソフトウェアで Preference の設定を行う（Setup>Preference）。Preference の設定ウィンドウをFig.4.2に示す。このうち Devices タブでは、Scanning Head を何台使用するかを下記のように設定する。

- ・ PSV-E-401-3D：3台（TOP, RIGHT, LEFT）を使用
- ・ 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

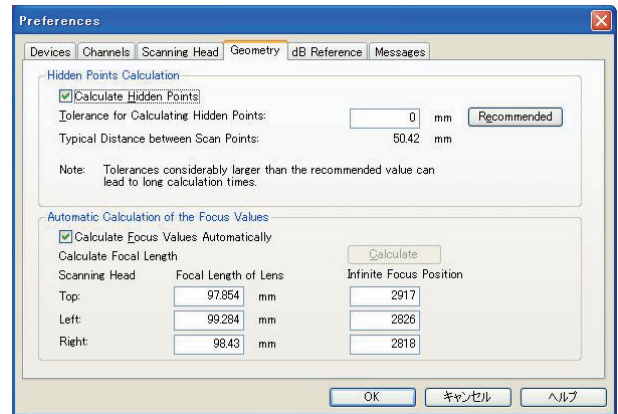
また、Channels タブでは、振動計の制御に使用するチャンネルを設定する。Scanning Head タブでは、Scanning Head に対する詳細な設定を行う。特に Head Angle の設定については、MaVES では3台の Scanning Head の取り付けが固定されて角度が決まっており、Top:0°、Left:270°、Right:90°として設定する。Geometry タブでは、Hidden Points の推奨値の計算や焦点値の自動計算の設定を行う。dB Reference タブでは dB の基準を設定する。Messages タブでは表示するシステムメッセージの設定を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

### 4.3.2. 2D アライメントの設定

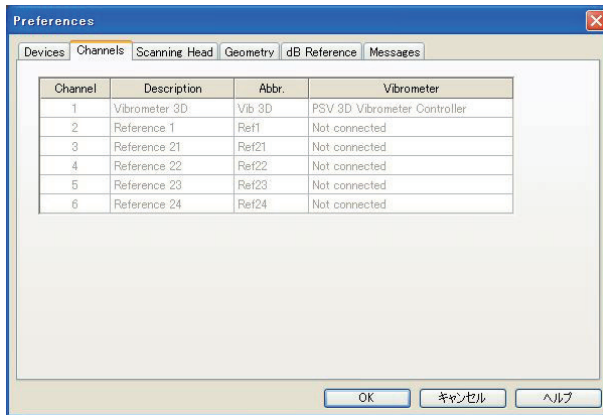
ビデオ画像上のレーザーの位置を、実際の測定面上にあるレーザーの位置と合うようにアライメントを行う（Setup>2D alignment）。供試体を映し出しているビデオ画像（Fig.4.3）で、供試体上の任意の位置にレーザーをマウスの中ボタンで移動させ、レーザーが照射されている点をマウスで指定する。これを TOP, LEFT, RIGHT の各レーザーにつき、それぞれ6点以上指定することで、2Dアライメントを行う。実行後は、ビデオ画像上でマウスクリックした点に3つのレーザーが照射されるようになる。ロボットを使う場合は、RoboVib ソフトウェアで設定済のアライメントデータを使用するため、この項目に示す手動での設定は不要である。



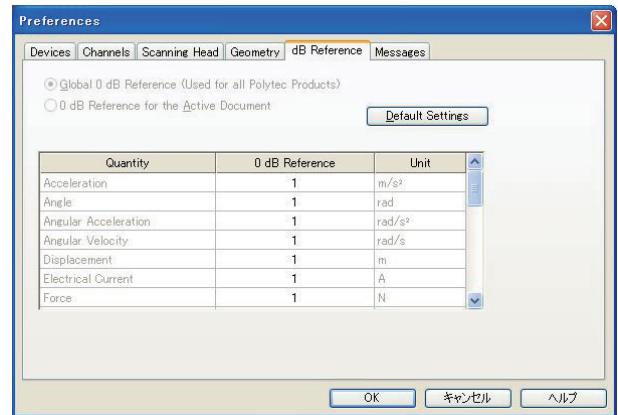
Devices タブ



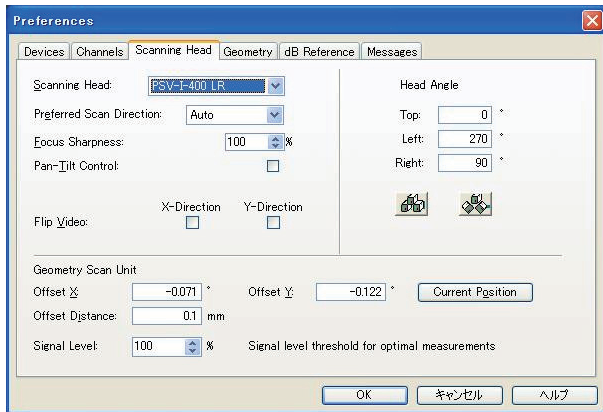
Geometry タブ



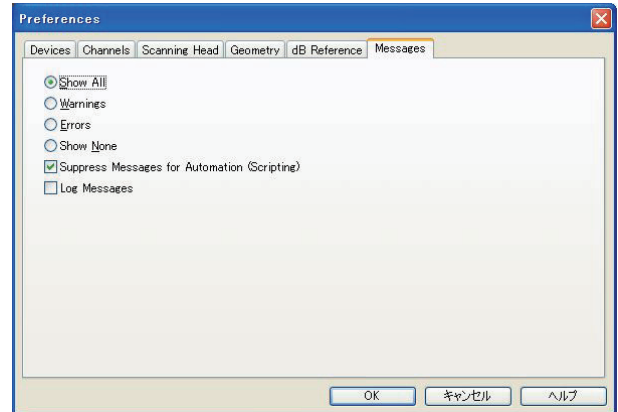
Channels タブ



dB Reference タブ



Scanning Head タブ



Messages タブ

Fig.4.2 PSV の Preference ウィンドウ



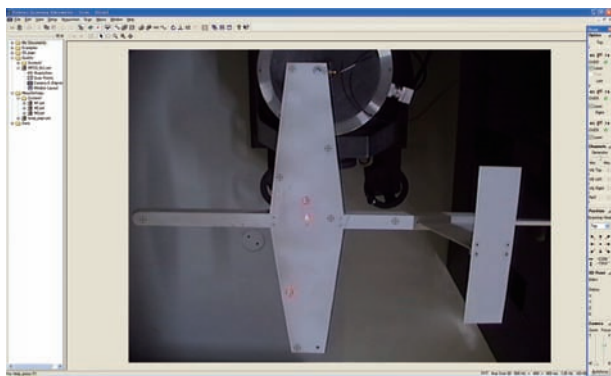


Fig.4.3 2D アライメントの画面

#### 4.3.3. 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 (Fig.4.4). 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.

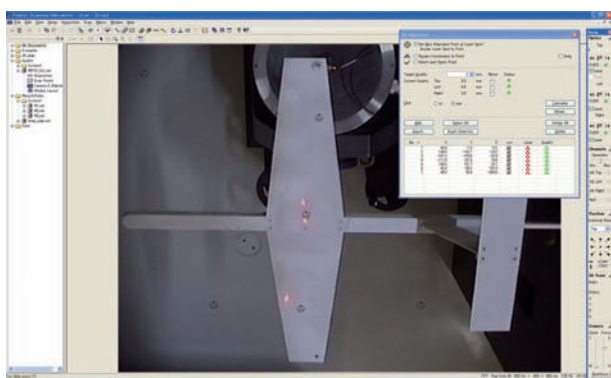


Fig.4.4 3Dアライメントの画面

#### 4.3.4. 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座標系キャリブレーションのワークフローをFig.4.5に示す. 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.4.6). 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.4.7)
  - 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として, 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
- (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 (Fig.4.8).
  - 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.



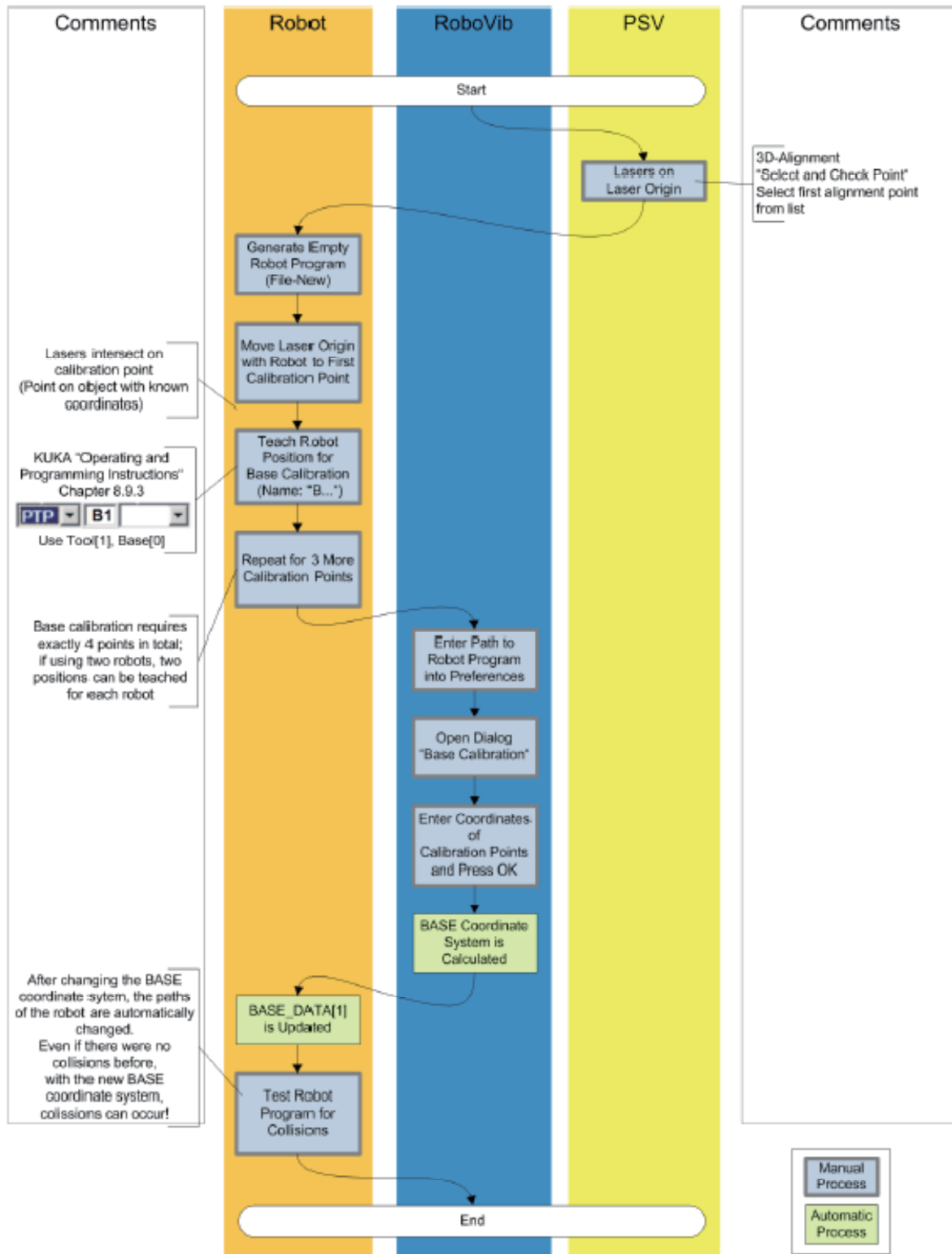


Fig.4.5 Base Calibrationのワークフロー

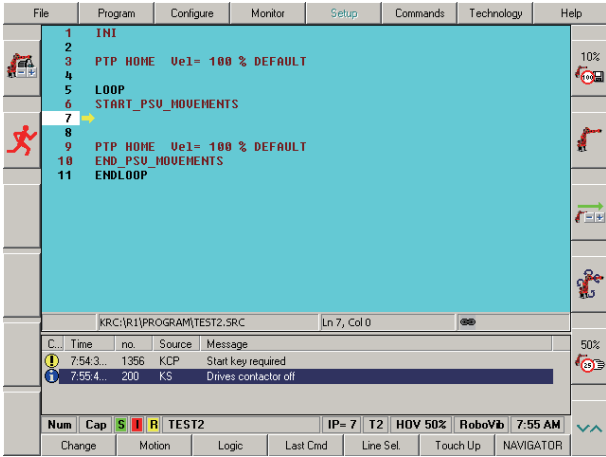


Fig.4.6 ロボットプログラム

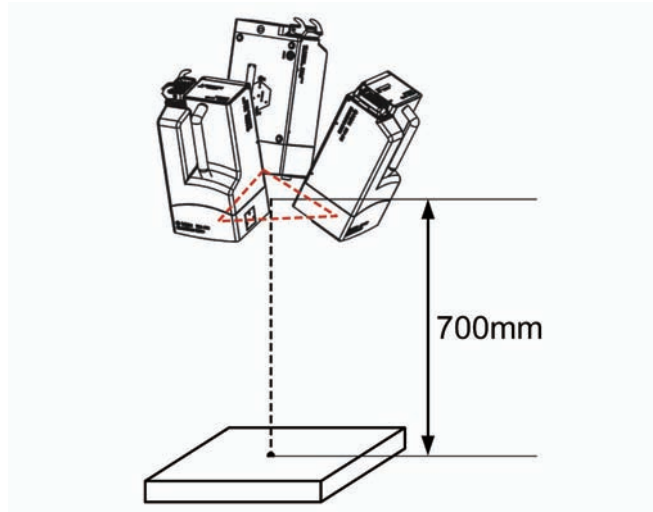


Fig.4.9 センサーと供試体の位置関係



Fig.4.7 PTP インラインフォーム

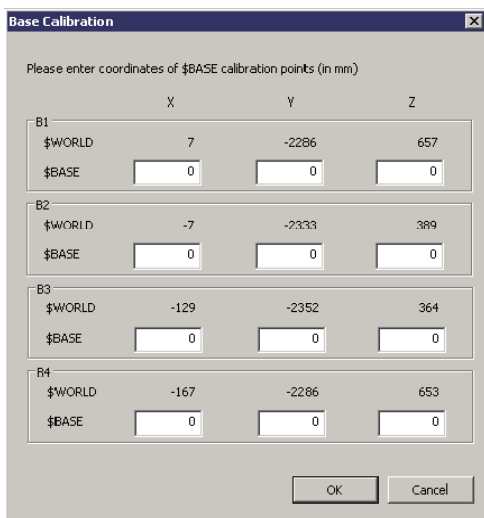


Fig.4.8 Base Calibration ウィンドウ

#### 4.4. 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 比とスキャン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.4.9 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.4.6 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場合がある。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。

#### 4.5. 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 (Fig.4.10) 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

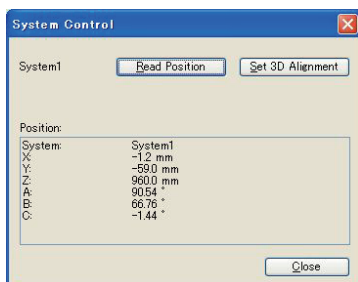


Fig.4.10 System Control ウィンドウ

##### (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。他にもティーチングしたロボット位置が存在すれば、(1)から(3)を繰り返す。

##### (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) 設定ファイルを保存

#### 4.6. 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

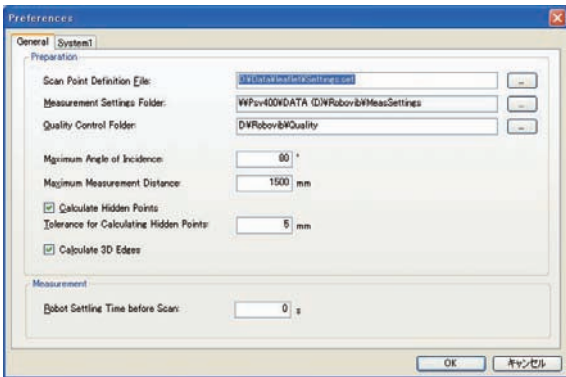
RoboVib ソフトウェア上で、解析条件の設定を行う (Setup>Preference) 。設定は Preference ウィンドウ (Fig.4.11) で行うが、このウィンドウには General タブと System1 タブがある。General タブでは下記の設定を行う。

- 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.4.12) 。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.4.13) 。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.4.14) 。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 (4.3.1 項参照) 。
- 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.4.15 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

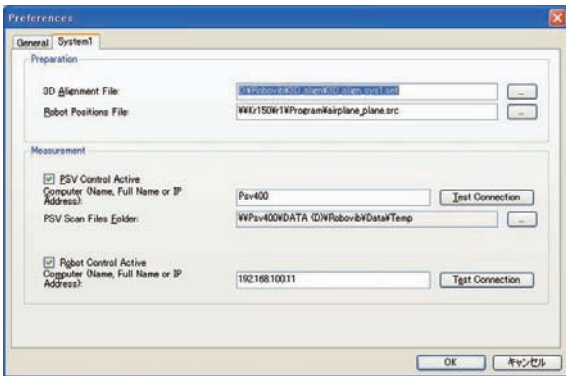
いる。

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



General タブ



System1 タブ

Fig.4.11 RoboVib の Preference ウィンドウ

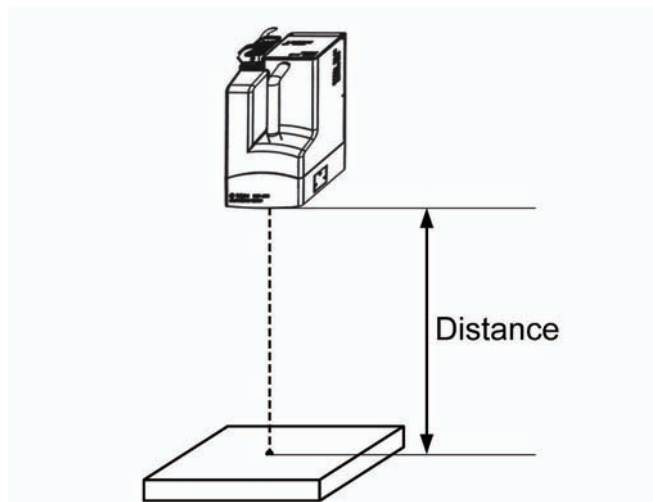


Fig.4.13 Measurement Distance

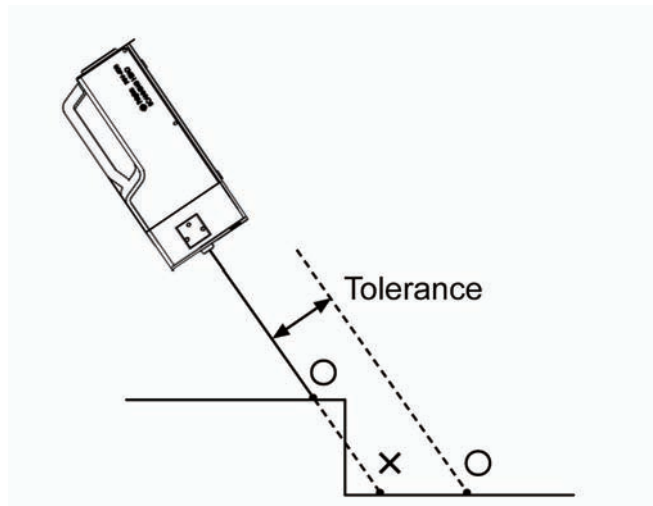


Fig.4.14 Hidden Point

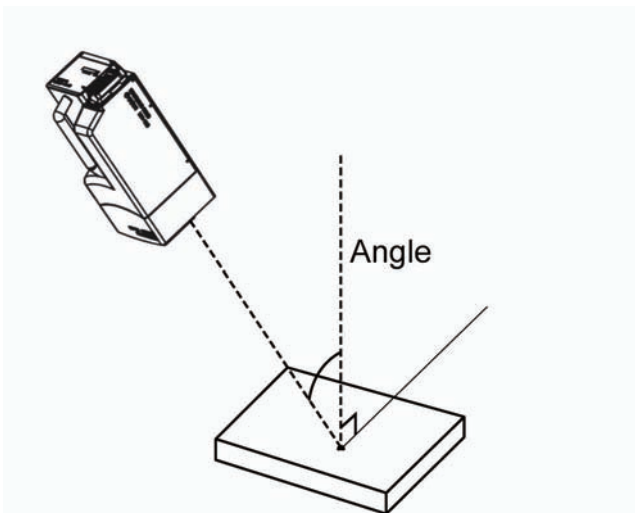


Fig.4.12 Angle of Incidence

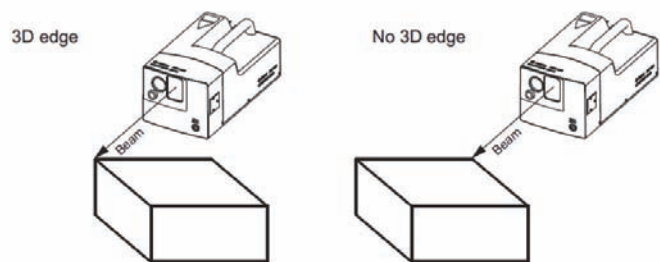


Fig.4.15 3D edge

## (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 4.1) に割り当てられる。解析の結果得られたジオメトリコンポーネントの例を Fig.4.16 に示す。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。

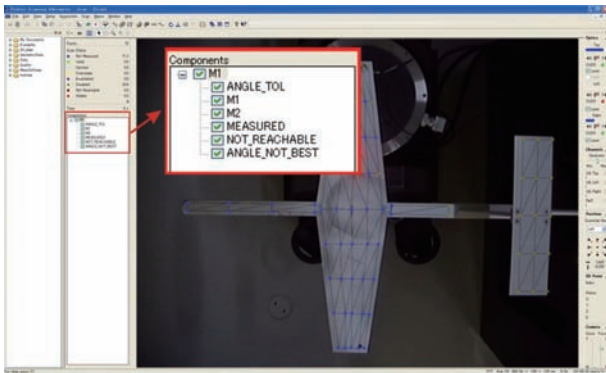


Fig.4.16 ジオメトリコンポーネントの例

Table 4.1 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 (角度がスキヤ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)

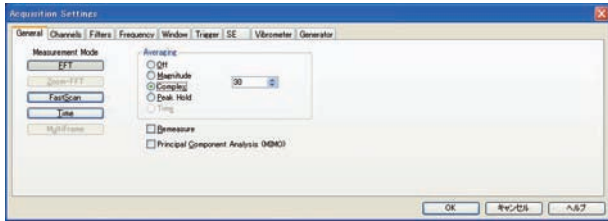
## 4.7. 計測条件の設定

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、

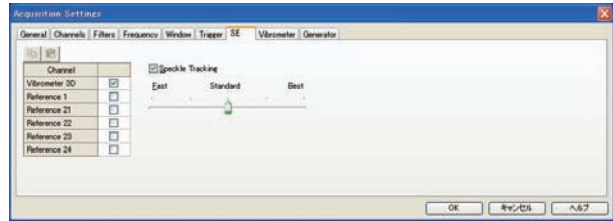
- General (一般設定)
- Channels (測定チャンネルの設定)
- Filter (入力信号のデジタルフィルタの設定)
- Frequency (FFT 測定での周波数設定)
- Window (入力信号の窓関数の設定)
- Trigger (トリガの設定), SE (信号の拡張設定)
- Vibrometer (Decoderの設定)
- Generator (ファンクションジェネレータの設定)
- FastScan (FastScan測定モードの設定)
- Time (Time測定モードの設定)

である (Fig.4.17)。

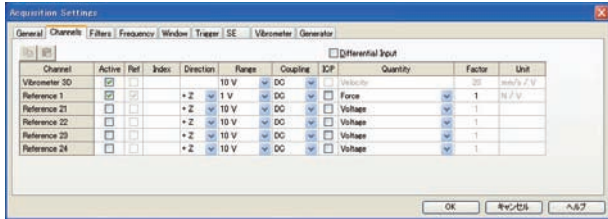




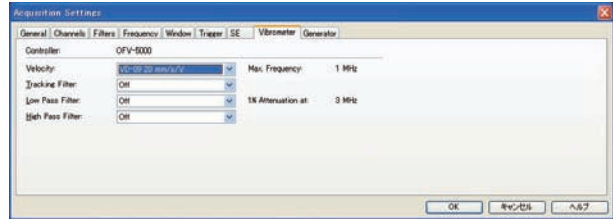
General タブ



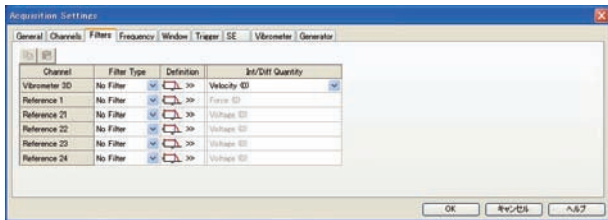
SE タブ



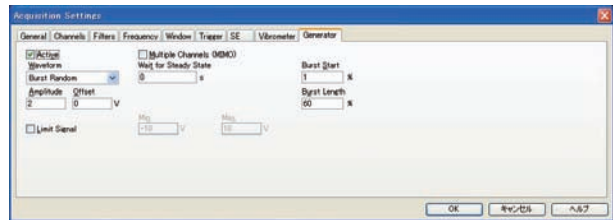
Channels タブ



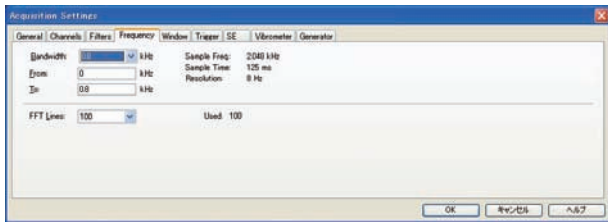
Vibrometer タブ



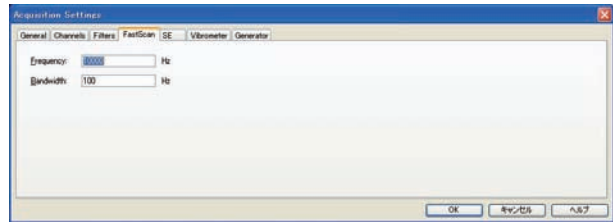
Filters タブ



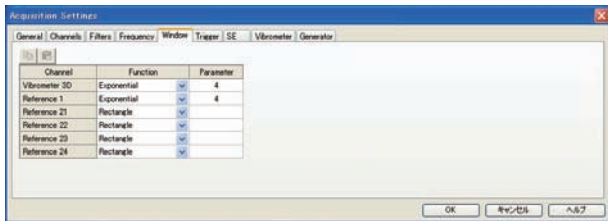
Generator タブ



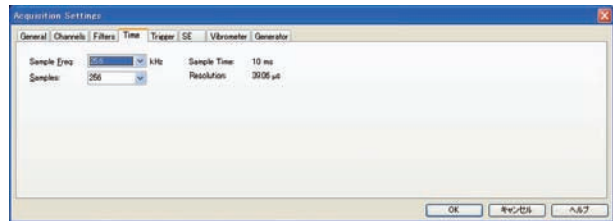
Frequency タブ



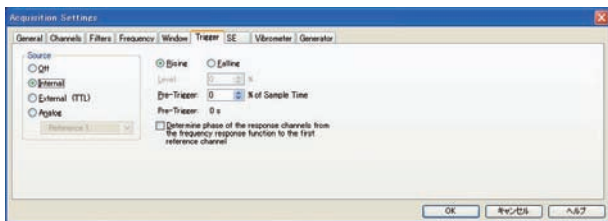
FastScan タブ



Window タブ



Time タブ



Trigger タブ

Fig.4.17 計測条件の設定

#### 4. 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。計測画面をFig.4.18に、進捗状況ウィンドウをFig.4.19に示す。

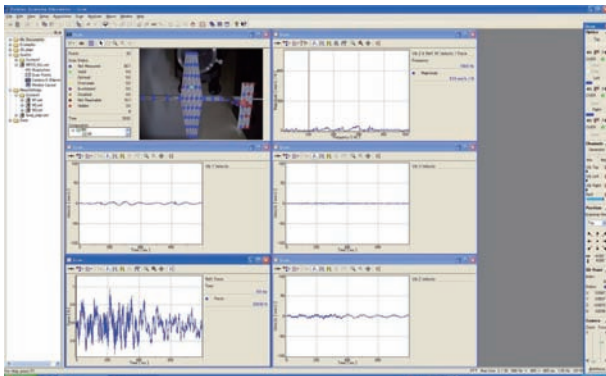


Fig.4.18 計測画面

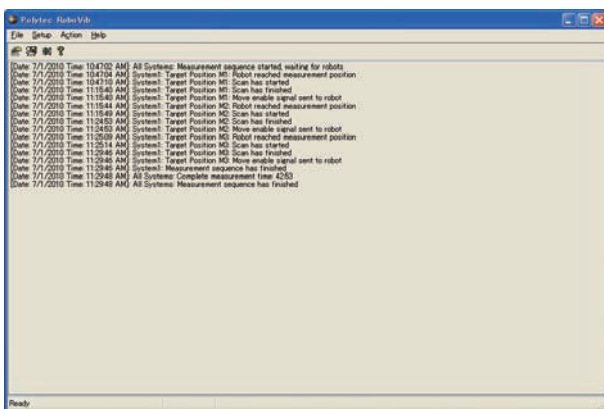


Fig.4.19 進捗状況ウィンドウ

#### 4. 9. OverlayTraces 機能による拡張表示

OverlayTraces 機能を用いて、Robovib による自動計測中に最大3種類までのデータを1つの表示ウィンドウ内で同時表示が可能となる。

- Windows のスタートメニュー→全てのプログラム→OverlayTraces→OverlayTraces をクリックして、プログラムを起動
- 起動後に表示されるウィンドウ (Fig.4.20) で、表示したい Domain, Channel, Signal, Display を選択し、Add channel ボタンを押す
- Robovib ソフトウェアで測定をスタートさせた後に OverlayTraces のウィンドウの OK ボタンを押

すと、指定した波形が OverlayTraces 内のウィンドウに同時表示される

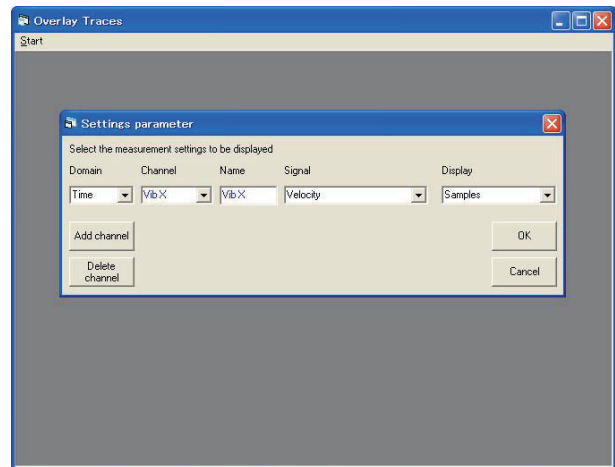


Fig.4.20 OverlayTraces ウィンドウ

#### 4. 10. 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.4.21)。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 (Fig.4.22)、モーダル解析ソフトウェアで読み込んで解析を行う。

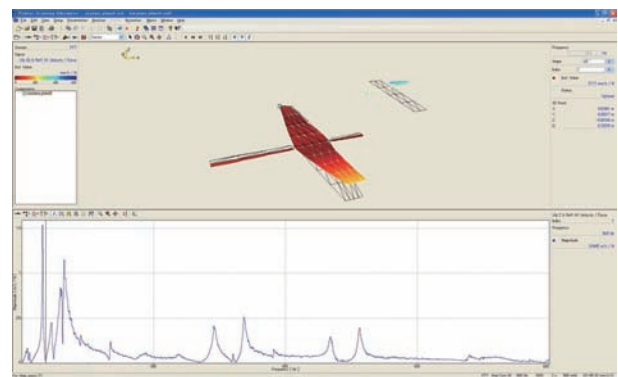


Fig.4.21 計測結果の表示

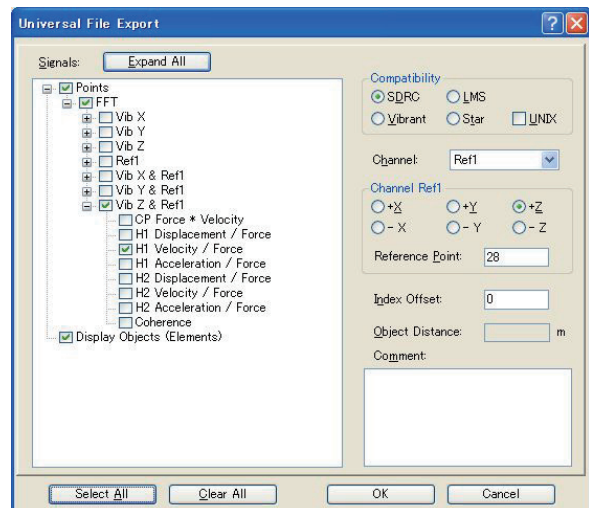


Fig.4.22 エクスポートウィンドウ



## 5. 計測例

本章では実際の計測例を示す。

### 5.1. 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.5.1 に、供試体の三面図を Fig.5.2 に示す。



Fig.5.1 供試体の写真

### 5.2. 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。

### 5.3. 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.5.3 に示す。

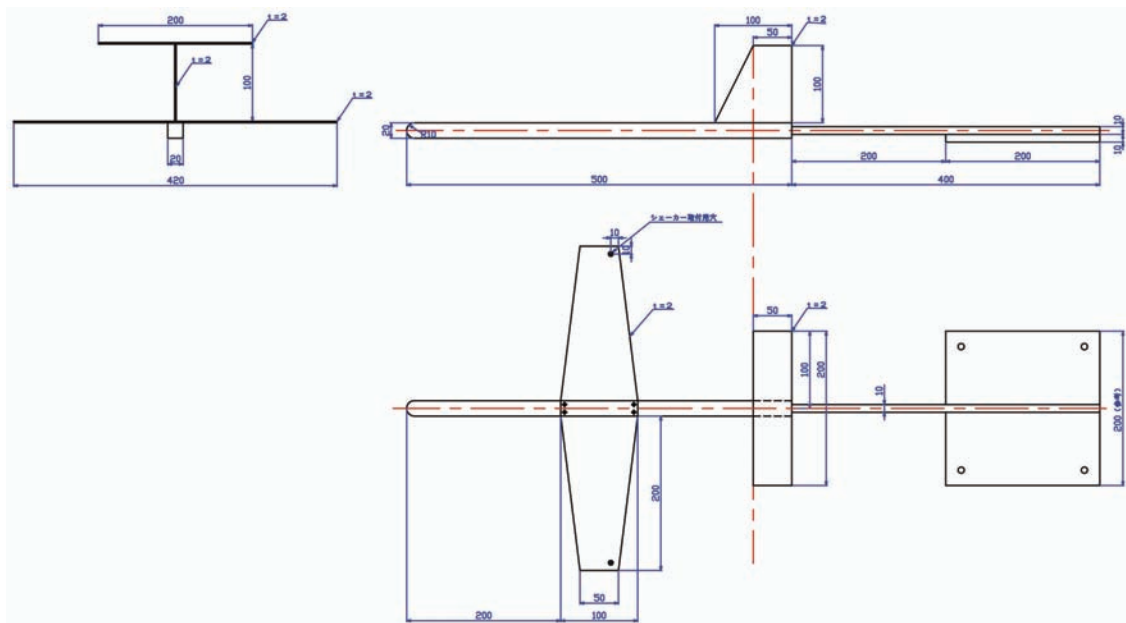


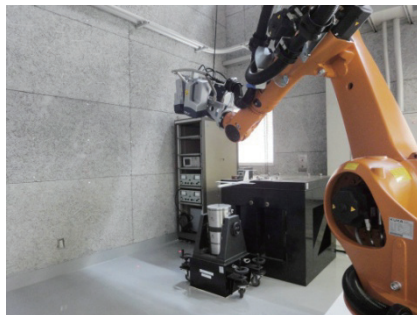
Fig.5.2 供試体の三面図



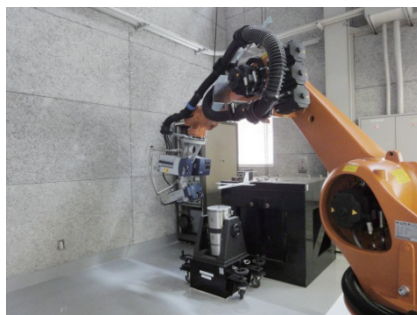
ポジション M1



ポジション M2



ポジション P1



ポジション M3

Fig.5.3 ロボット位置

#### 5.4. ジオメトリ

作成したジオメトリを Fig.5.4 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 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.5.5 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。

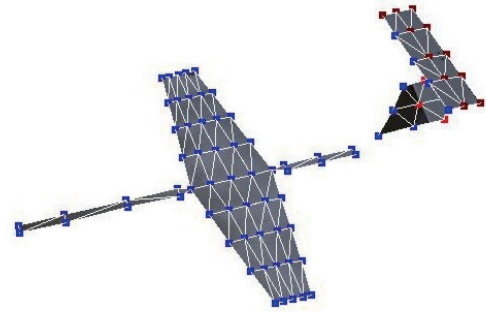
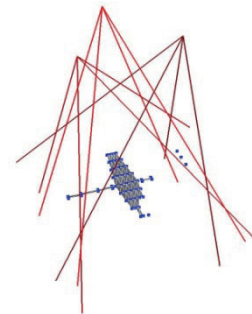
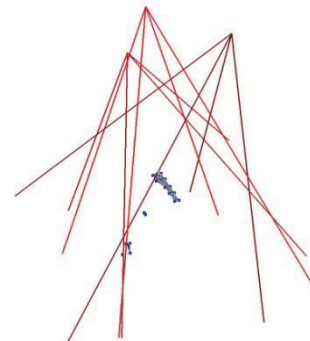


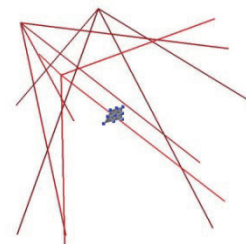
Fig.5.4 ジオメトリ



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.5.5 ジオメトリコンポーネント

5.5. 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。

5.6. 実稼働解析

FRF の計測結果(全ての計測点の平均 FRF)を Fig.5.6 に、実稼働解析の結果を Table 5.1 に示す。

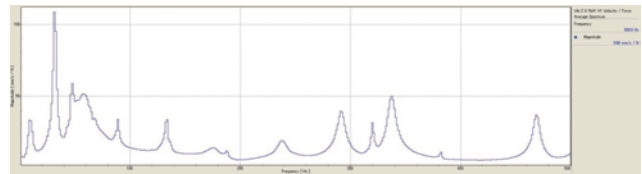


Fig.5.6 周波数応答関数

Table 5.1 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

Table 5.2 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

5.7. 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ド解析ソフトウェア 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.5.7 に、64 個の固有値解析による安定化ダイアグラムを Fig.5.8 に示す。PolyMAX 法によるモード解析結果について、Table5.2 に示す。また、MAC (Modal Assurance Criterion) マトリクスについて、Fig.5.9 および Table 5.3 に示す。

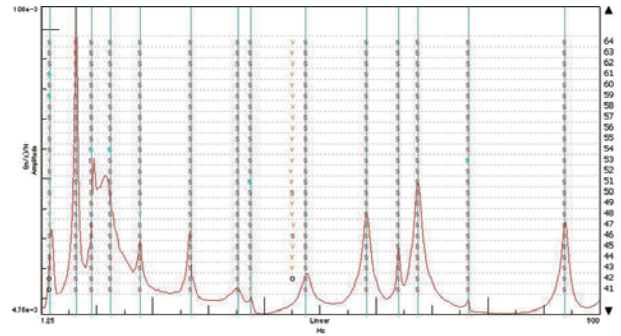


Fig.5.8 安定化ダイアグラム

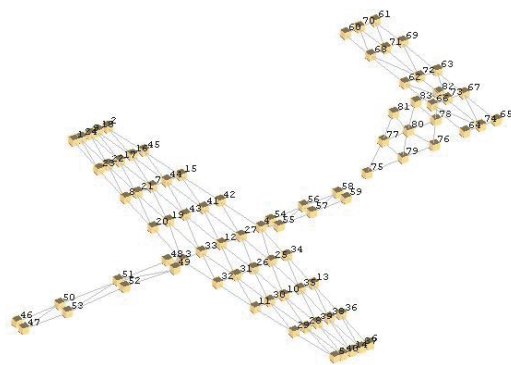


Fig.5.7 Test.Lab 上のジオメトリ

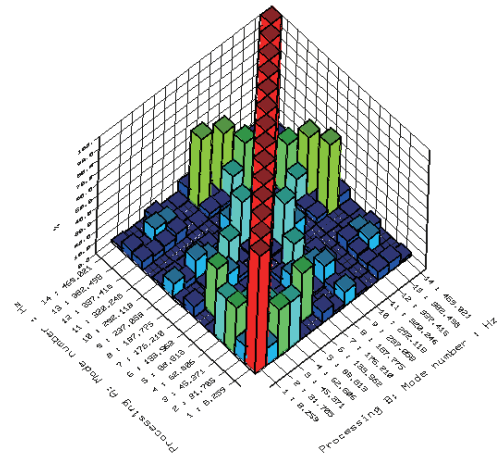


Fig.5.9 MAC マトリクス

Table 5.3 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



## 6. 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<sup>9)</sup>. 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 を構成するロボットも対象となる.

## 7. おわりに

多軸振動非接触自動計測システム MaVES の開発により, 面内振動やジオメトリなど従来のシステムではできなかった計測が可能となった. 今後, 空力弾性解析やヘルスマニタリングへの適用等, MaVES の活用が期待される. なおシステム開発には, Polytec 社および KUKA 社の多大な協力を得た.

## 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)
- 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)
- 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)
- 4) 神田淳, 外崎得雄; 動的変位計測システムの更新, 航空宇宙技術研究所資料 TM-748(2000)
- 5) 神田淳; 動的変位計測システム制御機能の改良, 航空宇宙技術研究所資料 TM-763(2002)
- 6) 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

