

ISSN 0452-2982  
UDC 531.719.4  
: 528.7.74  
: 528.022

# 航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-681

光学式 3 次元位置測定装置による  
風洞内動的模型の位置測定

野 中      修・鈴木 誠 三

1995年4月

航空宇宙技術研究所

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

## 目 次

1. まえがき .....	2
2. テレビカメラによる位置測定原理 .....	3
3. 3次元位置測定装置 .....	6
3.1 3次元位置測定装置の構成及び機能 .....	7
4. 校正試験 .....	8
4.1 校正標識 .....	8
4.2 校正方法 .....	8
4.3 位置測定精度 .....	9
5. 方位角の測定 .....	10
6. 風洞内動的模型の位置測定 .....	12
6.1 測定方法 .....	12
6.2 模型基準点の位置測定精度 .....	13
7. 運動している模型の基準位置測定の結果 .....	15
8. 3次元位置測定装置による運動模型の位置測定の問題点と対策 .....	15
8.1 問題点 .....	15
8.2 対策 .....	17
9. 3次元位置測定装置改良の結果 .....	19
9.1 校正試験法改良の結果 .....	19
9.2 装置改良後の模型基準位置の測定結果 .....	19
10. まとめ .....	20
参考文献*	20

# 光学式3次元位置測定装置による 風洞内動的模型の位置測定\*

野 中 修<sup>\*1</sup> 鈴木 誠 三<sup>\*2</sup>

## Position Measurement of Dynamic Model in Low Speed Wind Tunnel by Optical Position Measuring System

Osamu NONAKA, Seizo SUZUKI

### ABSTRACT

Dynamic wind-tunnel tests using a cable mount system were conducted at the NAL low-speed wind tunnel to identify the stability derivatives of a spaceplane model since 1989. In this wind tunnel test, the control surfaces of the aircraft model (eleron, rudder) are controlled by the outboard computer, and the model is supported by 2 fore and 2 aft cables and flies within 5 dimensions of freedom in the wind tunnel. During the test, the position measurement of the model is necessary to fly the aircraft model safely at the center of the test section. This optical position measuring system was adopted as the position sensor of the flying model.

Firstly, the method of measurement and calibration of the optical position measuring system used to control the model position in the wind tunnel are described. Secondly, the factors which cause measurement errors in this system are discussed. Then, in order to decrease the errors, improvement of the hardware and software and the method of calibrating the system are presented. Finally, the results obtained by the improved system are compared with the data obtained by the original system.

It is shown that this position measuring system has sufficient performance to measure the position and attitude of the model in the dynamic wind tunnel tests.

**Keywords :** position measurement, dynamic wind tunnel test

### 概 要

航空宇宙技術研究所大型低速風洞では、1989年よりケーブルマウント・システムを用いた全機の動的風洞試験を実施している。本試験法は、風洞内にケーブルで支持された模型を自力浮上させて安定した自由飛行をさせ、その運動から空気力を同定するものである。空気力は模型重力の加速度、角速度、姿勢角及びケーブル力を測定し、既知の模型の質量、慣性モーメントから運動方程式により同定される。動的風洞試験では安定した自由飛行を実現させるために模型の位置制御が必須であり、模型の位置を正確に測定することは、本試験法を確立するための重要課題である。

本報告は、ケーブルマウント・システムによる動的風洞試験の模型位置測定に用いた光学式3次元位置測定装置の位置測定原理と校正方法、模型の基準位置及び方位角の測定方法について述べる。

---

\* 平成6年11月7日受付 (received 7 November 1994)

\* 1 空力性能部

\* 2 新型航空機研究グループ

## 記 号

$A_0, \sim I_2$	: 校正標識の設定位置
$C$	: 投影中心から主点 (カメラ座標の原点) までの距離
$K_1, K_2$	: レンズの歪係数
$P_i (i = 1 \sim 6)$	: 被写体
$a_{ij}$	: 回転ベクトル $R_A$ の要素
$b_{ij}$	: 回転ベクトル $R_B$ の要素
$X, Y, Z$	: 被写体が置かれている空間に設定された地上座標系 (本報告では風洞座標軸と一致させた)
$X_0, Y_0, Z_0$	: 地上座標系におけるカメラの投影中心の座標位置
$X_R, Y_R, Z_R$	: 模型基準点の地上座標系における位置座標
$X^K, Y^K, Z^K$	: $K$ 番目の標識の地上座標における位置座標
$X_R^K, Y_R^K, Z_R^K$	: $K$ 番目の標識から求めた模型基準点の地上座標における位置座標
$x, y$	: 主点 (光軸と写真画面の交点) を原点とし、写真画面上にとられた直角座標系でカメラ座標系と呼ぶ
$x_0, y_0$	: 主点 (カメラ) の位置ずれ
$x_i^K, y_i^K, z_i^K$	: $K$ 番目のカメラ座標における $i$ 番目の被写体の位置座標
$x_p, y_p, z_p$	: 投影中心を原点とする直角座標系で、地上座標系の原点を投影中心 ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) に移した第 2 地上座標系の $X, Y, Z$ 軸まわりに、 $\omega, \varphi, \kappa$ だけ順次回転させて得られる直角座標系で、傾いた座標系と呼ばれる
$x', y', z'$	: 模型に固定された機体座標系
$x'^K, y'^K, z'^K$	: 機体座標系における $K$ 番目の標識の位置座標
$x'', y'', z''$	: 機体座標系の原点を原点とした地上座標系と平行な座標系 (第 2 地上座標系)
$x''^K, y''^K, z''^K$	: $K$ 番目の標識の第 2 地上座標系における位置座標
$R_A$	: オイラー角 $\omega, \varphi, \kappa$ で作られる回転ベクトル
$R_B$	: オイラー角 $\psi, \theta, \phi$ で作られる回転ベクトル
$H$	: パーチカル・ジャイロで計測された $\theta_v, \phi_v$ の値を用いて求められる回転ベクトル
$\Delta h_1, \Delta y_1, \Delta h_2$	: (15) 式により定義された模型標識 1 から 2 への位置ベクトル成分
$\Delta x, \Delta y,$	: レンズ歪補正量

$\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta z_1$	: (16) 式により定義された模型標識 1 から 2 への位置ベクトル成分
$\omega$	: $x$ 軸回りのカメラの傾き角
$\varphi$	: $y$ 軸回りのカメラの傾き角
$\kappa$	: $z$ 軸回りのカメラの傾き角
$\theta$	: 模型のピッチ角
$\phi$	: 模型のバンク角
$\psi$	: 模型の方位角
添字	
$i$	: 被写体の番号を示す ( $i = 1 \sim 6$ )
$K$	: 模型標識の番号を示す ( $K = 1, 2, 3$ )、またはカメラの番号を示す。
$l$	: 傾斜台の設置値
$M$	: 磁気方位センサによることを意味する。 (例 $\psi_M$ )
$v$	: パーチカル・ジャイロによることを意味する。(例 $\theta_v, \phi_v$ )
$w$	: 3次元位置測定装置によることを意味する。(例 $\psi_w$ )

## 1. まえがき

航空機の飛行安定性の解析、飛行制御系の設計のために、動安定微係数は欠くことのできない空気力学的な物理量である。当所では革新航空宇宙輸送技術の研究の一環として、1989 年度より大型低速風洞において、空力パラメータ同定法を用いた風洞内動的試験法の確立をめざし、ケーブルマウント・システムによるスペースプレーン模型の低速領域における空力動微係数の測定<sup>1), 2)</sup>を進めてきた。

本試験法はケーブルで風洞内に 5 自由度で拘束された模型を運動させ、模型の運動を測定して動微係数を同定するものである。試験では模型の 3 次元位置を正確に測定する必要がある<sup>3)</sup>。模型の基準位置の測定には、非接触測定法の一つであるテレビカメラを用いた 2 次元位置測定装置 2 台を組合わせ、光学的に行われる。ここでは、2 次元位置測定装置を 2 台組合せた装置を 3 次元位置測定装置と呼ぶこととする。

風洞内で模型を安定飛行させるためには、模型の重心位置情報を操舵量にフィードバックさせ、模型の位置制御を行う必要がある<sup>4)</sup>。本報告では、3 次元位置測定装置による模型標識の 3 次元位置測定原理、方位角測定原理及び模型基準点の測定法と測定結果を述べるとともに、3 次元位置測定の精度向上対策とその成果について報告する。

## 2. テレビカメラによる位置測定原理

テレビカメラによる3次元位置測定原理は、後述する単写真標定を応用した立体写真の原理<sup>5)</sup>に基づいている。図1に示すように、人間の目の位置にカメラを置き、それぞれのカメラで同一の被写体を撮影する。2つの写真を合成した写真を作り、左目は左側のカメラで撮った写真だけが、右目では右側のカメラで撮った写真だけが見られるように工夫すると、人間の頭脳の中で2つの像が合成され、立体像として認識できる。この立体写真の原理を利用したのが、本動的風洞試験の模型の位置測定に利用された3次元位置測定装置である。2次元運動している被写体の2次元位置を測定する装置は「ビデオトラッカー」という商品名で1式単位で市販されている。我々はビデオトラッカーを2式使って3次元運動している被写体の3次元位置を測定した。本報告ではこの装置を3次元位置測定装置と呼ぶこととし、ここでは、被写体（模型標識）の3次元位置を求める方法と、被写体の3次元位置を使って模型の基準位置を求める方法について述べる。

### (1) 地上座標とカメラ座標及び傾いた座標系との関係

本動的風洞試験での、被写体の3次元位置を求める方法は、文献5) による単写真標定の原理に基づいて行っている。

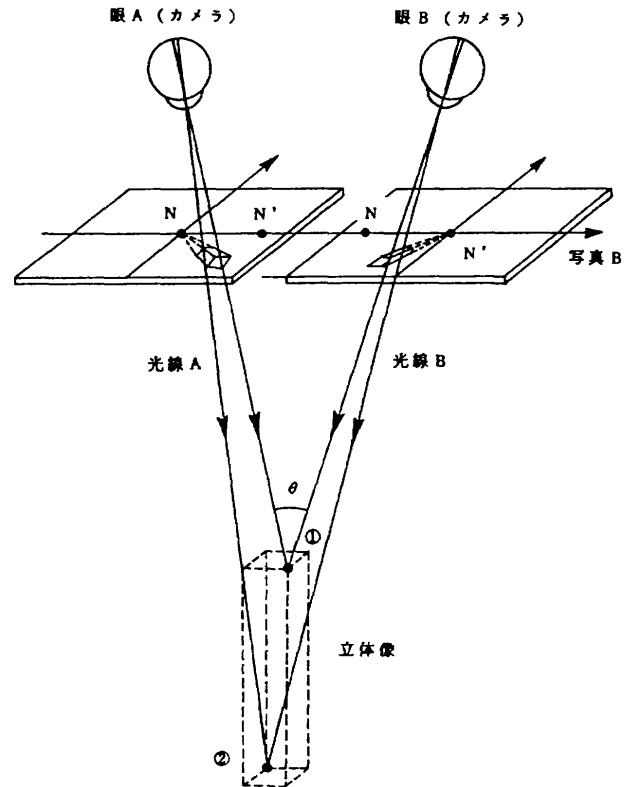


図1 立体写真の原理

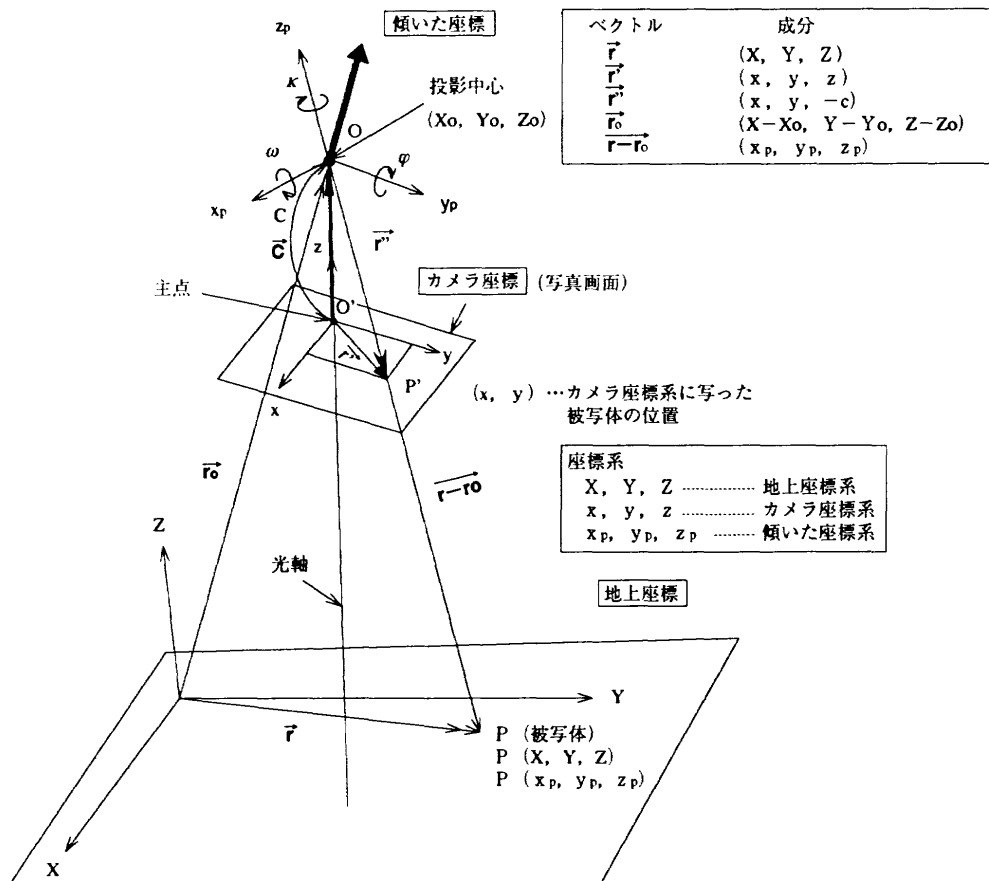


図2 座標系と被写体の位置関係

まず図2の座標系の説明をする。(X, Y, Z) 座標系は実空間に定められた直交座標系で、地上座標系と呼ばれている。(X, Y, Z) 座標系は、カメラのフィルム面を x, y 平面とし、z 軸をカメラの光軸とする直交座標系であり、一般にはカメラ座標系と呼ばれている。

(x<sub>p</sub>, y<sub>p</sub>, z<sub>p</sub>) 座標系は、カメラの投影中心（レンズの焦点）を原点とする直交座標系で、傾いた座標系と呼ばれている。カメラをそれぞれ z<sub>p</sub> 軸の正方向に対して左回りに κ の角だけ回転し、次に y<sub>p</sub> 軸の正方向に対して左回りに φ の角だけ回転し、さらに x<sub>p</sub> 軸の正方向に対して左まわりに ω の角だけ回転させた傾きで写真撮影を行ったとする。このことは、傾いた写真を逆に、それぞれ x<sub>p</sub>, y<sub>p</sub>, z<sub>p</sub> の回りに右回りに、ω, φ, κ だけ順次回転させると、傾きのない写真が得られることを意味する。回転行列式を用いると、地上の対象物 P (X, Y, Z) の傾いた座標系におけるカメラ座標 (x<sub>p</sub>, y<sub>p</sub>, z<sub>p</sub>) は次に述べる(1)式により求められる。

## (2) 被写体の位置を求める基本式

被写体 P は地上座標系における位置が P (X, Y, Z) で、傾いた座標系からみた位置は P (x<sub>p</sub>, y<sub>p</sub>, z<sub>p</sub>) である。さらに、被写体の写真画面に写された像 P' のカメラ座標系における位置は P' (x, y) である。地上座標系における P 点の位置ベクトルを  $\vec{r}$  (X, Y, Z) とし、傾いた座標系の原点（投影中心）O の地上座標系における位置ベクトルを  $\vec{r}_0$  (X<sub>0</sub>, Y<sub>0</sub>, Z<sub>0</sub>) とすると、傾いた座標系から P 点の位置ベクトルは  $\vec{r} - \vec{r}_0$  となり、地上座標系からみたその成分は (X - X<sub>0</sub>, Y - Y<sub>0</sub>, Z - Z<sub>0</sub>) となる。つまり位置ベクトル  $\vec{OP}$  は傾いた座標からみた被写体の位置を表わす。傾いた座標系は地上座標系を回転ベクトル R に従って回転させることによって得られるので(1)式が成立する。

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

(1)式において (x<sub>p</sub>, y<sub>p</sub>, z<sub>p</sub>) は傾いた座標系からみた被写体 P の位置座標であり、(X - X<sub>0</sub>, Y - Y<sub>0</sub>, Z - Z<sub>0</sub>) は、地上座標系の原点を傾いた座標系の原点 O に平行移動した第2地上座標系からみた被写体 P の位置座標である。また、a<sub>ij</sub> はベクトル R<sub>A</sub> の成分であり、(2)式で与えられる。

$$R_A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \kappa - \sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

即ち、第2地上座標からみた被写体の位置ベクトル  $\vec{OP}$  は、回転ベクトル R を用いて(1)式により傾いた座標系からみた位置ベクトル (x<sub>p</sub>, y<sub>p</sub>, z<sub>p</sub>) と関係づけられる。

被写体 P は写真画面（カメラ）座標系上に P' に写る。カメラ座標からみた P' 点の位置は、(x, y, 0) である。

カメラ座標からみた  $\vec{OP'}$  の位置ベクトルは

$$\vec{OP'} = \vec{O'P'} + \vec{OO'}$$

となり、(3)式が成立する。

$$\vec{r'} = \vec{r} (x, y, 0) - \vec{C} (0, 0 - C) \quad (3)$$

また、P, P' の位置を傾いた座標系で表わせばそれぞれ

$$\begin{aligned} \vec{OP} &= \vec{r} - \vec{r}_0 (x_p, y_p, z_p) \\ \vec{OP'} &= \vec{r'} (x, y, -C) \end{aligned}$$

ところで、O, P', P は同一線上に存在するので、写真画面に写った被写体 P' のカメラ座標系における位置 (x, y, 0) と、傾いた座標系からみた被写体 P の位置 (x<sub>p</sub>, y<sub>p</sub>, z<sub>p</sub>) の間には次式の共線条件が成立する。

$$\frac{x}{x_p} = \frac{y}{y_p} = \frac{-C}{z_p}$$

x, y について解いて(4)式を得る。

$$\begin{aligned} x &= -C \frac{x_p}{z_p} \\ y &= -C \frac{y_p}{z_p} \end{aligned} \quad (4)$$

(4)式に(1)式を代入すれば(5)式を得る<sup>5)</sup>。

$$\left. \begin{aligned} x &= -C \frac{a_{11} (X - X_0) + a_{12} (Y - Y_0) + a_{13} (Z - Z_0)}{a_{31} (X - X_0) + a_{32} (Y - Y_0) + a_{33} (Z - Z_0)} \\ y &= -C \frac{a_{21} (X - X_0) + a_{22} (Y - Y_0) + a_{23} (Z - Z_0)}{a_{31} (X - X_0) + a_{32} (Y - Y_0) + a_{33} (Z - Z_0)} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

(5)式は被写体 P の地上座標系における位置 (X, Y, Z) と撮影された像の写真画面（カメラ）座標系における位置 (x, y) の関係を示すものである。2つのカメラで同一の被写体を撮影し、それぞれのカメラ座標系で被写体の像の位置 (x<sup>k</sup>, y<sup>k</sup>) が測定されれば、地上座標系における被写体の位置 (X, Y, Z) が求められるという式である<sup>5)</sup>。

未知数が3つ (X, Y, Z) あるので、式が3本必要となる。そのために2台のカメラ (n = 1, 2) で同一被写体を撮影し、それぞれの写真画面（カメラ座標系）の像の位置 (x<sup>1</sup>, y<sup>1</sup>), (x<sup>2</sup>, y<sup>2</sup>) を求めることによって、被写体の地上座標系の位置が求まることとなる。

(5)式は、画面距離 C, 主点の位置が正確で、レンズの歪がなく、カメラ座標（写真画面）が平面に保たれている

場合に成立する式である。実際の場合には、誤差が存在するのでこれらの誤差原因を補正するため、(5)式の  $x, y$  からそれぞれ補正項  $\Delta x, \Delta y$  を差引いた式が用いられる。即ち、(5)式のかわりに(6)式が用いられる。

$$\left. \begin{aligned} x &= -C \frac{a_{11}(X-X_0) + a_{12}(Y-Y_0) + a_{13}(Z-Z_0)}{a_{31}(X-X_0) + a_{32}(Y-Y_0) + a_{33}(Z-Z_0)} - \Delta x \\ y &= -C \frac{a_{21}(X-X_0) + a_{22}(Y-Y_0) + a_{23}(Z-Z_0)}{a_{31}(X-X_0) + a_{32}(Y-Y_0) + a_{33}(Z-Z_0)} - \Delta y \end{aligned} \right\} (6)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= x_0 + \bar{x} (K_1 r^2 + K_2 r^4) + (p_1 \bar{x} + p_2 \bar{y} + p_3 \bar{x} \bar{y} + p_4 \bar{y}^2) \\ \Delta y &= y_0 + \bar{y} (K_1 r^2 + K_2 r^4) + (p_5 \bar{x} \bar{y} + p_6 \bar{x}^2) \\ \bar{x} &= x - x_0 \\ \bar{y} &= y - y_0 \\ r^2 &= (\bar{x}^2 + \bar{y}^2) / c^2 \end{aligned} \right\} (7)$$

### (3) カメラパラメータを求める方法

画面距離  $C$ 、レンズの歪等(7)式に含まれる量及びカメラの軸に関係する回転ベクトル  $R_A$  の成分  $a_{ij}$  はカメラパラメータと呼ばれ、カメラ本体、カメラの設置状況によって決められるものである。これらの量は1台のカメラについて、24個ある。この値を決定するために校正試験が実施される。校正試験では、地上座標系が既知な  $N$  個の被写体  $(X_i^K, Y_i^K, Z_i^K)$  を2台のカメラで写し、像のカメラ座標系上の位置  $[x_i^K, y_i^K (i=1, N, K=1, 2)]$  を測定する。これらの結果を(6)、(7)式に代入して未知量であるカメラパラメータ  $[C^K, a_{ij}^K (i=1, 3, j=1, 3), (X_o^K, Y_o^K, Z_o^K), (x_o^K, y_o^K), K_1^K, K_2^K, P_1^K \sim P_6^K] (K=1, 2)$  46個が決定される<sup>5)</sup>。一度校正試験を行ったならば、以後カメラの配置、向き等を変えることができない。

### (4) 被写体の3次元位置算出法

(6)、(7)式において、 $C$  (1個)、 $a_{ij}$  (9個)、 $X_o, Y_o, Z_o$  (3個)、 $x_o, y_o, z_o$  (3個)、 $K_1, K_2$  (2個)、 $P_1 \sim P_6$  (6個)、の24個の値はあらかじめ校正試験によって求められる。(6)式について、カメラが2台用いられているので、被写体1つに対して4本の式が成立することとなる。それぞれのカメラに写った被写体の像の写真画面上の位置  $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$  を測定すれば(6)、(7)式から、3つの未知数である被写体の地上座標における位置  $(X, Y, Z)$  が求められる。

即ち、(6)式で分母を払うと、2台のカメラについて、 $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$  を係数に含む  $(X, Y, Z)$  に関する4本の線形の連立方程式が得られる。このうち3本を用いると、1組の解が求まる。実際は、他の3本の組合わせで求める解との平均値を、求める被写体の位置測定値とする。

### (5) 模型方位角を求める方法

模型の姿勢角(オイラー角)は、2つの模型標識の位置

を測定して後述する(18)式を解き、3次元位置測定装置のみから求めることができる。しかしながら、動的風洞試験では、模型にバーチカル・ジャイロが搭載されており、これによって測定されるピッチ角  $\Theta_v$ 、バンク角  $\Phi_v$  は、3次元位置測定装置で得られる値より精度が良いので、動的風洞試験における模型の方位角は、バーチカル・ジャイロと、3次元位置測定装置の両方を用いて次のように求められる。

3次元位置測定装置では、模型に取付けられた標識のうち2つの標識のみが使用される。標識番号1, 2について後述する(18)式を作り、辺々の差を作ると、(8)式が得られる。

$$\begin{vmatrix} X^1 - X^2 \\ X^1 - Y^2 \\ Z^1 - Z^2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x'^1 - x'^2 \\ y'^1 - y'^2 \\ z'^1 - z'^2 \end{vmatrix} \quad (8)$$

(8)式の  $R$  は後述する(17)式で与えられ、模型のオイラー角  $\Psi, \Phi, \Theta$  で表わされる。また、左辺は標識1, 2の位置を示し、3次元位置測定装置より求められる。右辺の項は機体座標系における標識1から2への位置ベクトルであるので既知である。従って(8)式はオイラー角を求める式でもある。オイラー角のうち、 $\Theta$  と  $\Phi$  についてはバーチカル・ジャイロで計測された値  $\Theta_v, \Phi_v$  を用いるとすれば、(8)式を解いて方位角  $\Psi$  を求めることができる。(9)式のように  $H$  を導入すると(8)式は(10)式となる。

$$H = \begin{vmatrix} \cos \Theta_v & 0 & \sin \Theta_v \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \Theta_v & 0 & \cos \Theta_v \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Phi_v & -\sin \Phi_v \\ 0 & \sin \Phi_v & \cos \Phi_v \end{vmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{vmatrix} X^1 - X^2 \\ Y^1 - Y^2 \\ Z^1 - Z^2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \Psi_v & -\sin \Psi_v & 0 \\ \sin \Psi_v & \cos \Psi_v & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} H \begin{vmatrix} x'^1 - x'^2 \\ y'^1 - y'^2 \\ z'^1 - z'^2 \end{vmatrix} \quad (10)$$

地上座標系における標識1から2への位置ベクトルを  $\Delta h$  ( $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ ) とし、さらに(11)式で定義される  $\Delta h$  ベクトルを導入すると、(10)は(12)式となる。

$$\begin{vmatrix} \Delta h_x \\ \Delta h_y \\ \Delta h_z \end{vmatrix} = H \begin{vmatrix} x' - x' \\ y' - y' \\ z' - z' \end{vmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{vmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \Psi_v & -\sin \Psi_v & 0 \\ \sin \Psi_v & \cos \Psi_v & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta h_x \\ \Delta h_y \\ \Delta h_z \end{vmatrix} \quad (12)$$

(12)式を成分に分解し、第1式に  $\Delta h_y$  を第2式に  $\Delta h_x$  を掛け辺々の差をつくれば(13)式を得る。

$$\Delta X_i \Delta h_y - \Delta Y_i \Delta h_x = -\sin \Psi (\Delta h_x^2 + \Delta h_y^2) \quad (13)$$

$$\Psi = \sin^{-1} \left( \frac{\Delta Y_i \Delta h_x - \Delta X_i \Delta h_y}{\Delta h_x^2 + \Delta h_y^2} \right) \quad (14)$$

3次元位置測定装置により標識1, 2の地上座標系における位置が求められるので,  $\Delta r$  ( $\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i$ ) が計算される。バーチカル・ジャイロによって  $\Theta, \Phi$  が測定され(13)式によって  $H$  が求まる。標識の機体座標系における位置はあらかじめわかっているのので, (11)式によって  $\Delta h$  ( $\Delta h_x, \Delta h_y, \Delta h_z$ ) が求まる。このようにして(14)式から模型の方位角  $\Psi$  が求められる。

(6) 被写体(模型標識)の位置から模型の基準位置を求める方法

模型に取付けられた標識を模型標識と呼び, それを被写体としてビデオカメラで撮影すると, 地上座標系における模型の基準位置が求められる。図3は模型の基準位置とビデオカメラでとらえる被写体(標識)の位置関係を示したものである。

模型基準位置  $\overline{OR}$  の位置ベクトルは,

$\overline{OR} = \overline{OT} - \overline{RT}$  であるので, (15)式が成立する。

$$\begin{bmatrix} X_R^K \\ Y_R^K \\ Z_R^K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X^K \\ Y^K \\ Z^K \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x''^K \\ y''^K \\ z''^K \end{bmatrix} \quad (15)$$

模型基準点に原点をもつ  $XYZ$  座標系に平行な  $x'', y'', z''$  座標系は, 機体座標系の  $z', y', x'$  軸周りにオイラー角  $\Psi, \Theta, \Phi$  だけ順次回転させることによって得られる, オイラー角の回転ベクトルを  $R$  とし, その成分を  $b_{ij}$  とすると,  $(x'', y'', z'')$  座標系における標識  $T$  の位置と機体座標系の間には(16)式の関係が成立する。

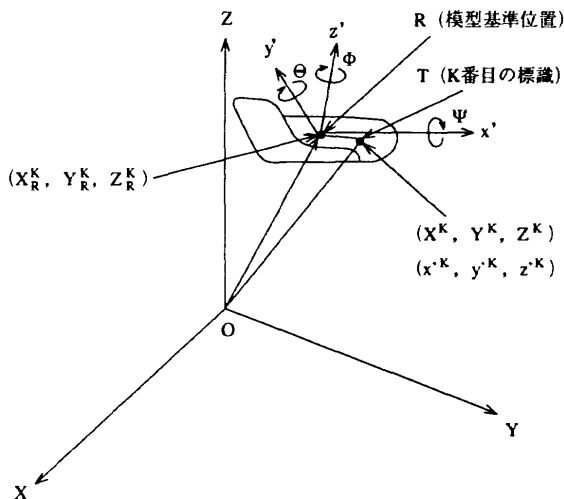


図3 模型基準点と模型標識の位置関係

$$\begin{bmatrix} x''^K \\ y''^K \\ z''^K \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x'^K \\ y'^K \\ z'^K \end{bmatrix} \quad (16)$$

(15)式に(16)式を代入すれば, 地上座標系における模型の基準点は(18)式によって与えられる。

$$\begin{bmatrix} X_R^K \\ Y_R^K \\ Z_R^K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X^K \\ Y^K \\ Z^K \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} b^{11} & b^{12} & b^{13} \\ b^{21} & b^{22} & b^{23} \\ b^{31} & b^{32} & b^{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'^K \\ y'^K \\ z'^K \end{bmatrix} \quad (18)$$

(18)式は標識の地上座標系における位置と模型の基準点の関係を示す式である。但し,

$$R = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Psi_v - \sin \Psi_v, 0 \\ \sin \Psi_v, \cos \Psi_v, 0 \\ 0, 0, 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \Theta_v, 0, \sin \Theta_v \\ 0, 1, 0 \\ -\sin \Theta_v, 0, \cos \Theta_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1, 0, 0 \\ 0, \cos \Phi_v, -\sin \Phi_v \\ 0, \sin \Phi_v, \cos \Phi_v \end{bmatrix} \quad (17)$$

ビデオカメラによって標識の地上座標系における座標位置  $[X^K, Y^K, Z^K]$  が測定されればバーチカル・ジャイロ等による  $\Psi_v, \Theta_v, \Phi_v$  を用いて, 模型の基準点の位置を求めることができる。なお, 原理的には, 姿勢角情報も3次元位置測定装置から求めることも可能であるが, ここでは, バーチカル・ジャイロによる測定値を用いることにした。

### 3. 3次元位置測定装置

図4は大型低速風洞(5.5 m × 6.5 m)に設置されたケーブルマウント・システムによる動的風洞実験システムの概要図である。実験に使用したスペースプレーン模型には操舵面としてエレボン, ラダー, カナードが備えられ, 外部信号により電動で駆動される。模型の運動を測定するため, 模型内に慣性センサ, バーチカル・ジャイロが搭載されている。また, ケーブル力を測定するために6分力計が取付けられている。

模型は風洞側壁及び上下壁の滑車を介して, 前方, 後方の2本のワイヤーにより支持されている。空気力により自力浮上した模型は上下, 左右, ピッチング, ローリング, ヨーイングの5自由度の運動の自由度がある。風洞内の模型の運動はケーブル張力の強さに影響されるため, 後方ワイヤーの端末にロードセルを取付け, 張力調整装置により張力の調整が行われる。

模型に働く空気力は模型に取付けられた慣性センサおよびバーチカル・ジャイロから求められる慣性力からワ

ワイヤーの張力をベクトル的に差引いて求められる。模型の基準位置（想定された機体の重心位置と同一とした）の測定は、観測窓に設置された2台のテレビカメラに写された3個の標識の位置測定から、2章で述べた測定原理に基づき6章で述べる方法により求められる。

### 3.1 3次元位置測定装置の構成及び機能

#### (1) 機器構成

図5は3次元位置測定装置全体のシステムブロック図である。3次元位置測定装置は以下で構成されている。

- ① テレビカメラ（CCDカメラ、レンズ $f=4.8$ 、2台）
- ② 2次元ビデオトラッカーシステム（2台）
- ③ 同期コントローラ
- ④ 3次元演算部
- ⑤ 高速バッファ装置
- ⑥ パーソナルコンピュータ

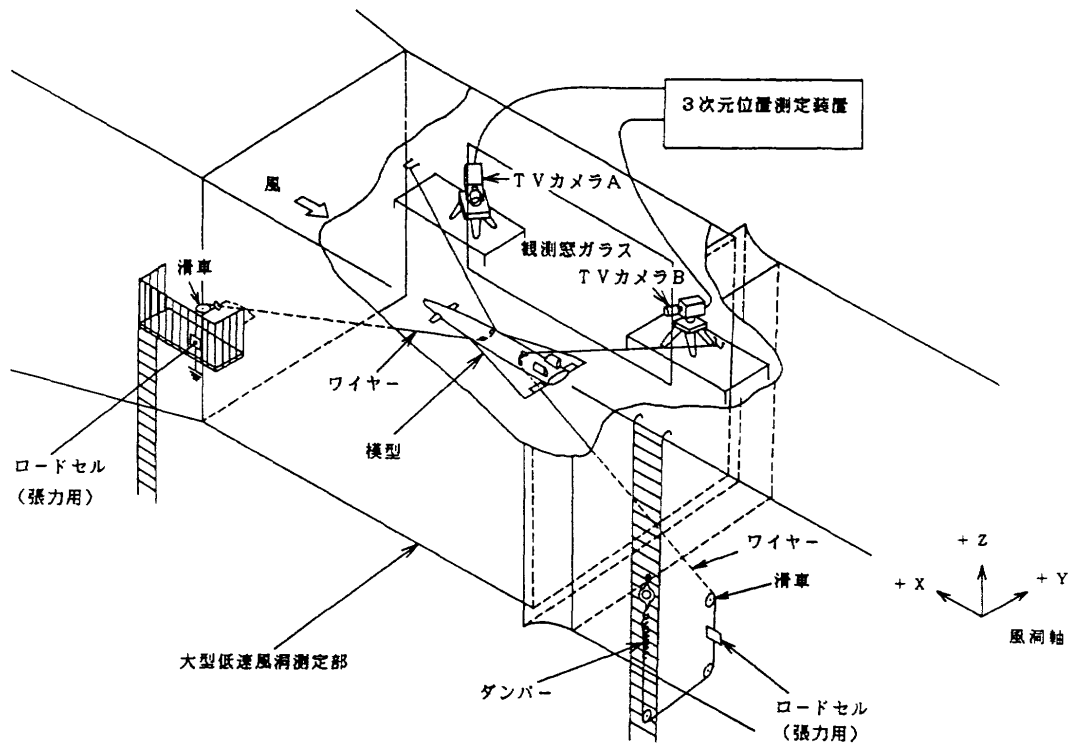


図4 動的風洞実験システムの概要

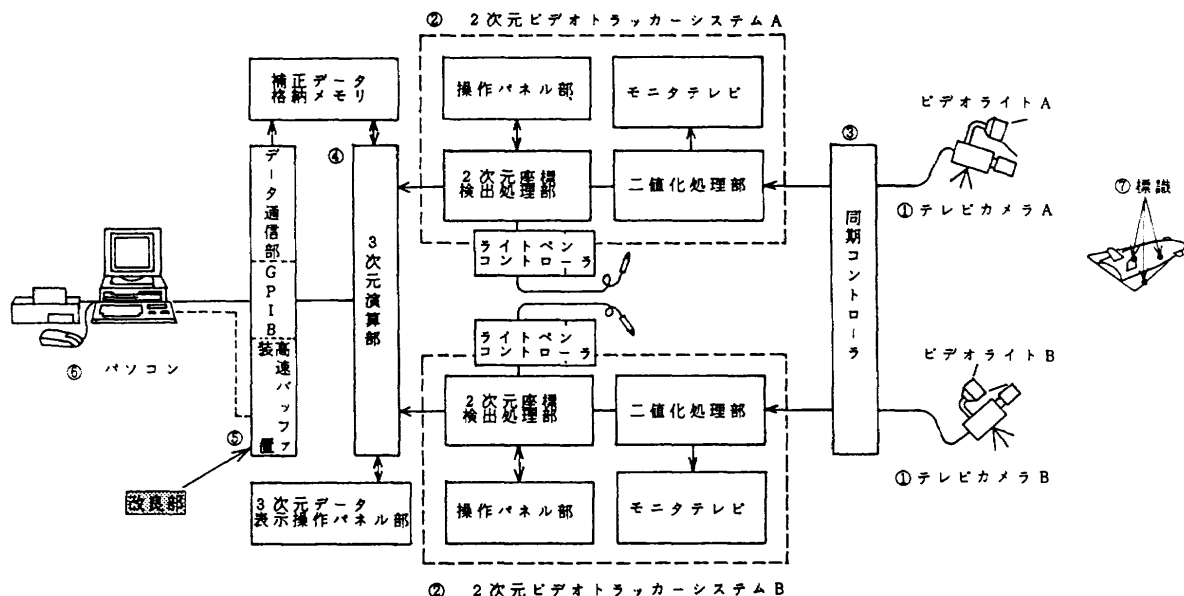


図5 3次元位置測定装置のシステムブロック図

## ⑦ 標識 (3 個)

## (2) 機能

同時計測可能なチャンネル数 (標識数) は最大 4 点であり、4 点の標識のサンプリングが 60 Hz 毎に行うことが可能である。各軸方向の仕様位置測定精度は総視野の  $\pm 0.5\%$  である。また、データ解析用ソフトウェアにより、測定標識の座標値、軌跡表示、変位、速度、加速度、角度 (3 点の測定座標点を結んで得られる 3 つの角度)、角速度及び角加速度を求めることが出来る。

3次元位置測定装置のテレビカメラによる画面座標の測定は、モニタに写し出される標識の映像信号をウインドウで捉え、映像信号を任意の輝度レベルでスライスし、背景との明暗の差により抽出して行われる。標識の位置は、テレビカメラより得られる映像信号から水平方向 512、垂直方向 384 に分割された分解能の座標系 (カメラ座標系) において、ウインドウ内で抽出されたドットの座標値の平均値で求められる。この演算は、1/60 秒毎に行われる。テレビカメラ A 及び B で捕えられた映像信号は同期コントローラによりデータサンプリングと同期を取った後、背景との明暗の差でモノクロ化して抽出される。2 値化処理部で背景 (暗) は 0、標識 (明) は 1 としてデジタル処理される。2 値化されたデジタル信号は 2 次元座標検出部に入り標識のカメラ座標系における位置が求められる。次に標識の位置信号は 3 次元演算部に入り、既知のカメラパラメータを使って (6)、(7) 式を用いて、地上座標系における 3 次元位置が求められる。

## 4. 校正試験

校正試験とは、2 章の測定原理で述べた (6)、(7) 式に含まれる 2 台のテレビカメラのカメラパラメータを求めることである。

## 4.1 校正標識

3次元位置測定装置を使用する場合には、使用状態と同一のカメラ配置で、あらかじめ座標位置が既知の標識を用いて、カメラパラメータを求める校正試験が必要となる。校正用としては、図 6 に示す光反射型 80 mm $\phi$  球を用いた。本校正試験では図 6 右側に示すように一度に 3 点の既知の座標が与えられるように、3 個の標識をつないで用いた。当初の校正標識は、表面に蛍光塗装を施した直径 80 mm の発泡スチロール球 (3 個) を 1 m 間隔で配置したものを使用した。その後改善を施した。改善の内容については 9.1 節で述べる。

## 4.2 校正方法

校正試験は図 4 に示すように、動的風洞試験時の 3 次元位置測定状態と同一のカメラとレンズの配置で 2 台のテレビカメラを風洞の観測窓に設置する。模型の予想される運動範囲を網羅する立方空間を想定して、校正標識を設置する。第 2 章の測定原理で述べた地上座標系 ( $X, Y, Z$ ) として、測定部中心に原点を置き、上流方向に  $X$  軸をとり、 $X$  軸を含む水平面内に  $Y$  軸をとり、鉛直上方に  $Z$  軸をもつ直交座標系すなわち風洞座標系をとる。

図 7 に動的風洞試験のための校正試験に用いた標識の風洞座標系における設定位置を示す。設定された位置は、

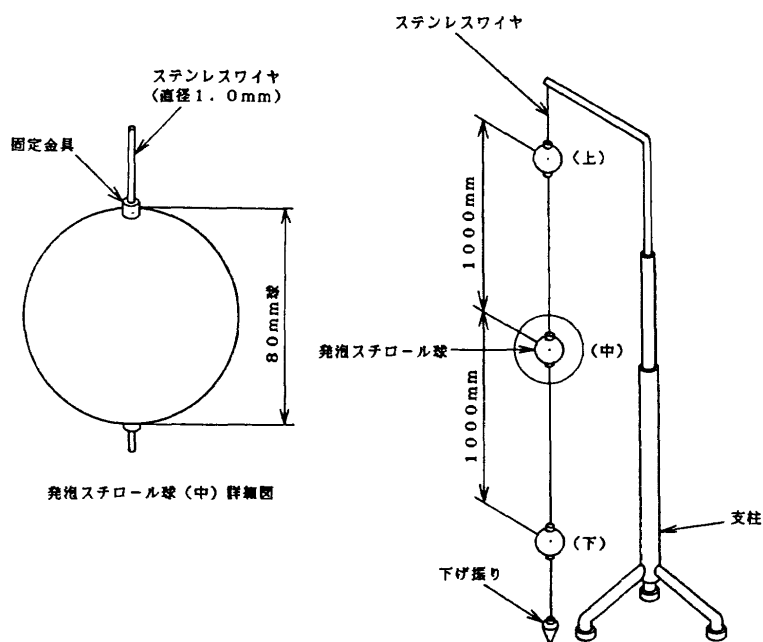


図 6 光反射型 80 mm $\phi$  球校正標識 (改良前)

風洞中心から  $X$  軸方向に  $-900 \sim +400$  mm,  $Y$  軸方向に  $-800 \sim +1200$  mm,  $Z$  軸方向に  $\pm 1000$  mm の範囲の  $A_0 \sim I_2$  点までの合計 27 点とした。校正試験では設定された標識の既知の座標値をあらかじめ 3 次元位置測定装置に入力し、設置された校正標識の 3 次元位置を本測定装置により、順次測定する。テレビカメラ A および B のカメラパラメータ ( $x_0, y_0, K_1, K_2, P_1 \sim P_6, C$ ) は各カメラにつき 11 個ずつあり、傾いた座標系の回転ベクトル  $a_{ij}$  (9 個) とともに、(6), (7) 式を用いて最小自乗法に基づく数値探索により決定される。

#### 4.3 位置測定精度

模型の 3 次元位置測定のために大型低速風洞に設置された校正座標により求めた 3 次元位置測定装置の校正精

度を図 8～10 に示す。図の横軸には、校正標識の設定座標値を、縦軸には測定値と設定座標値の差をカメラの視野（本試験では 2500 mm）で割った値（%）で示す測定誤差を示す。図 8～図 10 のシンボル（○, △, □）は 3 つの各校正標識を示しており、○印は風洞中心より +1000 mm, △印は風洞中心, □印は風洞中心より -1000 mm の高さに置かれた校正標識の位置を表わしている。

図 8 は  $X$  軸方向の測定精度を示す。中位の高さにある △印標識の  $X$  軸方向の位置測定誤差は風洞中心より高位の高さにある標識 ○印及び低位の高さにある □印の標識の測定誤差に比べて小さく、 $\pm 0.8\%$  以内であった。 $X = -900$  の場合の ○印の結果を除けば、 $X$  軸方向の誤差は総じて  $\pm 1\%$  以内である。

図 9 は、 $Y$  軸方向の位置測定精度を示す。 $Y$  軸方向の測

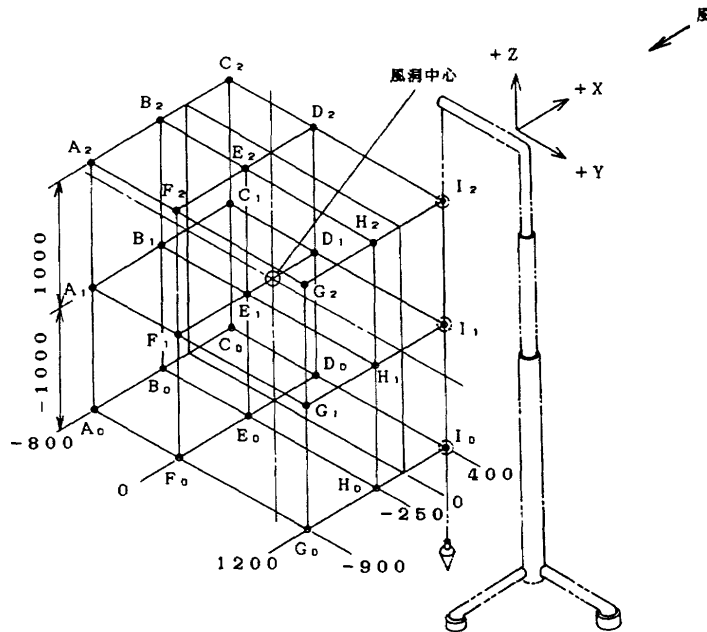


図 7 校正座標 (単位 mm)

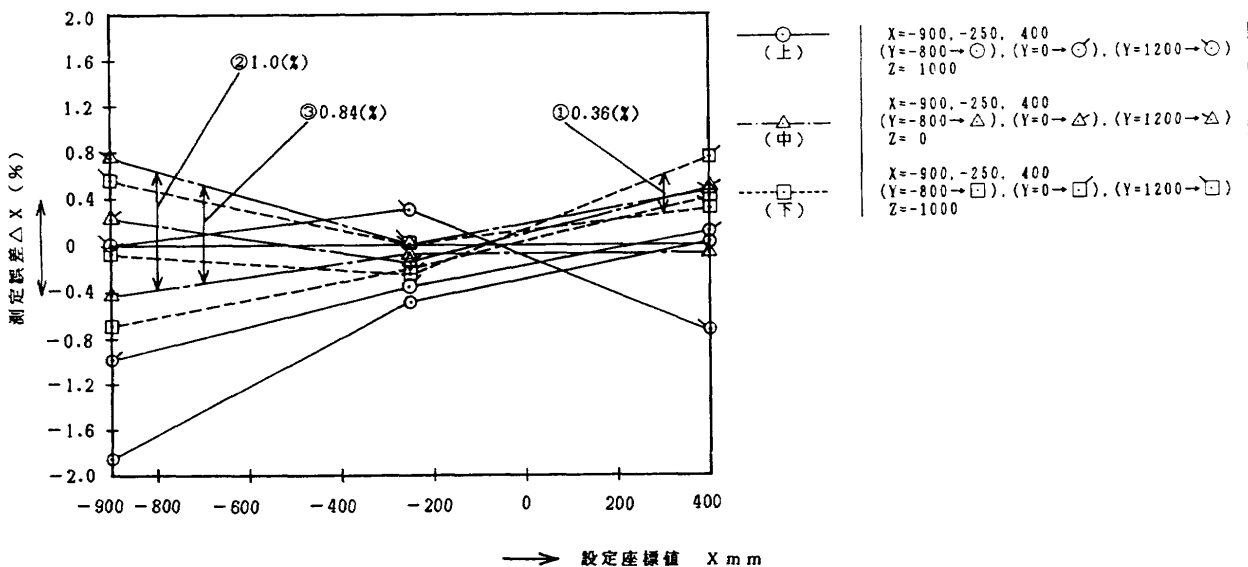


図 8  $X$  軸方向の校正精度

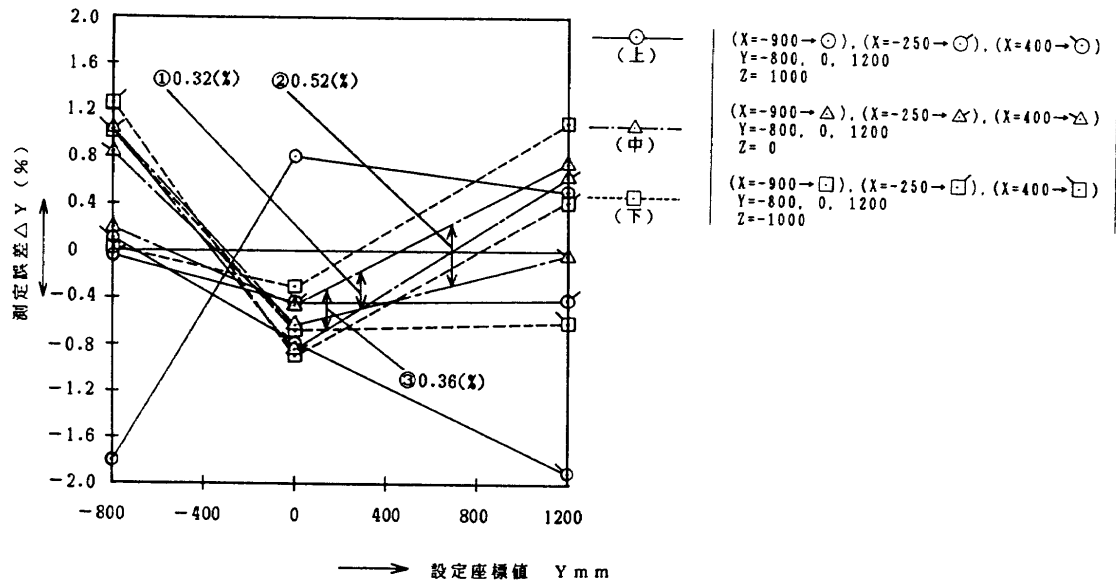


図9 Y軸方向の校正精度

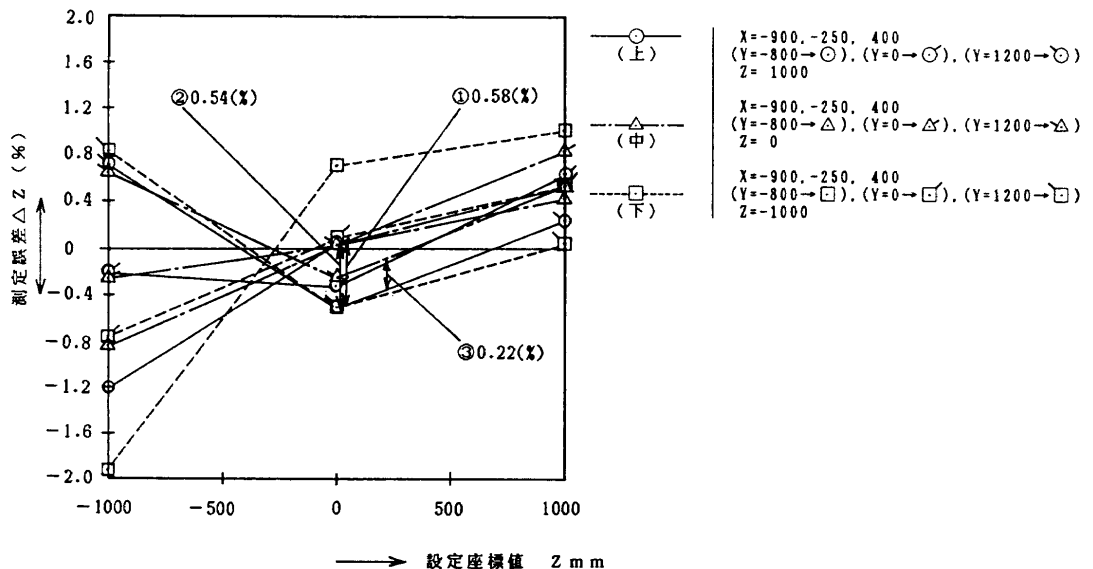


図10 Z軸方向の校正精度

定誤差は、 $(Y=-800, X=-900, Z=1000)$  の○印と、 $(Y=1200, X=400, Z=1000)$  の◇印の場合の誤差が特に大きく約2%であった。図9と図8、図10を比べてみると、全般にY軸の位置測定精度がX、Z軸のそれにくらべて悪いことがわかる。このことは、測定カメラがX、Z軸の位置測定にくらべて、Y軸の位置測定に不利な配置となり、いかえれば、奥行方向の測定精度が悪い配置になっていることを示している。

図10はZ軸方向の測定精度を示す。Z軸方向の測定誤差は、 $Z=-1000, X=400, Y=-800$  の□印の結果が約2%と大きな値となった。動的風洞試験における模型の運動範囲は、X方向は $\pm 100$  mm、Y軸方向は $\pm 500$  mm、

Z方向は $\pm 700$  mm程度であることを考慮すると、本動的風洞試験における模型位置の測定精度は総じて $\pm 1.2\%$ の範囲内にあることがわかった。

本校正法によって得られた3次元位置測定の精度は仕様精度の $\pm 0.5\%$ を満足していなかった。本装置の目的は、模型に取付けた標識の位置測定を行って、模型の基準位置を求めることにある。そこで、校正標識の位置測定結果である図8～図10の結果をもとに、模型が運動中心(風洞中心)にある時の模型に取付けられた標識の位置測定精度を推定することとする。図11は模型基準点の3次元位置測定のために、模型に設けた標識の取付け位置(模型基準点を原点とする機体座標系における標識の位置

座標)を示す。図8～図10に示された校正標識の位置測定精度の結果から、図11に示した模型標識の位置の値を求めて、模型標識の位置設定精度とすると、模型標識1の位置測定誤差は $X = 0.36\%$ 、 $Y = 0.32\%$ 、 $Z = 0.58\%$ 、模型標識2の位置測定誤差は $X = 1.0\%$ 、 $Y = 0.52\%$ 、 $Z = 0.54\%$ 、模型標識3の位置測定誤差は $X = 0.84\%$ 、 $Y = 0.36\%$ 、 $Z = 0.22\%$ となる。このように推定される模型標識の位置測定誤差(模型基準位置の測定誤差とは同じ)の値は、制御系設計の要求精度1%をほぼ満足できるものであるので、本校正試験の結果を用いて、第1次動的風洞試験の模型基準点の測定を実施した。

## 5. 方位角の測定

動的風洞試験は、風洞内で自由飛行する模型の運動解析から、空気力を同定することである。そのため運動解析に必要な模型の加速度、角速度、姿勢角を測定する必要がある。そのため模型には慣性センサ、バーチカル・ジャイロおよび磁気方位計が搭載されている。模型に搭載された慣性センサにより、模型の加速度、角速度が測定され、バーチカル・ジャイロ及び磁気方位計によって、

ピッチ、ロール及びヨーの角度が測定される。しかしながら、磁気方位計で測定される方位角( $\psi_M$ )は、ドリフトのため精度が悪い。そのため3次元位置測定装置で模型の方位角( $\psi_w$ )が測定される。方位角の測定方法は、前述した2(5)項の測定原理に基づいて行われる。ここでは3次元位置測定による方位角の測定精度について述べる。

3次元位置測定装置から算出される模型方位角( $\psi_w$ )と磁気方位センサから得られる模型方位角( $\psi_M$ )の精度確認試験は同時に行われた。図12に試験状況を示す。模型の方位角( $\psi$ )、姿勢角( $\theta$ )が設定できる傾斜台を用いて、模型の方位を $-15^\circ \sim +15^\circ$ まで $5^\circ$ 間隔で変角させ、バーチカル・ジャイロと3次元位置測定装置の併用によって得られた方位角と模型内に搭載された磁気方位センサから得られた方位角を比較し、それぞれの精度を確認した。

図13は3次元位置測定装置および磁気方位センサによる模型方位角の精度確認試験結果である。(a)図は3次元位置測定装置の測定結果で、横軸は傾斜台で設定した方位角 $\psi_i$ を、縦軸に3次元位置測定装置で測定した方位角 $\psi_w$ の値を示す。図中のシンボルは $\theta = 0^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ の場

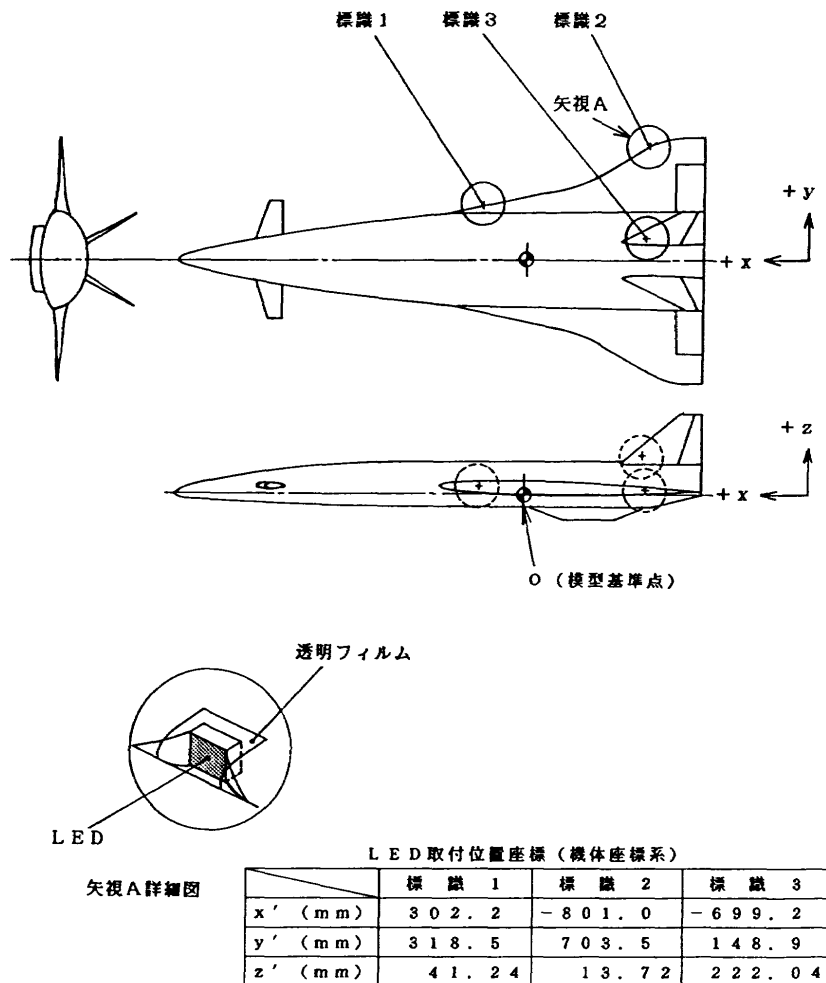


図11 模型標識(LED)の取付位置

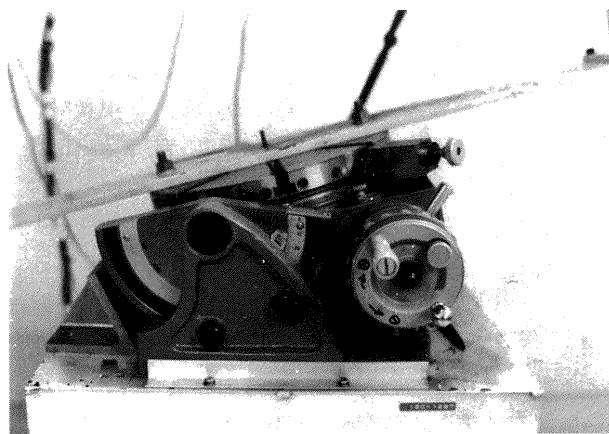
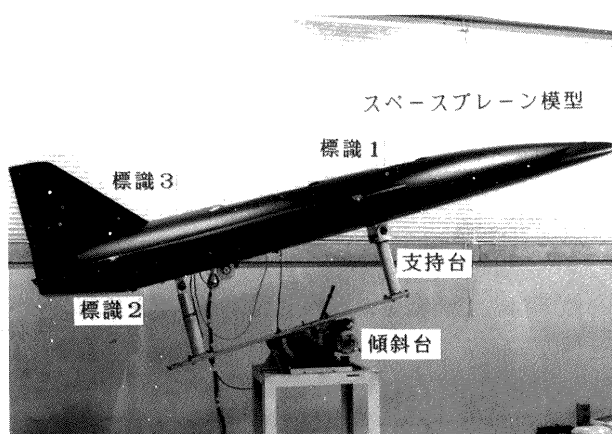
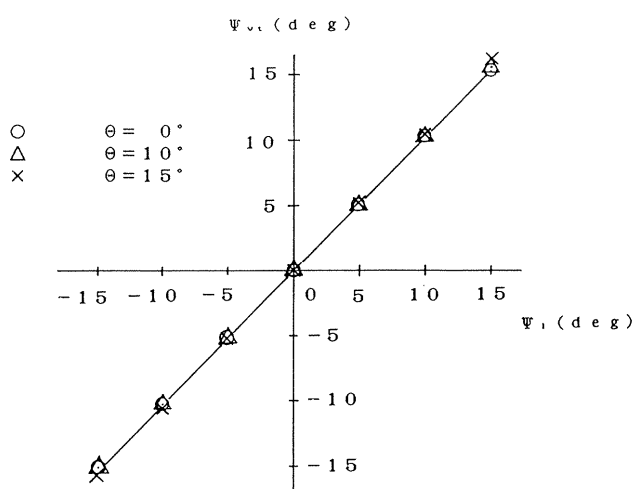
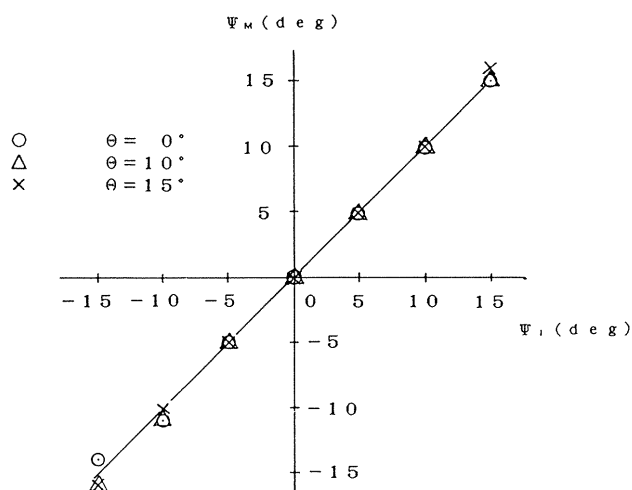


図 12 3次元位置測定装置による模型方位角の校正



(a) 3次元位置測定装置の出力特性



(b) 磁気方位センサの出力特性

図 13 模型方位角 ( $\Psi$ ) の精度

合である。姿勢角  $\theta$  にかかわらず、設定方位角に対して測定された方位角の出力特性の直線性は良好で  $\Psi_v$  のバラツキ誤差は約 0.5 度であった。

(b)図は、磁気方位計の試験結果である。横軸は(a)図と

同様に、傾斜台による設定方位角  $\Psi_i$  を、縦軸には磁気方位計で測定された方位角  $\Psi_M$  を示す。図中のシンボルは  $\theta = 0^\circ, 10^\circ, 15^\circ$  の場合である。一定の方位角で姿勢角が変わった場合の方位角に  $\pm 1^\circ$  程度のバラツキ誤差が見られる。精度確認試験の結果、3次元位置測定装置による方位角の測定精度は  $0.5^\circ$  (測定フルスケール  $30^\circ$  に対して 1.66%) 以内であった。一方、磁気方位センサによる方位角の測定精度は  $\pm 1^\circ$  である。

磁気方位センサによる方位角の測定においては、応答速度は数 Hz と遅い。また、センサと操舵面駆動用サーボモータの電源が同一系統であるため、サーボモータと磁気方位系が磁気干渉を起こし、約 0.2 Hz で不安定になる等問題があった。したがって実際の動的風洞試験における模型方位の測定は、3次元位置測定装置から得られた方位角 ( $\Psi_v$ ) から精度確認試験で求めた姿勢角のバラツキ誤差を差引いた値を用いることとした。

## 6. 風洞内動的模型の位置測定

### 6.1 測定方法

風洞内で運動する模型の基準点 (本報告では機体の想定重心位置とした) の地上座標系 (風洞座標系) における位置座標 ( $X, Y, Z$ ) は、模型に取付けられた3個の LED 標識各々の3次元位置測定結果をもとに(11)式で求めることができる。ここでは、スペースプレーン模型の風洞試験において模型に取付けられた模型標識から模型基準点の位置を求める方法について述べる。

#### (1) 模型標識

模型標識には均一な発光面 (発光面寸法 = 約 9 mm × 9 mm) をもつ赤色の LED 発光ダイオード (HLP-2655) を使用した。図 11 に示すように、模型標識 1, 2 は主翼前縁を切り欠いて LED を接着し、切り欠いた主翼前縁部分は元の形状を保つように透明フィルムを貼った。模型標識 3 は垂直尾翼外側の面と LED の発光面とが垂直面をなすよ

うに取付けた。尚、模型の3次元位置測定と模型の方位角を求める2つの目的から、模型標識は最低2個が必要であるが、本試験では模型の運動が過大になった場合でも、2個の模型標識がテレビカメラの視野から外れないように、予備の標識を1個追加し合計3個とした。

## (2) 測定方法

本動的風洞試験における模型基準点は想定されたスペースプレーン実機の重心位置とした。また、地上座標系は風洞中心に原点をおき流れ方向にx軸をもち、水平面をXY平面とする風洞座標系を用いた。

表1は、本動的風洞試験における模型基準位置測定のフローチャートを示した。本表は、校正試験から動的風洞試験までの一連の操作を示しており、以下に本表をもとに本動的風洞試験における模型基準位置測定の方法について述べる。尚、校正試験方法の詳細については、前述した4.2項に述べてあるのでここでは省略した。

動的風洞試験における模型基準位置測定方法は、校正試験（ステップ1～ステップ4）で求めたカメラパラメータを使って、ステップ5～8の一連の操作によって行われる。3次元位置測定装置で模型標識の風洞座標における位置（ $X^k, Y^k, Z^k$ ）が、カメラパラメータ、模型標識の2次元画面座標データと(6), (7)式により求まる線形連立方程式の求解により模型標識の3次元位置が求まる。次に、

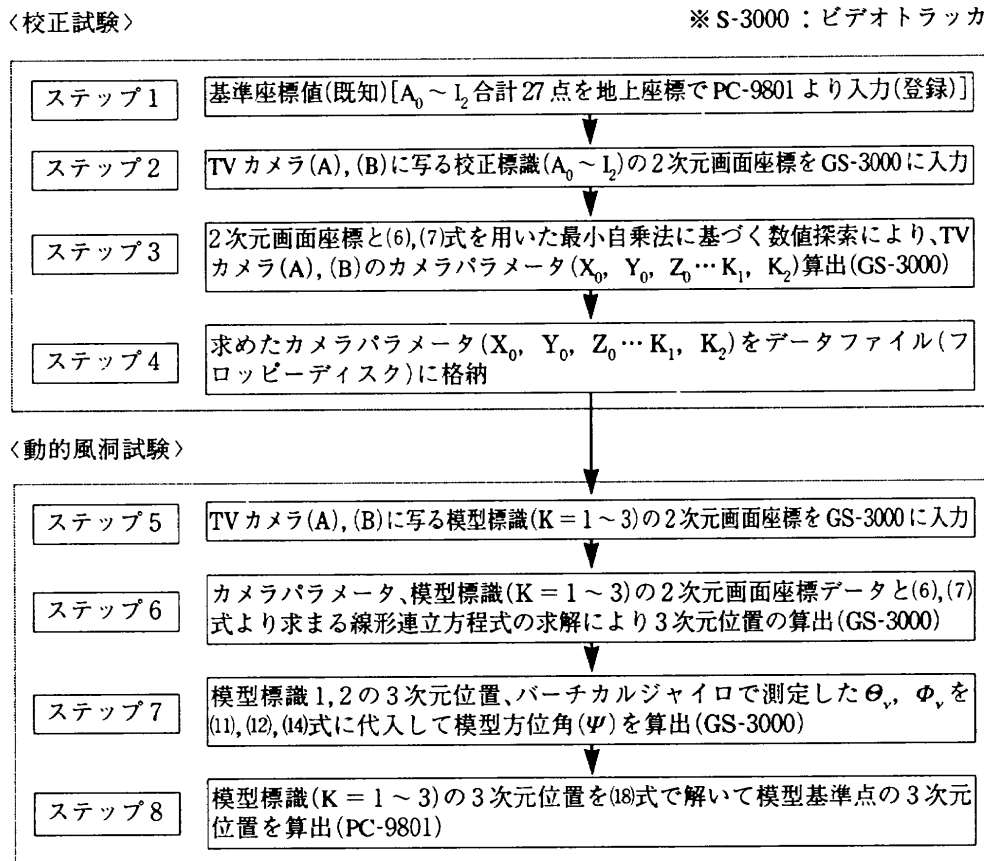
求められた2つの模型標識（ $K=1, 2$ ）の3次元位置とバーチカル・ジャイロで測定される姿勢角 $\theta_v$ 、バンク角 $\phi_v$ を(11), (12), (14)式に代入して方位角 $\psi$ が求められる。（ステップ7）。さらに、模型標識の3次元位置を(18)式で解いて、模型基準点の3次元位置が求められる（ステップ8）。図5のブロック図に示すように、3次元位置測定装置は3つの模型標識の位置を算出するもので、その後の模型のオイラー角（ $\psi$ ）、模型の基準位置を求める計算処理は、バーチカル・ジャイロと3次元位置測定装置の出力を入力して、パーソナル・コンピュータによって行われた。

## 6.2 模型基準点の位置測定精度

3次元位置測定装置によるスペースプレーン模型の基準点の位置測定精度は、3次元位置測定装置の校正精度と模型姿勢角の測定精度、模型標識の取付精度及びビデオカメラの配置による。模型標識の取付け精度は一般に高いので、ここでは、模型標識位置（標識の機体座標系における位置）は正しいものとして、動的風洞試験におけるスペースプレーン模型基準点位置の測定精度を装置の校正精度と模型姿勢角の測定精度を用いて推算する。

模型基準点の位置測定誤差を推算するにあたって、スペースプレーン模型の姿勢角を $\psi=0^\circ$ ,  $\theta=10^\circ$ ,  $\phi=0^\circ$ とした。オイラー角の測定誤差について、3次元位置測定

表1 動的風洞試験における模型基準位置測定のフローチャート



装置で求めた方位角 ( $\psi_w$ ) 誤差  $\Delta\psi$  とバーチカル・ジイロにより測定されピッチ角 ( $\theta_v$ ) 及びロール角 ( $\phi_v$ ) 誤差  $\Delta\theta$ ,  $\Delta\phi$  をそれぞれ  $0.5^\circ$  とした。推算には(11)式を展開した(19)式を使用した。(19)式で  $X^K$ ,  $Y^K$ ,  $Z^K$  は風洞 (地上) 基準点にあるので零とおく。模型基準位置誤差は(19)式で、

$$\left. \begin{aligned} X_R &= X^K - \cos(\psi + \Delta\psi) \cdot \cos(\theta + \Delta\theta) \cdot x'^K - [\cos(\psi + \Delta\psi) \cdot \sin(\theta + \Delta\theta) \cdot \sin(\phi + \Delta\phi) \\ &\quad - \sin(\psi + \Delta\psi) \cdot \cos(\phi + \Delta\phi)] \cdot y'^K - [\sin(\psi + \Delta\psi) \cdot \sin(\phi + \Delta\phi) \\ &\quad + \cos(\psi + \Delta\psi) \cdot \sin(\theta + \Delta\theta) \cdot \cos(\phi + \Delta\phi)] \cdot z'^K \\ Y_R &= Y^K - \sin(\psi + \Delta\psi) \cdot \cos(\theta + \Delta\theta) \cdot x'^K - [\cos(\psi + \Delta\psi) \cdot \cos(\phi + \Delta\phi) \\ &\quad + \sin(\psi + \Delta\psi) \cdot \sin(\theta + \Delta\theta) \cdot \sin(\phi + \Delta\phi)] \cdot y'^K - [\sin(\psi + \Delta\psi) \cdot \sin(\theta + \Delta\theta) \\ &\quad \cdot \cos(\phi + \Delta\phi) - \cos(\psi + \Delta\psi) \cdot \sin(\phi + \Delta\phi)] \cdot z'^K \\ Z_R &= Z^K + \sin(\theta + \Delta\theta) \cdot x'^K - \cos(\theta + \Delta\theta) \cdot \sin(\phi + \Delta\phi) \cdot y'^K - \cos(\theta + \Delta\theta) \cdot \cos(\phi + \Delta\phi) \cdot z'^K \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

模型基準点位置の測定精度は、標識に位置設定誤差と前述のオイラー角の測定誤差の和となって表れる。標識の位置設定誤差は4.3節で述べた値を用いて評価した。

表2は校正方法の改良前、表3は改良後の標識の位置測定精度を示す。表2, 3に示す3DVPM (3次元位置測定装置) の校正誤差は、図11に示した各模型標識の座標位置を図20の設置座置 ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) にあてはめて、この図の斜線で示した土の測定誤差 ( $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ ) の範囲を最大誤差として読み取ったものである。また、角度誤差は、前述 (6.2項) したように、 $\Delta\psi$ ,  $\Delta\theta$ ,  $\Delta\phi$  の値が模型基準位置 [浮上前の静止状態における仮の基本姿勢 ( $\psi = 0^\circ$ ,

$\theta = 10^\circ$ ,  $\phi = 0^\circ$ )] から、それぞれ  $0.5^\circ$  ずつオイラー角がずれたと仮定して求めた模型基準位置のずれ (誤差) を表わしたものであり、全体誤差は、3DVPM の校正誤差と角度誤差の和を表わしたものである。3次元位置測定装置 (3DVPM) の誤差は校正試験の結果 (%) にカメラの視野 (2500 mm) を乗じた値 (mm) である。解析の結果、姿勢角  $\theta$ ,  $\phi$ ,  $\psi$  による模型基準点の位置測定誤差に比べて標識の位置測定による模型基準点の位置測定誤差の方が1桁大きいことを示している。したがって動的風洞試験の模型の基準位置測定の精度は、主に3次元位置測定装置による模型標識の位置測定精度に依存する。即ちカメラ

表2 標識別によるスペースプレーン模型基準位置測定誤差<改良前>

軸 方向	模 型 の 標 識 1			模 型 の 標 識 2			模 型 の 標 識 3		
	3 D V P M の 校 正 誤 差 mm (max)	角度 ( $\Delta\theta = 0.5^\circ$ , $\Delta\phi = 0.5^\circ, \psi = 0.5^\circ$ ) 誤差 mm	全 体 誤 差 mm	3 D V P M の 校 正 誤 差 mm (max)	角度 ( $\Delta\theta = 0.5^\circ$ , $\Delta\phi = 0.5^\circ, \psi = 0.5^\circ$ ) 誤差 mm	全 体 誤 差 mm	3 D V P M の 校 正 誤 差 mm (max)	角度 ( $\Delta\theta = 0.5^\circ$ , $\Delta\phi = 0.5^\circ, \psi = 0.5^\circ$ ) 誤差 mm	全 体 誤 差 mm
X	29.0	7.4	36.4	57.5	17.3	74.8	49.0	12.8	61.8
Y	45.0	6.0	51.0	51.5	13.8	65.1	42.0	15.5	57.5
Z	30.5	10.8	41.3	30.0	25.8	55.8	29.0	13.9	42.9

表3 標識別によるスペースプレーン模型基準位置測定誤差<改良後>

軸 方向	模 型 の 標 識 1			模 型 の 標 識 2			模 型 の 標 識 3		
	3 D V P M の 校 正 誤 差 mm (max)	角度 ( $\Delta\theta = 0.5^\circ$ , $\Delta\phi = 0.5^\circ, \psi = 0.5^\circ$ ) 誤差 mm	全 体 誤 差 mm	3 D V P M の 校 正 誤 差 mm (max)	角度 ( $\Delta\theta = 0.5^\circ$ , $\Delta\phi = 0.5^\circ, \psi = 0.5^\circ$ ) 誤差 mm	全 体 誤 差 mm	3 D V P M の 校 正 誤 差 mm (max)	角度 ( $\Delta\theta = 0.5^\circ$ , $\Delta\phi = 0.5^\circ, \psi = 0.5^\circ$ ) 誤差 mm	全 体 誤 差 mm
X	37.5	7.4	44.9	27.0	17.3	44.3	22.0	12.8	34.8
Y	26.5	6.0	32.5	38.0	13.8	51.8	22.5	15.5	38.0
Z	10.5	10.8	21.3	10.5	25.8	36.3	9.0	13.9	22.9

パラメータを決めるための校正試験において、空間位置が既知である標識に対して、3次元位置測定装置で測定される標識の位置精度に依存する。

模型基準位置測定精度を標識別に比較すると、模型の基準位置近くにある標識から求められた模型基準位置の測定精度の方が良いことがわかる。模型基準点の位置のみを測定するならば、基準点に標識を置き模型が運動した時、2台のテレビカメラの写真画面いっぱいに標識の映像が動くようなカメラの配置で測定すれば位置測定精度を高くすることができる。しかしながら、本動的風洞試験の基準点は模型重心であり、この位置に標識を設置することが不可能である上に、模型の姿勢角の測定も必要とすることから、最低2つの標識を必要とするので、模型の基準点の位置測定においては1つの標識はできるだけ基準点に近くし、他の標識は方位角に対する感度が高くなるよう基準点から離し、しかも2台のカメラの写真画面いっぱいに2つの標識の映像が写るカメラの配置で測定を行うことが重要である。

## 7. 運動している模型の基準位置測定の結果

本章ではスペースプレーンの動的風洞試験において、本3次元位置測定装置を用いて行った模型基準位置の測定結果について述べる。

### (1) ダブレット操舵で運動する模型の基準位置測定結果

図14は、スペースプレーン模型のエレボンにダブレット信号を与えた時に運動する模型の基準点位置(X, Y, Z)の時間履歴を示したものである。横軸は時刻(秒)、縦軸は3次元位置測定装置によって測定された模型基準点の風洞軸座標系における位置を示している。エレボン操舵により、模型がZ軸方向に大きく運動していることを示している。

(a)図は、X軸(前後)方向の模型基準点の運動を示したものである。ケーブルマウント法では、前方ケーブル長が固定され、運動の自由度は小さいが、模型は前後方向(X軸方向)に最大80 mm変動しており、4 (S)あたりでは標識1と2では約38 mm程度誤差が生じている。

(b)図はY軸(左右)方向の模型基準点の運動を示したもので、Y軸方向に最大110 mmの変動が見られ、6 (S)あたりでは標識1と2では約20 mm程度の誤差が生じている。

(c)図は模型基準点のZ軸(上下)方向の運動を示したものである。Z軸方向の運動は最大約1000 mm程度の変動が見られる。また、本装置の運動追従性は、本試験の運動においては良好であることがわかる。

### (2) 3211操舵で運動する模型基準位置測定結果

図15は、スペースプレーン模型のエレボンに3211(振幅が等しく、パルス幅が3対2対1対1の割合を持った矩

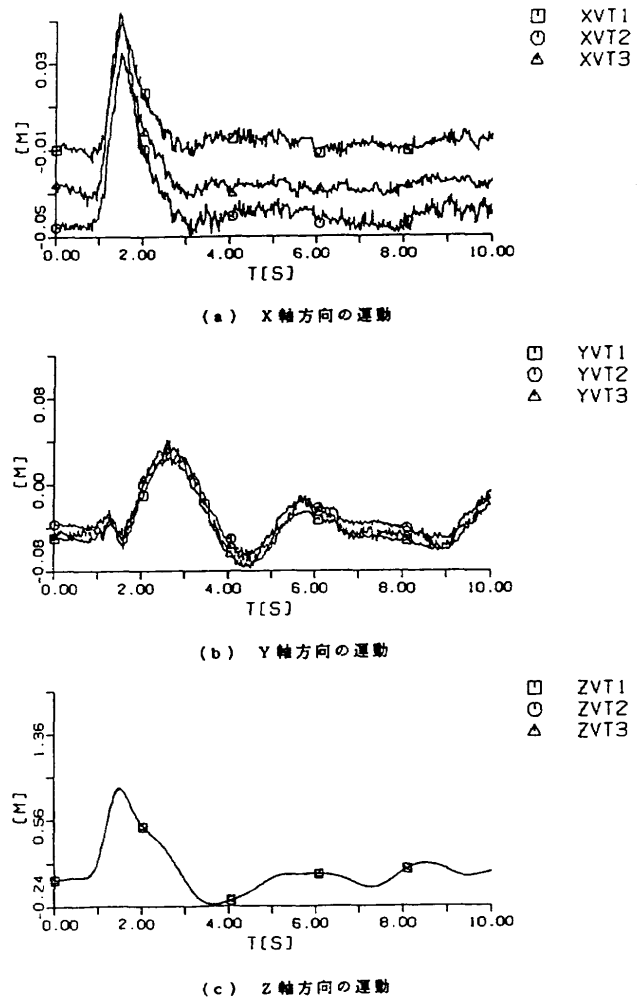


図14 ダブレット操舵による模型基準位置の変化

形波列)の操舵信号を与えた時の模型基準点の位置(X, Y, Z)の時間履歴を示す。前述のダブレット操舵時と同様に、模型標識により模型基準点の位置測定値に20～30 mmの違いが生じている。測定の追従性はダブレット操舵時と同様に比較的良好な結果を示している。

以上のように、本章で述べた結果は、校正試験における標識が旧式(光反射型80 mmφ球)のもので校正精度が低いうえに、ビデオカメラの写真画面で標識の位置を認知する制度が悪い改良前の装置を用いた結果であるので精度は悪い。

## 8. 3次元位置測定装置による運動模型の位置測定の問題点と対策

### 8.1 問題点

第1次的風洞試験(1990. 3月実施)結果より得られた風洞内運動模型の基準点位置の測定方法の問題点を以下に示す。

#### (1) 模型の位置測定における問題点

3次元位置測定装置の主な測定誤差は標識の位置即ちカ

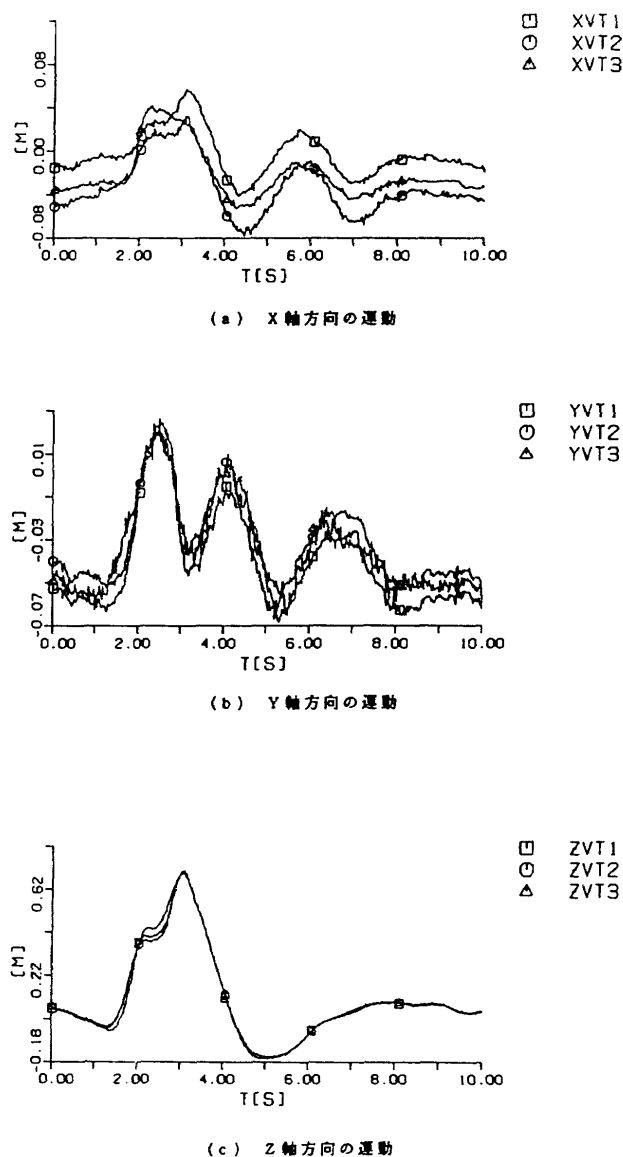


図 15 3211 操舵による模型基準位置の変化

メラの配置と校正精度による。校正標識の位置は写真画面上に写った映像の面積中心として測定されるので、写し出される映像のゆがみが校正精度を悪化させる原因の1つと考えられる。また、校正標識の像が写真画面のふちの方に位置している時は、レンズの収差による像の歪によって誤差が増大する<sup>1)</sup>。レンズの歪をできるだけ小さくするためには、歪の小さいレンズ系をもったカメラを用い、測定対象に適した焦点距離のレンズを選ぶことも重要である。本動的風洞試験では風洞測定部の窓枠の大きさと、模型標識の移動範囲を考慮して広角レンズ ( $f = 4.8 \text{ mm}$ ) が使用された。

映像がゆがみ、写真画面に写った像の中心と標識の中心が異なる場合がある。これはレンズのゆがみと光の当り方によりおこると考えられるが、ここでは、照明方法に起因する映像の歪みについて述べる。第1次動的風洞試験の校正試験で採用した校正標識は光反射型の直径 80 mm の球であり、校正標識への照明は図 16 に示すように、テレビカメラ上に設置した写真照明用ライト (500 W) によるものであった。照明用ライトがテレビカメラとはほぼ同じ高さの位置にあるので、風洞側壁の観測窓ガラスを通した校正標識への光の当たり方は、中央位置の校正標識の映像は比較的完全な明るい映像となるが、上、下の校正標識は、中央位置の校正標識よりも暗くしかもそれぞれ上方、下方の部分が暗くなり、少し欠けた映像として写真画面に写る。

このように、完全な円形を示さない映像の中心が、標識の真の中心とどの程度異なるかについて調べてみる。80 mm と 37 mm の直径の異なる2種類の校正標識について、図 17 に示す仮定で像がゆがんだ場合の像の中心の誤差を推定する。図 16 のように、カメラ上の点照明の場合

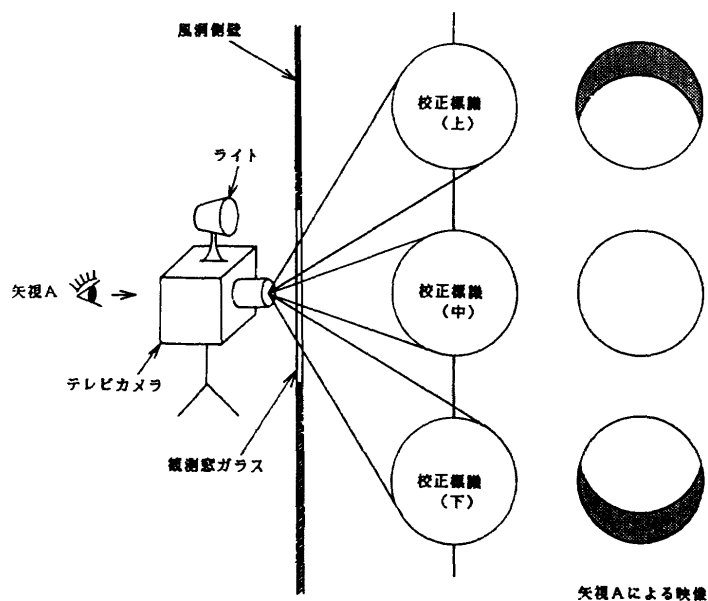


図 16 テレビカメラで捕らえられる校正標識の想定映像

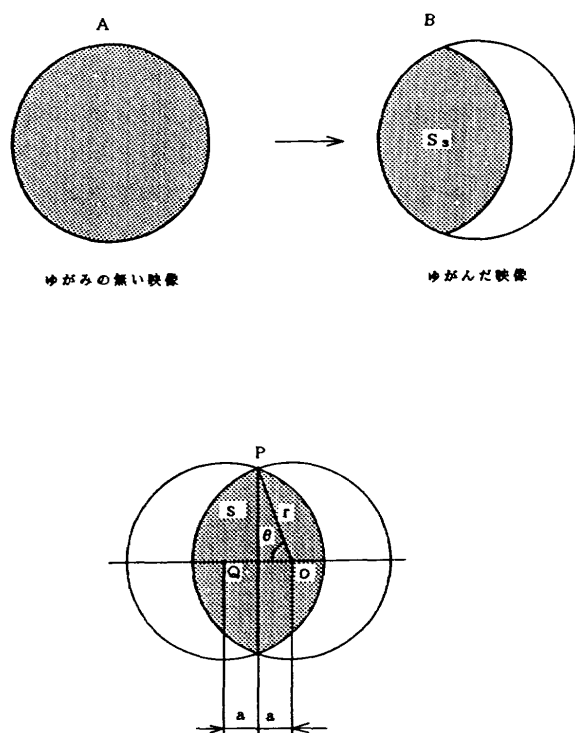


図17 映像のゆがみ

には、ほぼ正しく満月のように写るはずである。逆にカメラからかなり離れた場所からの点照明又は平行照明の場合に標識の位置によって満月の形Aから三日月の形を除いた形B（網目部分）となる。像の中心が校正標識の中心と異なった主たる理由は校正標識の指向性と、球面の様な光り方によらなかったことと思う。

図17に示すように、O点を中心とする半径rの円形状とO点から2aの距離離れた点Qを中心とする半径rの円が重なる形状をした像Bと真円像Aを比べる。ゆがんだ映像の面積をSとすると、面積Sは次式で求められる。

$$S = 4 \left( \pi r^2 \cdot \frac{\theta}{360} - \frac{1}{2} ar \cdot \sin \theta \right) \quad (20)$$

図18は2つの径の円形映像が、前述の仮定のもとにゆがんだ場合の映像面積と面積中心の関係を示したものである。横軸はゆがみなしの真円の面積とゆがんだ像の面積比を表わす面積率、縦軸は映像中心のずれを示したもので、△印が直径80mmの円（1990年3月の校正試験時に使用した標識の大きさ）、○印は直径37.5mmの円（1991年3月の校正試験時に使用した標識の大きさ）である。直径80mmの球形標識と直径37.5mmの球形標識の映像面積の中心のずれは、面積率が50%の場合で約9mmもずれることになる。このことから校正試験における標識の大きさは非常に大切で、できるだけ小さな校正標識を使用し、映像のゆがみを少なくする必要がある。

## (2) 動的風洞試験上の問題点

### (a) 標識のLED光と測定部照明の光の干渉

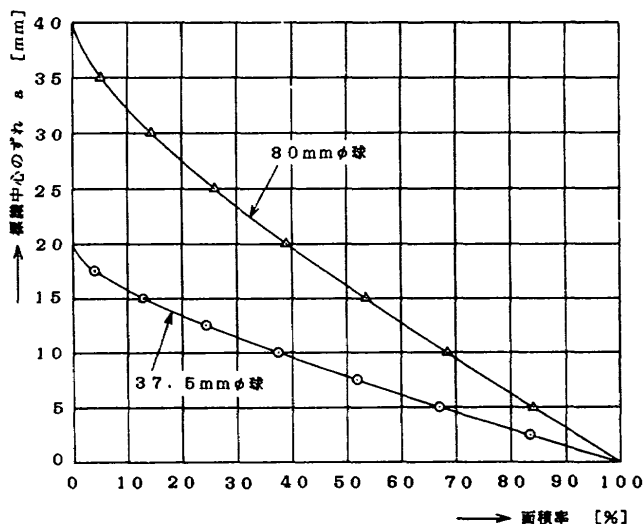


図18 標識映像面積の変化による標識中心のずれ [標識の大きさ(直径)による比較]

3次元位置測定装置を使用して風洞内で運動する模型の基準位置を計測する場合、模型に取付けられた標識のLEDの赤色光と風洞測定部の照明による光が干渉し、模型標識の識別が困難になることがあった。

(b) 3次元位置測定装置と計測制御装置とのデータ転送  
動的風洞試験では、模型を風洞内で安定して飛行させる必要がある。そのため、模型の位置を一定に保つよう、舵面の制御が行われる。模型の位置を一定に保つために、3次元位置測定装置で得られた模型の位置信号が60Hzで計測制御装置に出力されるが、当初のシステムでは出力データがホールドされていなかったため、データの取込みエラーが生じ、計測制御装置の方から位置データをとりにいってからデータ収集までに計測制御装置は入力待ちとなり、入力を得るのに最大16.7msかかった。この待ち時間は制御系には致命的となり、模型運動が速い場合には、風洞内で模型を安定に飛行させることができない。

## 8.2 対策

前節の問題点(1)、(2)項については以下の対策を講じ、運動模型の3次元位置測定の精度向上を図った。

### (1) 位置測定精度向上のための対策

模型の位置測定精度向上に関しては、校正標識とソフトウェアの改良によって対処した。

当初校正標識に、動的試験に使用した校正標識と同一のLEDを使って校正を試みた。校正試験では、校正標識回りの光ノイズをなくすため、風洞測定部内に外からの強い光が入らないように暗幕等でノイズとなるような光を遮断した後、さらに、校正標識回りの光ノイズを完全に消すように3次元位置測定装置で光調整を行ったが、LEDの光強度が弱いのでトラッキングできなかった。動的試験の光環境は、校正試験に比べ模型監視照明等によ

り良好ではないが、動的試験では、模型標識の回りに光ノイズが少しあっても、3次元位置測定装置で光強度を増してやればトラッキング可能であるため、模型標識は変えずに、校正標識のみをメーカーの納入付属品である光反射型 80 mm $\phi$  球形標識を使用し校正を行った。しかし、測定精度の結果が良くないので、図 19 に示す自作した 37.5 mm $\phi$  の自発光型の校正標識を用いて校正を行った。校正標識の製作にあたっては、試験日程及び費用の関係からなるべく簡便な方法をとったため最良とはいえない。この校正標識は、セルロイド球中に微小な電球 (5V, 60 mA) を入れて発光させ、表面にガラスビーズ (約 0.1 mm 球) を塗付することによって、光を散乱させ、球形全体が均一な明るさになるようにした。これによって、3次元位置測定装置のテレビカメラが捉える校正標識の映像はゆがみの少ないものとなった。さらに、校正標識の写真画面上での分解能を高めるために、当初の最小認識ドット数 6 ドットから 1 ドットで認識できるようにソフトウェアを改良した。

## (2) 動的風洞試験上の対策

### (a) 標識の LED 光と測定部照明の光の干渉対策

3次元位置測定装置を使用する場合、光ノイズを極力小さくし、正確に標識を認識させる必要がある。風洞試験では、模型運動の安全監視も重要であるので最小限の測定部の照明が必要である。当初設置した照明用の蛍光灯は、蛍光管が露出しており、直接光のため赤色成分の光も多く含まれ、しかも模型に取付けられた標識の周りでハレーションを起こし、光ノイズの原因となった。この原因を除去するため、測定部照明には蛍光管の前に乳白

色のアクリル板を付け、赤色成分の光を少なくし、間接光にしてハレーションを防止した。さらに、テレビカメラのレンズには赤色光のみを通過させるフィルター (R-60) を取付け、カメラによる認識精度を高くした。635 nm 近傍に最強波長を持つ赤色の LED 模型標識に合せた本フィルターを使用することによって、光ノイズを減少させることができた。

### (b) データ転送法の改良

当初行った動的風洞試験では、3次元位置測定装置のデータ処理部にバッファ装置が装備されていなかった。そのため、動的風洞試験計制御装置と、3次元位置測定装置との模型位置データの受渡しには、長い時間を必要とした。そこで、図 5 の 3次元位置測定装置のデータ通信部にバッファ装置と高速 GP-IB ボードを装備した。その結果バッファのデータは 3 ms で更新され、3次元位置測定装置から計測制御装置へのデータの転送は 3 ms で行えるように改良された。しかし、3次元位置測定装置の標識位置の測定は 60 Hz で行われているので、バッファによりデータ転送時間は短縮されたが、いぜんとして位置測定の速さは変化していない。

## 9. 3次元位置測定装置改良の結果

### 9.1 校正試験法改良の結果

図 20 は、改良した校正方法で行った模型基準点の 3次元位置 (X, Y, Z) 測定精度である。図には改良前の結果も同時に示されている。(a) 図に示されるように、校正法の改良によって X 軸方向位置測定精度のバラツキは全

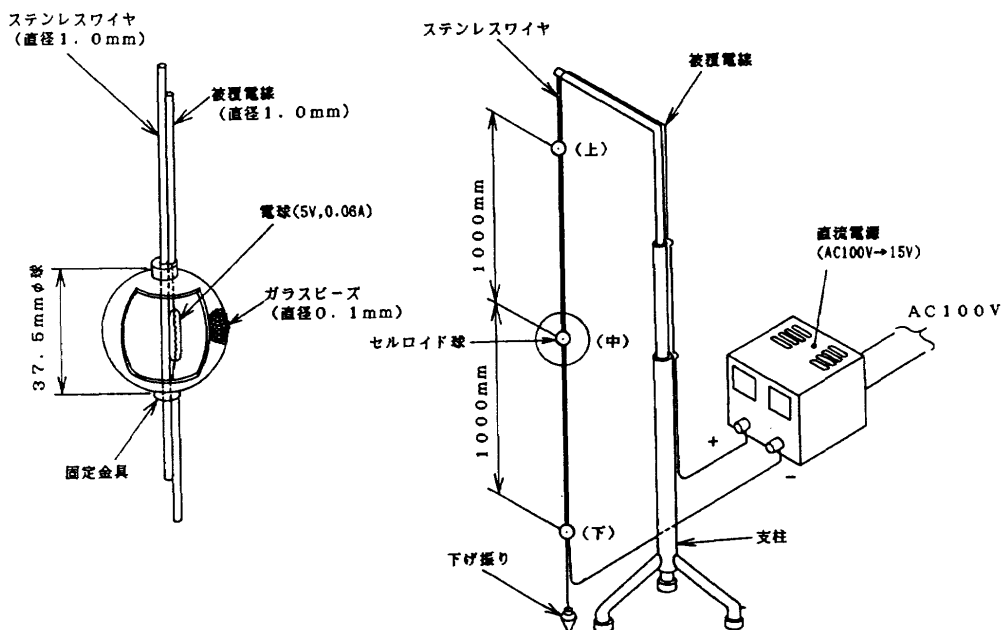


図 19 発光型 37.5 mm $\phi$  球正標識 (改良後)

体的に小さくなった。特に、 $X = -900 \text{ mm}$  の位置においては、改良の効果が大きい。(b)図に示されるように、 $Y$  軸方向の位置測定精度においては、 $Y = -800 \text{ mm} \sim +1200 \text{ mm}$  の全範囲にわたって誤差が小さくなり、その値は、 $+1.1\% \sim -1.3\%$  であった。(c)図に示されるように、 $Z$  軸方向の位置測定精度においても誤差は全体的に小さく

なった。特に  $Z = -1000 \text{ mm}$  の点においては、誤差が  $-0.7 \sim +1.0\%$  と改良前よりも大幅な改善が見られた。また、全軸方向の測定精度の分布を見ると、 $X, Y, Z$  軸それぞれの最小誤差を示す位置が負側にある。これは2台のテレビカメラの光軸が測定部中心より負側の方にあることを示している。このことから、位置測定の精度を

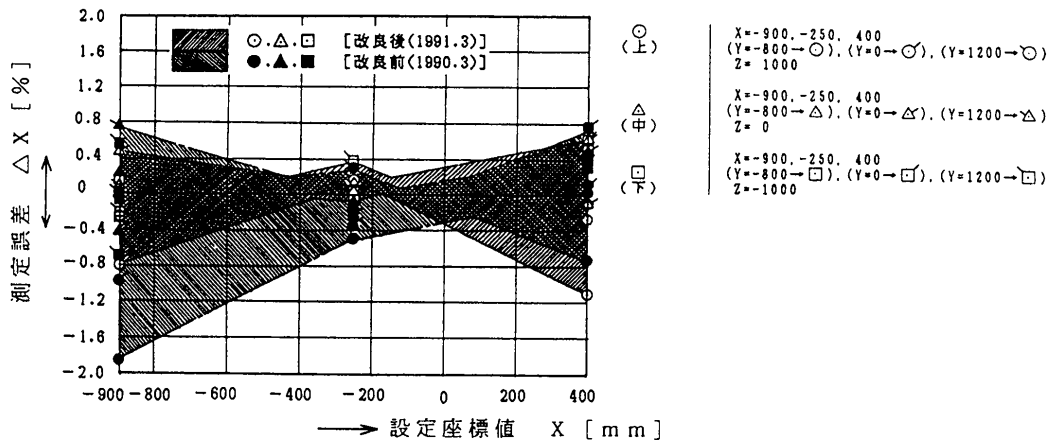


図20(a) X軸方向の測定精度

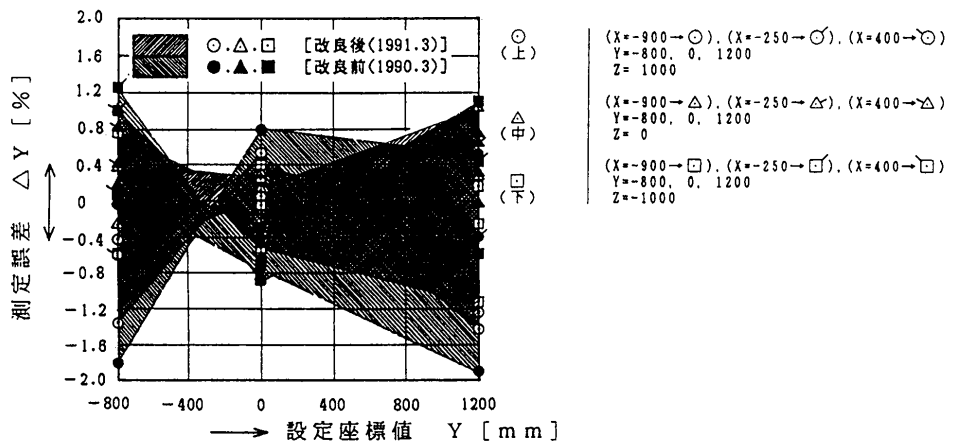


図20(b) Y軸方向の測定精度

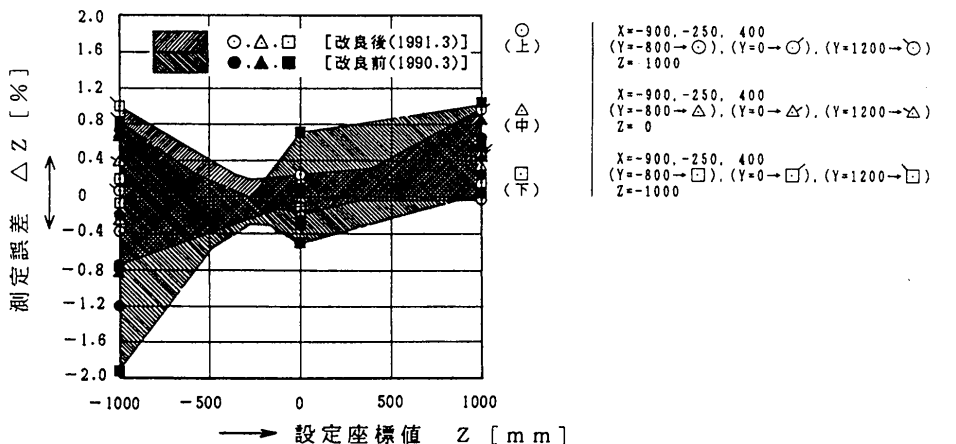


図20(c) Z軸方向の測定精度

図20 3次元位置測定装置の校正試験結果(測定精度)

上げるためには、カメラの配置と向きが重要であることがわかる。

## 9.2 装置改良後の模型基準位置の測定結果

図 21 は、校正方法及びノイズ対策等装置改良後の位置測定結果を示す。図はダブレット信号で模型のエレベータおよびラダーを操舵し、ケーブルで支持された模型基準位置の変化を示したものである。図の実線（標識 1 のデータ）、点線（標識 2 のデータ）及び細点線（標識 3 のデータ）は 3 つの標識から得られた模型基準位置の変化である。横軸に時間、縦軸に位置を示す。

(a) 図はエレベータ操舵、(b) 図はラダー操舵による模型基準位置の時間変化である。図 14 に示された改良前では高い周波数がのっているのに対して、改良後では滑らかになっている。これは、ノイズ対策及び姿勢角測定精度の向上によるものと考えられる。(a) 図及び(b) 図で示された模型基準点の 3 次元位置の測定精度は、X 座標に関して、改良後において各標識間（1 と 2）で約 20 mm の違いが生じており、改良前に比べて約 18 mm の改良が見られる。これは、X 軸方向に関する標識 1 と 2 の距離（804 mm）が Y 軸方向（385 mm）及び Z 軸方向（28 mm）の距離に比べて大きいため、校正精度の影響が大きく出ているものと思われる。また、Y 座標の各標識間（1 と 2）の測定

精度に違いが見られないのは X 軸方向とは反対に、Y および Z 軸方向の標識間（1 と 2）の距離が小さいため、校正精度による影響（レンズ歪、オイラー角測定誤差）が小さいので、Y 及び Z 座標に関しての測定精度に大きく影響しないものと思われる。

## 10. まとめ

ケーブルマウント・システムによってスペースプレーン模型の動安定微係数を求めるための動的風洞試験に必要な運動模型の位置測定のために、テレビカメラを用いた 3 次元位置測定装置を適用した。第 1 次風試で使用して問題となった位置測定精度を向上させるために、ハードウェア、ソフトウェア及び校正試験法に改良を施した。結果は、位置測定の精度が向上し、動的風洞試験の模型位置の測定に使用できるものとなった。本研究によって得られた成果は以下のようにまとめることができる。

### (1) 校正標識の改善

校正試験に使用する標識及び模型に取付ける標識を改良することにより、模型の位置測定誤差を改良前の最大誤差 2 % の半分 1 % 程度に減少させることができた。

### (2) 光ノイズのカット

標識の LED 光と風洞照明の干渉によって生じる標識位置の認識精度の悪化を防止するためにフィルターの装着、アクリル板を通した風洞照明の採用により、光ノイズが少ない標識のトラッキングを可能にし、動的風洞試験中に模型位置の測定が不可能になることを避けることができた。

### (3) 方位角測定の有効性

バーチカル・ジャイロからの姿勢角 ( $\theta$ ,  $\phi$ ) データと、3 次元位置測定装置によって測定された模型標識位置データから、模型の方位角を求める方法を示した。求められた方位角の測定誤差は  $0.5^\circ$  以内であり、磁気方位センサから得られる方位角が模型の姿勢角によってオフセットするのに対して、本方法による方位角の測定は、姿勢角によるオフセット量が小さく、測定精度もバーチカル・ジャイロと同程度の  $0.5^\circ$  以内であり、動的試験に使用しうる精度であることが確認できた。

### (4) 模型基準位置の測定

動的風洞試験において 3 次元位置測定装置を使って模型基準位置測定を行い、位置測定の精度を確認し、ケーブルマウント方式の動的風洞試験において模型の位置制御に有効であることを確認することができた。

尚、本研究を進めるにあたり、制御部制御研究室の永安室長ならびに同研究室の佐々主任研究官には多大な御指導、御援助を戴いた。ここに厚く感謝の意を表します。

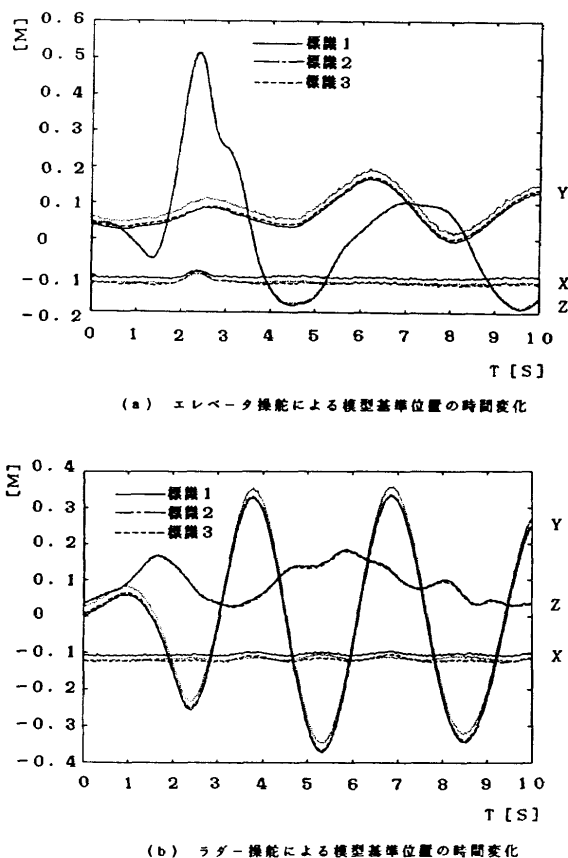


図 21 ダブレット操舵による模型基準位置の運動

# 参考文献

- 1) 永安正彦他；ケーブルマウントによるスペースプレーン模型の動的風洞試験，第28回飛行機シンポジウム前刷り，1990
- 2) S. Suzuki. etc：Dynamic Wind-Tunnel Test of a Cable-Mounted Spaceplane Model, International Conference on

Experimental Fluid Mechanics.1991. June

- 3) 柳原正明他；ケーブル支持動的風洞試験のための模型制御系設計，航技研報告 TR-1161, 1992
- 4) 佐々修一他；微分型センサ導入による運動推定精度の向上，航技研報告 TR-1135, 1991
- 5) 日本写真測量学会；写真による三次元位置測定－応用写真測量－，1983

---

## 航空宇宙技術研究所資料681号

平成7年4月発行

発行所 航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1  
電話三鷹(0422)47-5911(大代表)㊦182  
印刷所 株式会社 東京プレス  
東京都板橋区桜川2-27-12

---