

FHI 低速風洞における 3次元位置及び、 姿勢角計測方法について (DLT法)

迫 和彦 (富士重工業株式会社)
大栗 孝之 (富士重工業株式会社)

Measurement Technique for the Three-Dimensional Location and Attitude Angle in the FHI Low-Speed Wind Tunnel (DLT Method)

Kazuhiko Sako (FHI)
Takayuki Ooguri (FHI)

概 要

無人機や母機の搭載物(燃料タンク等)の投下・投棄風洞試験等の動的風洞試験は長年に渡り実施されてきているが、近年では無人機の必要性・重要性が高まり、計測の精度やデータの生産効率の向上が求められている。

近年のデジタル技術発達を背景に、デジタルカメラと、画像からの座標読取りソフトを用いることにより、写真の現像・焼付け時間及び、写真(焼付けられた写真)からの読取り作業を大幅に減らし、データの生産効率向上を図ることを目的とし、また、読取った数値データからDLT法(Direct Linear Transformation technique)を行うことで、運動軌跡の座標値と姿勢角の精度を向上させ、解析時間の短縮を図ることが出来た。

以下にDLT法の概略と、弊社における計測システム及び、その精度を示す。

1. はじめに

FHIでは、投下・投棄風洞試験における軌跡の計測には、ストロボスコープの発光に合せた写真撮影を行い、写真(焼付けられた写真)の画像をスケールをあてて読み取ることで運動解析を行っていた。しかし、高精度でかつ、詳細なデータの要求から試験ケースは増大し、写真(焼付けられた写真)からの軌跡・姿勢角の読取り作業には膨大な時間と労力を必要としていた。この作業手法に対し精度と効率向上を図るために用いたDLT法(Direct Linear Transformation technique)について原理と、方法を説明する。

3次元座標を複数のカメラ画像から計算する場合によく使用する方法で、近年では、スポーツ運動解析の分野で最もよく行われている方法である。

○2方向からの撮影画像への適用

カメラは物理座標系上の点Oを、投影中心Nと成す線ONと画像平面の交点Iで撮影する。各点の座標系及び座標を図1-1に示す。ここでN,I,Oは一直線上にある。これを共線条件と呼ぶ。

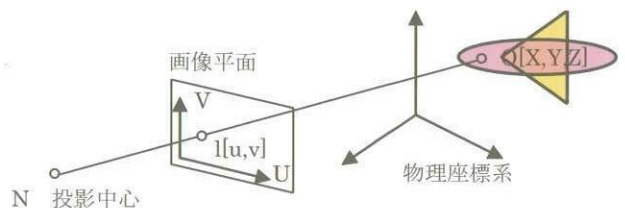


図1-1 座標系の定義

ここでカメラの投影中心Nは、物理座標系での座標に位置するとする。点NからOへのベクトルAとなる。

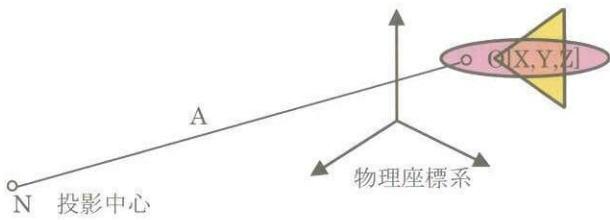


図 1-2 ベクトル A

また W 軸を画像平面に追加し、3次元直交座標系である画像座標系を定義する。画像平面上の点の W 座標は 0 となる。また投影中心 N から W 軸に平行に伸ばした直線と画像平面の交点を P 点とし、N と P 間の距離を d とし、P 点の画像座標系での座標値を $[u_0, v_0, 0]$ とすると、N の画像座標系での座標値は $[u_0, v_0, d]$ となる。また、N から l へのベクトル B は $[u-u_0, v-v_0, -d]$ となる。

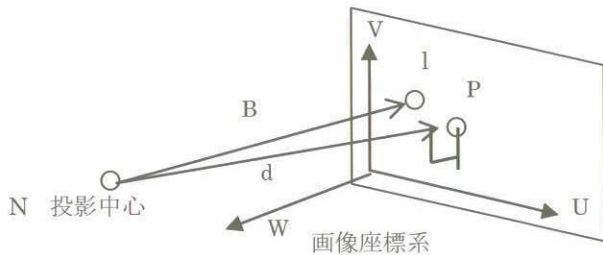


図 1-3 画像座標系

O、l、N は直線上にあるので、ベクトル A とベクトル B は 1本の直線である。共線条件は単純に式 (1-1) で表される。

$$B = cA \tag{1-1}$$

但し図 1-2 よりベクトル A は物理座標系で定義

$$T_{1/0} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

され、図 1-3 よりベクトル B は画像座標系で定義されている。両者を同一の座標系で演算するために、ベクトル A を画像座標系に変換する回転変換行列 $T_{1/0}$ を導入する。

$$A^{(1)} = T_{1/0} \cdot A^{(0)} \tag{1-2}$$

ここで $A^{(1)}$ は画像座標系で定義されたベクトル A で、 $A^{(0)}$ は物理座標系で定義されたベクトル A である。

式 (1-2) を式 (1-1) に代入し、

$$\begin{bmatrix} u-u_0 \\ v-v_0 \\ -d \end{bmatrix} = c \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X-X_0 \\ Y-Y_0 \\ Z-Z_0 \end{bmatrix}$$

$$\tag{1-3}$$

式 (1-3) を展開すると

$$\begin{aligned} u-u_0 &= c[r_{11}(X-X_0)+r_{12}(Y-Y_0)+r_{13}(Z-Z_0)] \\ v-v_0 &= c[r_{21}(X-X_0)+r_{22}(Y-Y_0)+r_{23}(Z-Z_0)] \\ -d &= c[r_{31}(X-X_0)+r_{32}(Y-Y_0)+r_{33}(Z-Z_0)] \end{aligned}$$

$$\tag{1-4}$$

定数をまとめて X, Y, Z, u, v について整理すると、

$$u = \frac{A_1 X + A_2 Y + A_3 Z + A_4}{C_1 X + C_2 Y + C_3 Z + 1}$$

$$\tag{1-5}$$

$$v = \frac{B_1 X + B_2 Y + B_3 Z + B_4}{C_1 X + C_2 Y + C_3 Z + 1}$$

$$\tag{1-6}$$

となる。

ここで $A_1 \sim C_3$ の定数をカメラ定数と呼ぶ。この定数について解くと、

$$A_1 X + A_2 Y + A_3 Z + A_4 - C_1 X u - C_2 Y u - C_3 Z u = u \tag{1-7}$$

$$B_1 X + B_2 Y + B_3 Z + B_4 - C_1 X v - C_2 Y v - C_3 Z v = v \tag{1-8}$$

- 右辺の u, v : 写真からの読み取り値
- 左辺の X, Y, Z : 既知の座標値

この2つの式に6つ以上のコントロールポイントの3次元座標 (X, Y, Z) 及び画像平面上の (u, v) を代入し連立方程式を解くと、定数 $A_1 \sim C_3$ が求まる。すると式 (1-7)、式 (1-8) は変数が X, Y, Z, u, v の方程式となり2つの2次元座標よりひとつの3次元座標を求めることができる。

• コントロールポイント：座標が既知の定点を示す。

○実際の2枚の画像より対象物の3次元座標を算出する手順を説明する。図 1-4 の概略図に示すように、対象物の3次元座標を (X, Y, Z) とし、コントロールポイントの3次元座標を (cpX_n, cpY_n, cpZ_n) とする。画像1の対象物像1の2次元座標を (U₁, V₁)、コントロールポイント像1の2次元座標を (cp1U_n, cp1V_n) とする。画像2も同様に対象物像2の2次元座標を (U₂, V₂)、コントロールポイント像

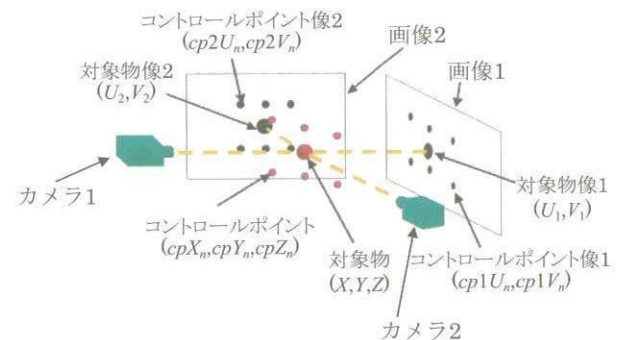


図 1-4 概略図

2の2次元座標を (cp2U_n,cp2V_n) とする。

(n はコントロールポイント番号)

画像1に対応するカメラ定数 (A₁₁ ~ C₁₃) を求める。式

$$\begin{bmatrix}
 cpX_1 & cpY_1 & cpZ_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -cpX_1cp1U_1 & -cpY_1cp1U_1 & -cpZ_1cp1U_1 \\
 cpX_2 & cpY_2 & cpZ_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -cpX_2cp1U_2 & -cpY_2cp1U_2 & -cpZ_2cp1U_2 \\
 cpX_3 & cpY_3 & cpZ_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -cpX_3cp1U_3 & -cpY_3cp1U_3 & -cpZ_3cp1U_3 \\
 cpX_4 & cpY_4 & cpZ_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -cpX_4cp1U_4 & -cpY_4cp1U_4 & -cpZ_4cp1U_4 \\
 cpX_5 & cpY_5 & cpZ_5 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -cpX_5cp1U_5 & -cpY_5cp1U_5 & -cpZ_5cp1U_5 \\
 cpX_6 & cpY_6 & cpZ_6 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -cpX_6cp1U_6 & -cpY_6cp1U_6 & -cpZ_6cp1U_6 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & cpX_1 & cpY_1 & cpZ_1 & 1 & -cpX_1cp1V_1 & -cpY_1cp1V_1 & -cpZ_1cp1V_1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & cpX_2 & cpY_2 & cpZ_2 & 1 & -cpX_2cp1V_2 & -cpY_2cp1V_2 & -cpZ_2cp1V_2 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & cpX_3 & cpY_3 & cpZ_3 & 1 & -cpX_3cp1V_3 & -cpY_3cp1V_3 & -cpZ_3cp1V_3 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & cpX_4 & cpY_4 & cpZ_4 & 1 & -cpX_4cp1V_4 & -cpY_4cp1V_4 & -cpZ_4cp1V_4 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & cpX_5 & cpY_5 & cpZ_5 & 1 & -cpX_5cp1V_5 & -cpY_5cp1V_5 & -cpZ_5cp1V_5 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & cpX_6 & cpY_6 & cpZ_6 & 1 & -cpX_6cp1V_6 & -cpY_6cp1V_6 & -cpZ_6cp1V_6
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 A_{11} \\
 A_{12} \\
 A_{13} \\
 A_{14} \\
 B_{11} \\
 B_{12} \\
 B_{13} \\
 B_{14} \\
 C_{11} \\
 C_{12} \\
 C_{13}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 cp1U_1 \\
 cp1U_2 \\
 cp1U_3 \\
 cp1U_4 \\
 cp1U_5 \\
 cp1U_6 \\
 cp1V_1 \\
 cp1V_2 \\
 cp1V_3 \\
 cp1V_4 \\
 cp1V_5 \\
 cp1V_6
 \end{bmatrix}$$

式 (1-9)

となり、これを解くと画像1に対応するカメラ定数 (A₁₁ ~ C₁₃) が求まる。

同様に画像2に対応するカメラ定数 (A₂₁ ~ C₂₃) も6個のコントロールポイントの3次元座標値 (cpX_n, cpY_n, cpZ_n)、コントロールポイント像2の2次元座標 (cp2U_n, cp2V_n) を式 (1-7)、式 (1-8) に代入することによって求めることができる。

次に対象物の3次元座標 (X,Y,Z) を求める。画像1に対応するカメラ定数 A₁₁ ~ C₁₃、画像2に対応するカメラ定数 A₂₁ ~ C₂₃ を用いて、それぞれの画像の対象物像の2次元座標 (U₁,V₁)、(U₂,V₂) から、対象物の3次元座標を求める。式 (1-7)、式 (1-8) を X,Y,Z についてまとめ、行列式にしてそれらを代入すると、

$$\begin{bmatrix}
 A_{11}-C_{11}U_1 & A_{12}-C_{12}U_1 & A_{13}-C_{13}U_1 \\
 B_{11}-C_{11}V_1 & B_{12}-C_{12}V_1 & B_{13}-C_{13}V_1 \\
 A_{21}-C_{21}U_2 & A_{22}-C_{22}U_2 & A_{23}-C_{23}U_2 \\
 B_{21}-C_{21}V_2 & B_{22}-C_{22}V_2 & B_{23}-C_{23}V_2
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 X \\
 Y \\
 Z
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 U_1-A_{14} \\
 V_1-B_{14} \\
 U_2-A_{24} \\
 V_2-B_{24}
 \end{bmatrix}$$

式 (2-10)

となり、これを解くことによって対象物の3次元座標 (X,Y,Z) が求まる。

2. システム/手順

計測システムは図2-1に示すようにカメラ1~4の4台を使用する。隣り合うカメラ同士で一つのカメラ組を成す。カメラ組を成す2つのカメラで、同一の計測点が画像に写っていれば DLT 法を使用し計測点の3次元座標 (X,Y,Z) を算出することができる。

X 軸、Y 軸、Z 軸はカメラの較正治具により定義される。カメラ組①~③は共通の較正治具を使用して較正を行う

(1-7)、式 (1-8) に6つのコントロールポイントの3次元座標 (cpX_n,cpY_n,cpZ_n)、コントロールポイント像1の2次元座標 (cp1U_n,cp1V_n) を代入し行列式に直すと、

為、計測できた点は同一の座標系の座標値である。そのためカメラ組①~③で3次元座標を算出できた計測点が合計3点以上あれば投下模型重心位置、姿勢角 (ψ、θ、φ) を算出することができる。

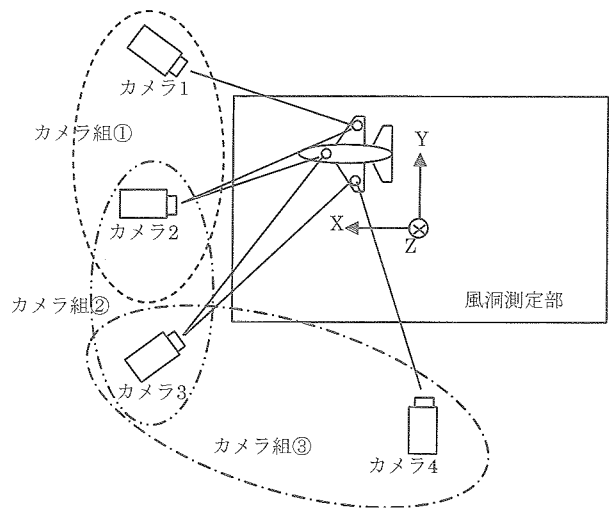


図2-1 投下軌跡計測システム

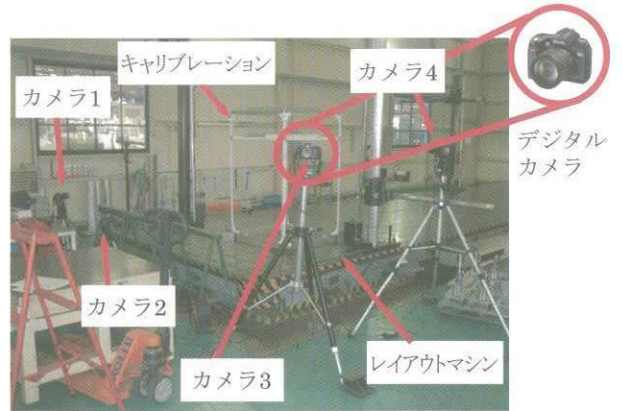
○計測システム確認予備試験 (試験方法)

- ①実際の風洞試験と同等の位置に4台のカメラを配置し、キャリブレーション治具に貼付したマーキングを撮影・読取りを行い、カメラ定数を算出する。(デジタルカメラデータをPCに転送し、ソフト上で読取りを行い、データをエクセルファイルに記録する) (図2-2 ~ 図2-4)
- ②4台のカメラにより模型及び、貼付したマーキングを撮影し、マーキング中央点を読み取る。(デジタルカメラデータをPCに転送し、ソフト上で読取りを行い、データをエクセルファイルに記録する) (図2-5-1 ~ 2-5-4、図2-6)

③模型マーキングの読取り値とカメラ定数から模型マーキングの3次元座標を算出し、実測値と比較する。模型マーキング及び、キャリブレーション治具のマーキング位置の座標計測値は、レイアウトマシン計測器（大型常盤）により行った。計測精度=±0.5mm

○仕様器材

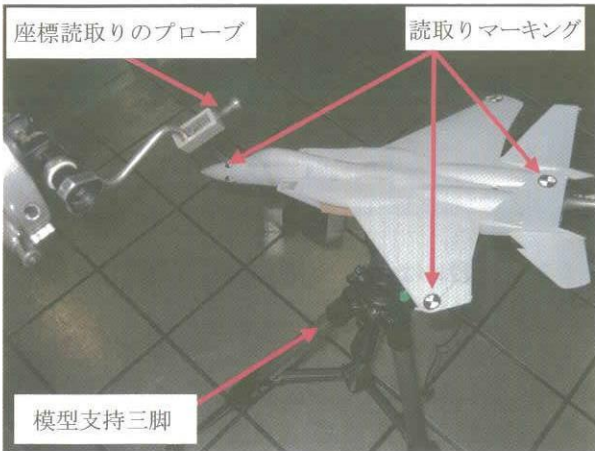
- ①供試体
- ②キャリブレーション治具
- ③カメラ
- ④位置計測装置（レイアウトマシン）



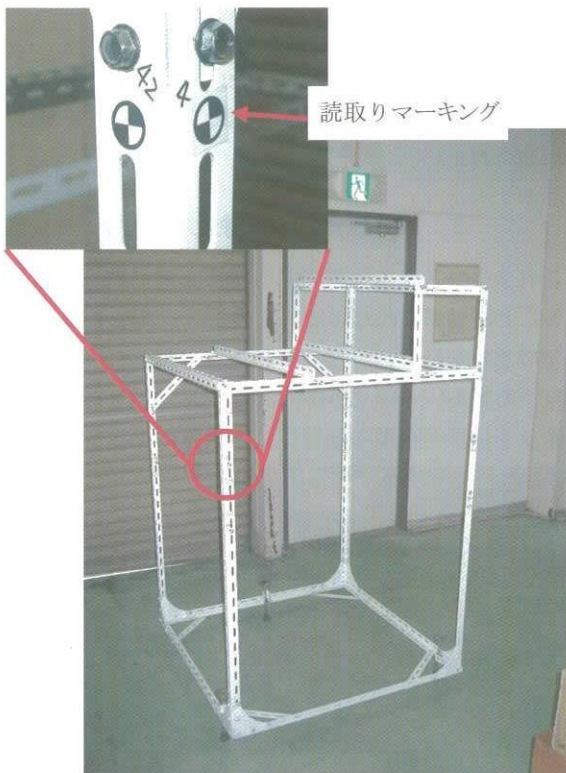
③カメラとキャリブレーション状況 図2-4
④計測装置（レイアウトマシン）

- ①にマーキングを貼付した模型及び、模型の支持三脚と、レイアウトマシンの計測プローブ
- ②に同様にマーキングを貼付したキャリブレーション治具
- ③④にシステム状況を示す。

このとき、カメラ1～4で撮影した影像を次に示す。



①供試体(市販プラモデル) 図2-2



②キャリブレーション治具と読取マーキング 図2-3



ここで、計測点（マーキング）の解像度を見てみると、マーキングの直径14mm（23画素）であるので、1画素の分解能は約0.6mmとなる。マーキング中心は約3画素×3画素で読取れるので、マーキングの検出位置は約2mm程度の誤差があり、模型のスパン250mmであるので、

$$\sin(2/250) = 0.46 \text{ (deg)}$$

程度の誤差があると考えられる。

○設定値と計測値の比較

ここまでで示した計測システムで、三脚に取付けた供試体の姿勢角・位置を10回程変更し、カメラ撮影を行いDLT法により算出した【算出値】と、レイアウトマシンの計測プロープにより計測した【実測値】を比較した。

その結果を表2-1及び、図2-7、図2-8に示す。

CASE	重心位置(計算値)			重心位置(実測値)			誤差値		
	X	Y	Z	X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ
1	-487.44	515.93	-1171.66	-488.38	516.12	-1171.2	0.93	-0.19	-0.45
2	-519.36	508.50	-965.65	-519.60	508.84	-965.9	0.24	-0.33	0.29
3	-795.95	776.84	-719.04	-796.94	777.29	-719.5	0.99	-0.45	0.55
4	-217.72	203.75	-727.94	-216.81	205.01	-727.7	-0.90	-1.26	-0.21
5	-860.57	754.34	-514.89	-861.22	754.71	-514.4	0.65	-0.36	-0.44
6	-403.84	576.36	-583.60	-403.00	578.01	-583.58	-0.84	-1.65	-0.02
誤差量絶対値の平均値							ΔX	ΔY	ΔZ
							0.76	0.71	0.32
CASE	角度(計算値)			角度(実測値)			誤差値		
	θ	φ	ψ	θ	φ	ψ	Δθ	Δφ	Δψ
1	0.49	0.20	-0.95	0.62	0.14	-0.50	-0.13	0.06	-0.39
2	26.14	0.65	-0.50	26.38	0.05	-0.4	-0.24	0.61	-0.10
3	26.98	1.46	24.98	26.96	0.13	24.9	0.02	1.33	0.04
4	27.21	16.31	-19.56	27.23	16.75	-19.5	-0.02	-0.44	0.03
5	-19.00	5.39	7.34	-18.82	4.59	7.6	-0.17	0.80	-0.31
6	-18.76	5.65	-21.91	-18.76	4.42	-22.02	0.00	1.24	0.13
誤差量絶対値の平均値							Δθ	Δφ	Δψ
							0.10	0.75	0.16

表2-1

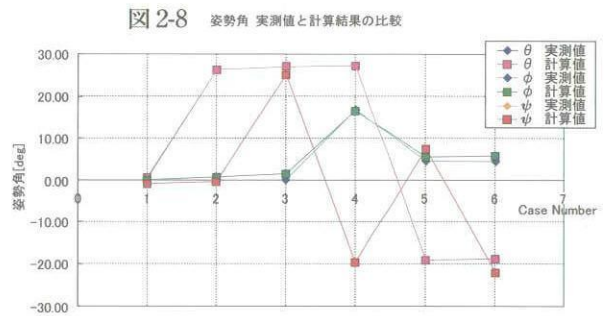
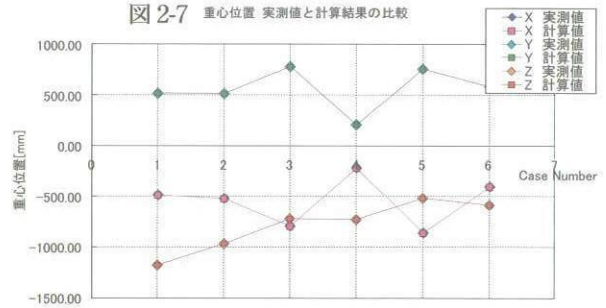


表2-1の上段には、重心位置の比較、下段には姿勢角の比較を示している。

また、図2-7は横軸に計測回数（位置、姿勢角を変更して計測した回数）、重心位置を示し、図2-8は横軸に計測回数（位置、姿勢角を変更して計測した回数）、姿勢角を示している。

これらの結果は先に検討した、マーキングの検出精度を満たしており、

位置精度 = 約±0.7mm

姿勢角 = 約±0.7deg

程度の精度で計測することが可能なシステムであることが確認された。

3. FHI 低速風洞における運用

これらのシステムで要求する精度を満足する計測が行えることが確認されたので、このシステムをFHI 低速風洞での運用を行う。

以下の図3-1～3-4にFHI 低速風洞において風洞既設のロボットに標準模型を取付けての運用例を示す。

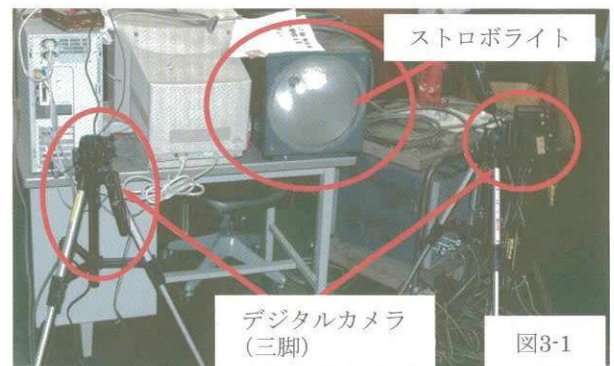


図3-1

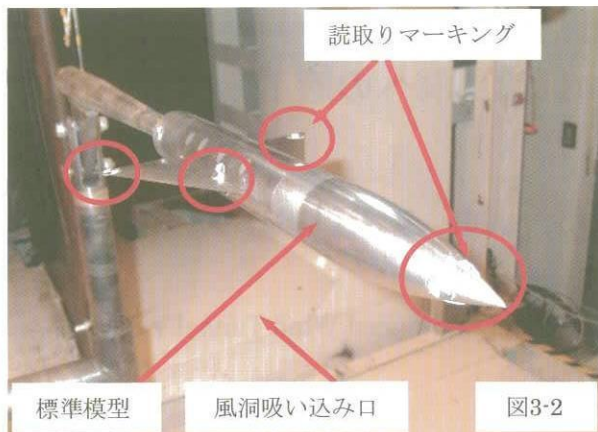


図3-2



図3-3



図3-4

これらのシステムを低速風洞に導入することにより、FHI 低速風洞の既存技術であったストロボスコープを併用しての投下・投棄動的風洞試験において画像読取り・解析に費やす労力・時間を軽減・短縮することが可能となり、

これにより、試験結果のクイックチェックが即時に行え、試験効率・試験データの生産性の向上が可能となった。

また、FHI 低速風洞において約3m離れた位置から非接触で供試体の位置・姿勢角を求めることが容易になった。

4. 将来に向けて

近年のデジタルカメラの技術は日進月歩で改良され、画素数も日々増えつつある。このデジタルカメラを高画素数のものに変更・交換するだけでも、読取り精度を向上が良くなり、結果として位置精度、姿勢各精度も向上させることができる。

更に、コンピュータの性能向上に伴い、マーキングを自動で認識・判断し、中心位置を自動的に読取るシステムを構築することで、供試体位置の読取り速度を向上させ、データ生産性を向上させるとともに、労力削減・時間短縮が可能となる。

また、低速風洞のテストセクションや、模型可動範囲を見通せる位置に、デジタルカメラや、VTRを固定設置することで、力計測、圧力計測風洞試験の静的風洞試験の姿勢角・位置の計測のバックアップとしての運用も可能になると考えられる。

これらの画像処理技術や、解析プログラムの進歩により、高速度のデジタルカメラなどを使うことで、通風中に供試体を自由落下させた時の軌跡を解析することにより、供試体の位置・姿勢角の変化過程から逆算して力を求めることにより、支持干渉の無い機体6分力計測が可能になるのではないかとと思われる。