

# 基于多目立体视觉的试件飞行运动速度测量方法研究

高 越, 杜文略, 李红薇, 龙 雪, 王利斌, 胡 鑫

(北京强度环境研究所, 北京 100076)

**摘要:** 为了测量试件的飞行速度, 提出了一种基于多目立体视觉技术的飞行运动速度测量方法; 首先研究了多目相机的标定方法, 然后通过图像匹配的方法来获取各个相机图像中目标点的图像位置, 最后根据各个相机的内部和外部参数, 重建得到被测试件的三维坐标, 结合相机的拍摄速度, 计算出试件的飞行速度; 结果表明: 该方法可以较为准确的测量出试件在整个飞行过程中的运动速度, 且具使用灵活, 操作方便等特点。

**关键词:** 多目立体视觉; 运动速度测量

## Measurement method for Specimen Fly Speed Based On Multi-Camera Stereo Vision Technique

Gao Yue, Du Wenlue, Li Hongwei, Long Xue, Wang Libin, Hu Xin

(Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China)

**Abstract:** In order to measure the fly speed of specimen, a novel measurement method based on multi-camera stereo vision technique is proposed. Firstly, we research the calibration method of multi-camera stereo vision measurement system. Patch matching is preformed to find the correspond points in each camera image. Finally, the three-dimensional coordinate and speed of the test point is calculated at each camera frame time. The result shows that the method can accurately measure the specimen fly speed with the advantages of flexible and simple operation.

**Keywords:** multi-camera stereo vision; fly speed measurement

### 0 引言

传统的基于视觉测量飞行速度的方法通常基于单目视觉测量和双目视觉测量。其中单目视觉测量是利用单一相机从垂直飞行的方向拍摄试件运动过程, 该方法的缺点是仅能测量试件在飞行平面内的运动, 无法测量垂直方向的运动。双目视觉测量利用两个相机呈一定角度拍摄飞行过程, 该方法虽然可以计算出试件的三维运动速度, 但由于相机分辨率的限制导致无法在较大飞行区域内做到高精度测量<sup>[1-2]</sup>。本文采用的多目立体视觉技术使用多台相机组网拍摄试件的整个飞行过程, 既可以获得试件的三维运动速度, 同时可以保证在大视场情况下保证最终测量精度。

### 1 多目立体视觉测量系统组成及原理

基于多目立体视觉技术的测量系统原理图如图 1 所示。使用多个相机从不同角度拍摄被测试件表面测点, 根据相机的透视成像原理, 测点在第  $i$  个相机  $S_i$  的图像中的二维坐标  $p_i(x_i, y_i)$ , 与该测点在物理空间中的三维坐标  $P(X_w, Y_w, Z_w)$  有如下关系式:

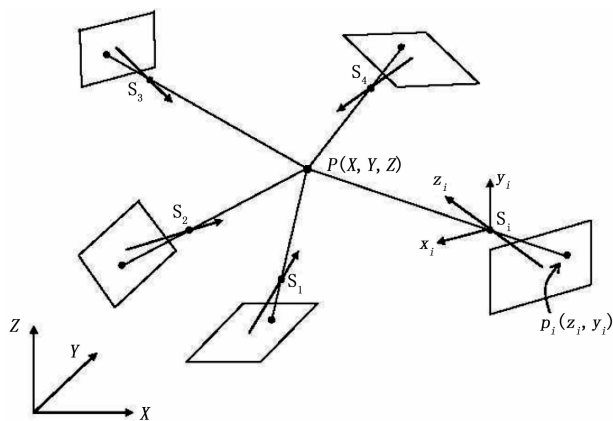


图 1 多目立体视觉测量系统原理

$$Z_c^i \cdot \begin{bmatrix} x^i \\ y^i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f^i \cdot S_x^i & 0 & c_x^i \\ 0 & f^i \cdot S_y^i & c_y^i \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11}^i & r_{12}^i & r_{13}^i & t_x^i \\ r_{21}^i & r_{22}^i & r_{23}^i & t_y^i \\ r_{31}^i & r_{32}^i & r_{33}^i & t_z^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $f^i$  为相机焦距,  $(S_x^i, S_y^i)$  为相机感光传感器的单个像素在  $x$  和  $y$  方向上的物理尺寸, 上述两组参数由于在数学

收稿日期: 2018-12-20; 修回日期: 2019-01-29。

作者简介: 高 越(1985-), 男, 天津人, 博士, 工程师, 主要从事基于视觉的地面测试技术方向的研究。

模型中是耦合状态, 通常使用  $(f_x^i = f^i \cdot S_x^i, f_y^i = f^i \cdot S_y^i)$  代替。 $(c_x^i, c_y^i)$  为相机图像中心坐标, 上述两项称为相机的内部参数, 仅与拍摄时相机内部的机械结构及所使用的镜头有关。旋转矩阵  $\mathbf{R} = (r_{11}^i, r_{12}^i, \dots, r_{33}^i)$  和平移向量  $\mathbf{T} = (t_x^i, t_y^i, t_z^i)$  为物理空间三维坐标系与相机光心坐标系的坐标变换参数, 其中旋转矩阵只有三个独立参数, 这两项称为相机的外部参数, 仅与拍摄时相机的位置和朝向有关。所有这些内部参数和外部参数需要在试验之前通过相机参数标定的方法获得。若通过图像处理的方法获得被测点在  $N$  个相机图像中的二维坐标  $(x^i, y^i)$ , 则可列出  $N$  个上述方程, 为了计算被测点三维坐标  $P(X_w, Y_w, Z_w)$ , 需要保证  $N(N \geq 2)$ , 将  $N$  个方程联立后通过最小二乘法可求得方程组的唯一解。

## 2 关键技术

### 2.1 相机标定

相机标定是通过试验确定相机模型参数具体数值的过程。相机标定是三维视觉测量的关键环节, 其标定结果的好坏直接决定了三维视觉测量的精度。

相机标定的过程通常有三个步骤, 首先, 制作表面带有摄影标志的标定物, 使用相机拍摄标定物图像。然后, 利用数字图像处理算法, 提取摄影标志点的图像坐标。最后, 结合已知的摄影标志点相对方位和坐标, 使用相机标定算法求解上述 10 个独立参数。由此可知, 标定算法的好坏和标定物的制作精度直接决定了标定结果中成像模型参数的精度。通常, 相机标定先进行单相机标定, 然后再进行多相机标定, 相机标定的目的是确定式 (1) 中的所有相机的内部和外部参数, 本文中针对试验环境特点, 采用具有高精度且操作简单的张正友相机标定方法<sup>[3]</sup>。该方法介于传统标定方法和自标定方法之间, 同时具有传统标定方法精度高和自标定方法设备要求低的优点, 十分适合拍摄视场相对较小的工程应用场合。张正友标定法使用的标定物为平面标定物, 通常称为标定板。标定板表面事先制作了具有较高精度的规则图案, 如图 2 所示为两种较为常用的标定板图案: 棋盘网格和圆点网格。

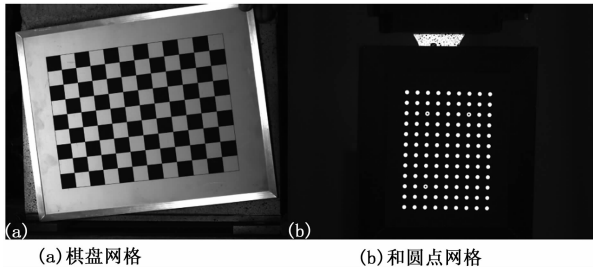


图 2 两种常用的标定板图案

张正友标定法利用相机拍摄不同姿态下的标定板, 获取标定板图像, 通过数字处理算法, 得到标定板上摄影标志的图像位置。对于棋盘网格而言, 算法获得的是所有方块顶角的图像位置。对于圆点网格而言, 算法获得的是每

个圆点圆心的图像位置。

将世界坐标系  $O_w$  的  $XY$  平面定于标定板平面内, 所有标志的世界坐标均可写作  $(X_w, Y_w, 0, 1)$ , 则式 (1) 的变换方程可为:

$$Z_c^i \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x^i & 0 & c_x^i \\ 0 & f_y^i & c_y^i \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11}^i & r_{12}^i & r_{13}^i & t_x^i \\ r_{21}^i & r_{22}^i & r_{23}^i & t_y^i \\ r_{31}^i & r_{32}^i & r_{33}^i & t_z^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

进行下式代换:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} = [\mathbf{h}_1 \quad \mathbf{h}_2 \quad \mathbf{h}_3] = \mathbf{A}[\mathbf{r}_1 \quad \mathbf{r}_2 \quad \mathbf{T}] \quad (3)$$

其中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} f_x^i & 0 & c_x^i \\ 0 & f_y^i & c_y^i \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{r}_1 = \begin{bmatrix} r_{11}^i \\ r_{21}^i \\ r_{31}^i \end{bmatrix}, \mathbf{r}_2 = \begin{bmatrix} r_{12}^i \\ r_{22}^i \\ r_{32}^i \end{bmatrix} \quad (4)$$

$\mathbf{h}_1$ 、 $\mathbf{h}_2$  和  $\mathbf{h}_3$  为矩阵  $\mathbf{H}$  的列向量。式 (2) 整理后, 得到下面两个方程:

$$\begin{bmatrix} X_w & Y_w & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_i \cdot X_w & -x_i \cdot Y_w & -x_i \\ 0 & 0 & 0 & X_w & Y_w & Y_w & -y_i \cdot X_w & -y_i \cdot Y_w & -y_i \end{bmatrix} \cdot \mathbf{X} = 0 \quad (5)$$

其中:  $\mathbf{X} = (\mathbf{h}_1^T, \mathbf{h}_2^T, \mathbf{h}_3^T)^T$ 。对于每个姿态下的标定板图像,  $N$  个摄影标志可以提供  $2N$  个方程, 这些方程可以组成形如  $\mathbf{M} \cdot \mathbf{X} = 0$  方程组, 其中  $\mathbf{M}$  为  $2N \times 9$  矩阵。由于该方程组为齐次线性方程组, 对于任意实数  $\lambda$ ,  $\lambda \cdot \mathbf{X}$  也是该方程组的解。因此, 求解该方程组只能得到每个姿态下的  $\lambda \cdot \mathbf{H}$  矩阵, 但这并不影响后面求解相机的成像模型参数。

由于旋转矩阵  $\mathbf{R}$  的各个列向量是归一化正交的, 即  $\mathbf{r}_1^T \cdot \mathbf{r}_2 = 0$  且  $\mathbf{r}_1^T \cdot \mathbf{r}_1 = \mathbf{r}_2^T \cdot \mathbf{r}_2$ 。因此 矩阵中各个列向量应满足下面两式:

$$\mathbf{h}_1^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2 = 0 \quad (6)$$

$$\mathbf{h}_1^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1 = \mathbf{h}_2^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2 \quad (7)$$

进行代换:

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix} \quad (8)$$

由于  $\mathbf{B}$  为对称矩阵, 且  $B_{12}, B_{21}$  均为 0, 故  $\mathbf{B}$  仅有 5 个独立参数。令  $\mathbf{b} = (B_{11}, B_{22}, B_{13}, B_{23}, B_{33})$ , 则式 (6) 和式 (7) 整理后得到:

$$\begin{bmatrix} h_{11}h_{21} & h_{12}h_{22} & h_{13}h_{21} + h_{11}h_{23} & h_{13}h_{22} + h_{12}h_{23} & h_{13}h_{23} \\ h_{11}^2 - h_{21}^2 & h_{12}^2 - h_{22}^2 & h_{11}^2h_{13} - h_{21}^2h_{23} & h_{13}^2h_{12}^2 - h_{23}^2h_{22}^2 & h_{13}^2 - h_{23}^2 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{b} = 0 \quad (14)$$

每个姿态下的标定板图像可以建立上述 2 个方程,  $M$  个姿态可以建立包含  $2M$  个方程的齐次线性方程组。求解后可得到  $\lambda \cdot \mathbf{B}$  矩阵 ( $\lambda$  为任意实数)。之后, 可以通过下式计算

得到所有相机的内部参数:

$$\left\{ \begin{array}{l} c_y = -B_{23}/B_{22} \\ \alpha = B_{33} - (B_{13}^2 - c_y B_{11} B_{23})/B_{11} \\ f_x = \sqrt{\alpha/B_{11}} \\ f_y = \sqrt{\alpha/B_{22}} \\ c_x = -B_{13}/B_{11} \end{array} \right. \quad (15)$$

然后结合每个姿态下的  $\lambda \cdot \mathbf{H}$  矩阵计算得到每个姿态的外部参数:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{r}_1 = \lambda \cdot \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1 \\ \mathbf{r}_2 = \lambda \cdot \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2 \\ \mathbf{r}_3 = \mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2 \\ \mathbf{T} = \lambda \cdot \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_3 \end{array} \right. \quad (16)$$

由于获取数据中存在噪声,上述方法得到的旋转矩阵  $\mathbf{R}$  通常不是正定矩阵。为此,可以通过对  $\mathbf{R}$  矩阵进行奇异值分解  $\mathbf{R} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T$ , 然后令  $\mathbf{R} = \mathbf{U}\mathbf{V}^T$ , 从而保证旋转矩阵的正定性。至此,单相机成像模型的所有参数均已使用张正友标定法计算得出。但是该计算过程中的相机成像模型为线性模型,实际的镜头由于制作精度的问题在成像过程中会导致图像发生畸变,为了获得更高的相机标定精度,必须考虑图像畸变的影响。畸变的数学模型通常可以用下式表示:

$$\left\{ \begin{array}{l} x'_s = x_s \frac{1+k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6}{1+k_4 r^2 + k_5 r^4 + k_6 r^6} + 2p_1 x_s y_s + p_2 (r^2 + 2x_s^2) \\ y'_s = y_s \frac{1+k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6}{1+k_4 r^2 + k_5 r^4 + k_6 r^6} + p_1 (r^2 + 2y_s^2) + 2p_2 x_s y_s \end{array} \right. \quad (17)$$

其中  $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, p_1$  和  $p_2$  均为畸变模型参数。由式 (17) 可以看出,畸变模型为非线性模型,其参数无法通过线性方法计算得到。通常,需要使用非线性最小二乘法计算畸变模型参数,同时进一步优化其他相机成像模型参数。建立残差方程:

$$E = \sum_M \left\{ \sum_N [x_m - x_i(X_w, Y_w, Z_w, \mathbf{p})]^2 + \sum_N [y_m - y_i(X_w, Y_w, Z_w, \mathbf{p})]^2 \right\} \quad (18)$$

其中:  $\mathbf{p}$  为包括畸变参数在内的所有相机成像模型参数,  $(x_m, y_m)$  为利用图像处理方法检测到的摄影标志位置,  $N$  为摄影标志个数,  $M$  代表采集得到的标定图像个数。利用非线性最小二乘法,将前张正友标定法计算得到的参数作为初始值(畸变参数均为 0),迭代计算所有成像模型参数,当残差函数取得最小值时,即表示成像模型参数为最优值。

计算和优化多相机成像模型参数同样需要利用非线性最小二乘法。多相机参数优化的残差方程如下:

$$E = \sum_I \sum_M \left\{ \sum_N [x_m - x_i(X_w, Y_w, Z_w, \mathbf{p})]^2 + \sum_N [y_m - y_i(X_w, Y_w, Z_w, \mathbf{p})]^2 \right\} \quad (19)$$

其中:  $C$  为相机个数。多相机成像模型中,需要选定一台相机为主控相机,其余相机为从属相机。由于各个相机之间的相对位置关系是固定的,因此模型中的外部参数仅包括

两部分:(1) 各个相机光心坐标系之间的变换参数  $\mathbf{R}_i$  和  $\mathbf{T}_i$ ; (2) 主控相机光心坐标系与每一个标定板姿态的世界坐标系之间的变换参数  $\mathbf{R}_m$  和  $\mathbf{T}_m$ 。多相机模型优化过程中,相机的内部参数和参数  $\mathbf{R}_i^m$  和  $\mathbf{T}_i^m$  的迭代初始值可以利用单相机参数优化结果,对于  $\mathbf{R}_i$  和  $\mathbf{T}_i$  的初始值,可以通过两个相机在同步拍摄同一标定物图像时的外部参数,即:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{R}_i^* = \mathbf{R}_{i+1}(\mathbf{R}_i)^{-1} \\ \mathbf{T}_i^* = \mathbf{T}_{i+1} - \mathbf{R}_i^* \mathbf{T}_i \end{array} \right. \quad 1 \quad (20)$$

其中:  $\mathbf{R}_i, \mathbf{T}_i, \mathbf{R}_{i+1}, \mathbf{T}_{i+1}$  分别为左右相机在拍摄此标定图像时的外部参数。迭代完成后,得到最优的多相机成像模型参数,整个相机标定的过程就完成了。

## 2.2 摄影标志自动识别及匹配

图像匹配是获取被测点在所有相机图像中二维坐标的过程,本文采用数字图像相关法<sup>[4-10]</sup>实现多相机图像匹配,数字图像相关法是一种可靠实用的光学测量方法,在工业和科研领域广泛应用在形貌和全场变形测量。其基本原理是通过在参考图像中选择图像子区,依据下式中的相关系数计算公式,在目标图像中寻找最优图像子区,使两个子区的相关系数达到最小值,则认为这两个子区为最相似子区,从而完成匹配过程。

$$C_{cor} = \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f_a(x, y) - f_b(x, y)]^2 \quad (21)$$

式中,  $M$  为图像子区域尺寸,通常取 25 至 35。  $f_a(x, y)$  和  $f_b(x, y)$  分别为参考图像和目标图像在点  $(x, y)$  处的图像亮度值,  $C_{cor}$  称为相关系数,相关系数越小,表明两个子区相似程度越高。

数字图像相关法通过处理相机拍摄得到的变形前后图像来计算物体表面的全场位移和变形信息,该方法要求被测物表面需要具备一定的纹理特征。这些纹理特征的密度和对比度直接影响测量结果的精度和可靠性,而通常被测试件表面本身并不具备满足要求的纹理特征,因此,在数字图像相关法的试验中,往往需要使用外部手段在被测物表面人工制作纹理,这种人工制作的纹理特征通常被称为散斑,如图 3 所示为一种典型的散斑图案。

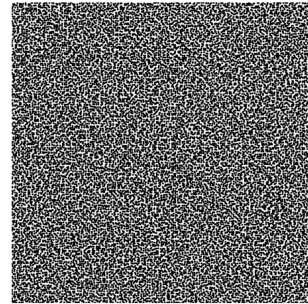


图 3 一种典型的散斑图案

散斑图案的形式通常为黑白相间的随机斑点,这种形式的纹理可以确保图像匹配的唯一性和准确性。最普遍的散斑制作方式是利用黑色和白色喷漆,先在试件表面均匀喷上底漆,然后用另一种颜色喷漆随机的喷上斑点。除此之外,还

有很多散斑制作方式,诸如印刷、水转印等<sup>[11]</sup>,相比于人工喷漆,这些方式的优点是可以对散斑图案进行控制,使散斑颗粒的尺寸和密度达到相对较好的水平,国内外已经有很多学者研究了散斑图案的特征对数字图像相关测量精度的影响<sup>[12]</sup>。

3 飞行速度测量试验

3.1 试验状态及准备

图4为试验现场示意图(俯视),被测试件真空失重发射试验在真空试验罐内进行。基于多目立体视觉的测量系统包括采集试件飞行图像的高速相机,高亮度LED照明光源,高速相机同步控制器和图像处理工作站。五台高速相机呈一定角度布置在真空罐的五个视觉观察窗处,相机拍摄方向垂直观察窗玻璃,拍摄试件运动过程,拍摄的试件飞行区域大小约为3 m(X向)×2 m(Y向)×0.5 m(Z向)。试验中采用的相机为Vision Research公司Phantom V12.1高速相机,分辨率为1 280×800像素,拍摄速度为1 600帧每秒,镜头选用是ZEISS公司Distagon镜头,分别选用3个21 mm定焦镜头和2个35 mm定焦镜头。

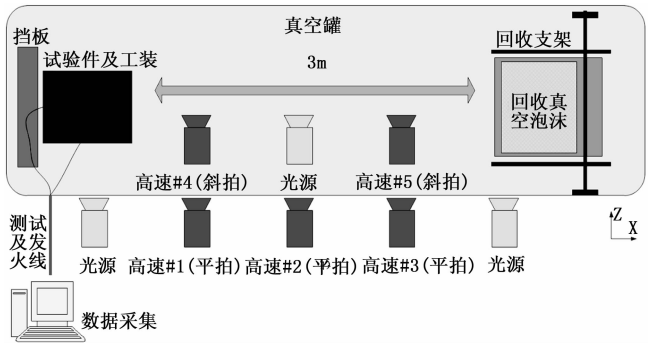


图4 试验现场示意图(侧视图)

3.2 多目立体视觉测量系统标定

试验开始前,先进行相机标定,标定板选用黑白棋盘格标定板。图5为标定过程中五台相机拍摄得到的标定板图像。试验中使用的棋盘格标定板的有效区域是630 mm×630 mm,棋盘图案中的方格个数是9×9=81个,方格黑白相间,棋盘图案中有三个方格中绘制了圆形图案,这三个方格被称为定向方格,其作用是在计算机识别棋盘图案时辅助确定棋盘方向,由于多目视觉测量系统中相机的朝向是比较复杂的,不同朝向的相机拍摄得到的标定板图像很有可能方向不同(如图5中的上方两幅图与下方三幅图),因此定向方格是十分必要的。

标定过程如下:首先,将高速相机同步控制器连接至五台高速相机,设置所有相机开始低帧速录制,然后,手持标定板至实际试件飞行区域,控制标定板先后绕三个旋转轴方向缓慢转动,确保所有相机可以同步拍摄得到标定板的不同姿态。拍摄完成后,首先对拍摄得到的所有相机的图像序列进行处理,识别所有图像中的标定板,通过定向方格确定标定板方向。对于每个包含完整标定板的图像,通过角点识别

的方法,获得该图像内所有棋盘格的内角点图像坐标,结合定向方格所确定的标定板方向,将所有识别的内角点进行排序,根据排序顺序确定同一时刻所有相机图像中的内角点对应关系,完成同名点匹配。利用节2.1的相机标定方法解算得到各个相机的内部和外部参数,完成相机标定过程。试验中最终标定精度约为1 mm。

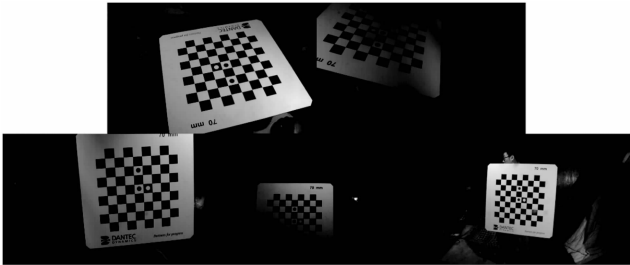


图5 试验前标定过程

3.3 试验过程及结果分析

正式开始之前,使用白色喷漆及黑色记号笔在被测试件表面制作散斑摄影标志,如图6所示为各个相机试验中拍摄得到的散斑摄影标志图像。正式试验时,首先安装试件及发射装置,设置试件发射台至指定高度。然后,关闭真空罐,使用气泵抽至试验要求的真空度。之后,启动发射控制设备,让试件及发射台整体跌落,当跌落至100ms时,由发射控制设备控制试件在失重中点火发射,飞行约3m后由回收装置回收。发射控制设备在试件点火同时发出触发信号至相机同步控制器,由同步控制器确保多台相机同时开始记录,并确保所有相机录下的每一帧图像都是同步的。试验结束后,将所有拍摄得到的图像数据从高速相机内存传输至图像处理工作站。

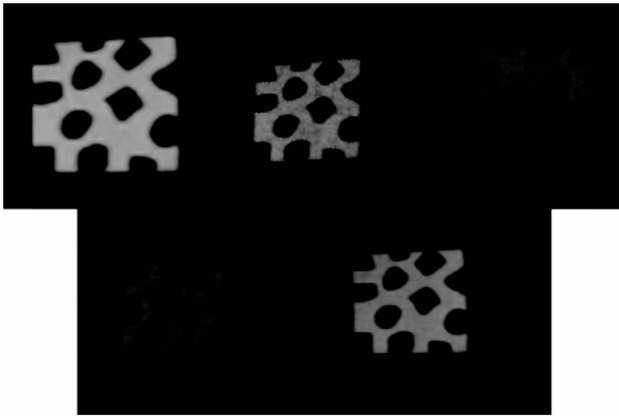


图6 试验中各个相机拍摄得到的散斑摄影标志图像

图像工作站对所有相机的图像进行分析,识别并在图像中定位试件表面上的摄影标志的位置,结合事先标定的相机内部和外部参数,重建试件飞行过程中每个时刻的三维坐标,将每个维度的坐标数据进行差分,最终根据相机的拍摄速度计算得到整个飞行过程中试件的三维运动速度一时间曲线,如图7所示。试件发射点火时刻为时间零点,发射后X

(下转第136页)