

引用格式:王天旭,王时雨,王争取.一种基于 SFM 算法的投放试验测量方法[J].微电子学与计算机,2019,36(9):50-54.
[WANG T X,WANG S Y,WANG Z Q. A wind tunnel test method to realize store separation measurement based on SFM algo-
rithm[J]. Microelectronics & Computer,2019,36(9):50-54.]

一种基于 SFM 算法的投放试验测量方法

王天旭¹,王时雨²,王争取¹

(1 中国航空工业空气动力研究院 气动研究与试验一部,辽宁 沈阳 110023;

2 西北工业大学 计算机学院,陕西 西安 710072)

摘 要:在某些无法采用常规 CTS 试验方法确定投放物与载机能否安全脱离的试验要求下,就需要采用光学测量的方法进行自由投放试验获得投放物与载机的分离过程,以判断投放物是否能够与载机安全分离.本文采用了一种基于 SFM(Structure From Motion)算法的高速视频测量方法,首先对模型表面标志点检测并匹配,进而采用三角测量原理计算出模型质心位置,实现了对自由投放亚音速风洞试验中模型下落轨迹的捕捉和计算过程.

关键词:自由投放;光学测量;亚音速风洞试验;SFM

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2019)09-0050-05

A wind tunnel test method to realize store separation measurement based on SFM algorithm

WANG Tian-xu¹, WANG Shi-yu², WANG Zheng-qu¹

(1 Department of Aerodynamic Reach and Test, China Aviation Industry Aerodynamic Institute, Shenyang 110023, China;

2 School of Computer Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: It is reasonable to investigate the procedure of store separation from the its carrier to determine whether it is an absolutely safe or not, which employs optical measurement method to implement free store separation wind tunnel test, when the CTS test method is inapplicable subjecting to test condition. In this paper, such issue is fully solved by utilizing industrial cameras with top-speed frame rate and high resolution and processing those frames to realize SFM(Structure From Motion)algorithm. After detecting and matching the markers in the frame pair, it is effective to calculate the barycentre of the model by triangulation principle. When it is put all those frame calculating results together, the store falling trajectory during the subsonic wind tunnel test is captured and estimated.

Key words: free store separation; optical measurement; subsonic wind tunnel test; SMF

1 引言

作为 CTS^[1]试验技术的补充试验手段,风洞模型自由投放试验是用以判断投放物是否能够与载机安全分离的一种重要试验方法.随着光学测量技术在风洞试验中已经得到了广泛的应用和内埋武器仓投放试验也成为近些年国内风洞特种试验的研究热

点,从早期的油流测量试验到近些年来的非接触压力测量 PSP(Pressure Sensitive Paint)、PIV(Particle Image Velocimetry)等试验方法,均利用了空间摄影测量技术.针对模型自由投放试验,国内外的许多研究机构针对此项试验技术也开展了大量的研究工作,其中,早在 1983 年 NASA 的兰利研究中心 Stallings 等较早地开展了内埋武器仓投放试验工

作^[2],美国密西西比大学国家声学试验室成功地进行了马赫数为 1.5 的投放试验^[3],之后在 2012 年美国空军技术研究中心的 Flora 建造了模拟内埋仓的试验平台并开展了相关的试验工作^[4];国内在近十年以来也开展了相关的研究工作,如中国空气动力研究与发展中心的周述光等对此类试验风洞试验技术涉及的技术环节进行过应用综述^[5],中国航空气动力技术研究院的薛飞等在 0.6 米风洞进行过此类试验工作^[6]。

通过分析国内外研究现状,多数研究工作侧重于气动力试验模拟和投放机构设计,而针对模型的轨迹测量工作多数风洞试验依赖成熟的工业视频捕获设备及软件,如加拿大 OptiTrack 公司的运动捕获系统,国内研究机构也罕见对此研究内容提出成熟的试验技术及计算处理方法,本文则侧重于计算机视觉技术如何在试验中得到应用的角度阐述如何解决此类试验问题,并给出了一个基本的试验流程及计算方法框架。随着近二十年来计算机视觉技术的快速发展,其工业应用已经应用到诸多研究领域。

2 量的书写规则

2.1 计算条件约束及试验准备

SFM^[7]指的是根据一组同态的二维图像序列还原出当前拍摄场景三维空间信息的计算机视觉技术,在这里,我们从高速相机捕获的图像序列中提取模型表面标志点信息进而计算出当前时刻的模型质心位置,再将该质心位置序列在相机坐标系中进行优化进一步得到模型在试验过程中的运动轨迹。在试验前,根据模型的数模图纸拟定出模型的质心位置之后,在数模上标示出若干标志点作为识别特征,并给出这些点在数模中距离质心的欧式距离。如下图中示意模型所示,在试验中某一时刻 t 获得模型表面若干标志点的三维空间位置 $P^1, P^2, P^3, \dots, P^n$ 和这些点到质心的距离 $D^1, D^2, D^3, \dots, D^n$,采用数值寻优的方法求解方程 $\min(\sum F(P^i, D^i) = 0)$,即可求解出模型的质心位置,并在质心位置处建立三个正交向量作为模型的体轴系计算模型姿态。

在试验段的光学观察窗处安装两台 Photon FASTCAM SA-X2 系列高速 CMOS 相机来捕捉试验模型在 0.85 马赫数流畅下的运动过程,并且将两台高速相机均固定在气浮隔震台上,以避免试验中震动给相机带来的抖动影响。试验中采用一台大功率直流 LED 作为试验光源,采集图像序列采用外部 TTL 作为同步起始采集触发信号,并且两台相机采

用 6 000fps 作为采集帧率,获得分辨率为 $1\,024 \times 1\,024$ 的 12 位图像。根据捕获后的两组图像序列在后处理过程中得到模型的运动轨迹。

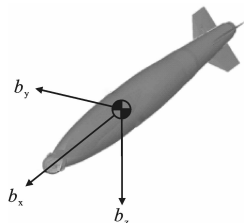


图1 试验模型计算约束示意图

2.2 解算原理及过程

根据针孔相机模型,世界坐标系下的某点 (X, Y, Z) 该点在图像中的成像位置 (u, v) 可以描述为:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fx & 0 & cx \\ 0 & fy & cy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,空间中的某点在图像中的成像位置可以用内参矩阵 K 和外参矩阵共同构成了相机矩阵投影矩阵来描述,据此以上方程可以表述成 $m = P \cdot M$ 。同时考虑到镜头畸变对图像造成的失真影响,上述过程可表示为以下过程^[8]:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + T \quad (2)$$

$$\begin{cases} x' = x/z \\ y' = y/z \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} r^2 = x'^2 + y'^2 \\ x'' = x' \frac{1 + k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6}{1 + k_4 \cdot r^2 + k_5 \cdot r^4 + k_6 \cdot r^6} + 2 \cdot P_1 \cdot x' \cdot y' + P_2 (r^2 + 2x'^2) \\ y'' = y' \frac{1 + k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6}{1 + k_4 \cdot r^2 + k_5 \cdot r^4 + k_6 \cdot r^6} + 2 \cdot P_2 \cdot x' \cdot y' + P_1 (r^2 + 2y'^2) \end{cases} \quad (4)$$

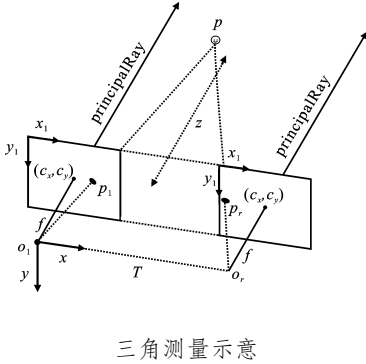
$$\begin{cases} u = fx \times x'' + cx \\ v = fy \times y'' + cy \end{cases} \quad (5)$$

公式(2) 是根据外参,将世界坐标系中的某点映射到相机坐标系,公式(2)~(5)是考虑到畸变参数从相机坐标系到图像平面的转换过程。采用成熟的计算机双目视觉技术即可从二维图像对中还还原出模型的三维空间信息,理想的三角测量几何关系如图 2 所示^[9],在左右相机内参已知且一致的情况下,

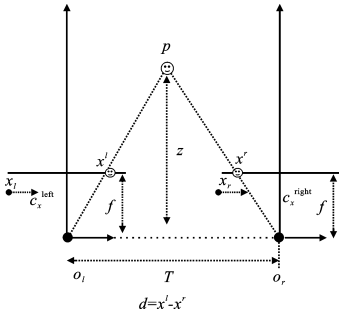
已知基线长度 B 和空间中的某一点 P 在左右图像中的呈现位置 m^l 和 m^r , 那么该点的深度信息可以根据下式:

$$\frac{B - (m^l - m^r)}{Z - f} = \frac{Z}{B}, Z = \frac{f \cdot B}{m^l - m^r} \quad (6)$$

测量出该空间点深度信息. 此时某一点 M 在左右图像中的呈现方程分别描述为 $m^l = P^l m$ 和 $m^r = P^r m$, 将两个方程联立后采用极小二乘法求解即可得到该点在此双目测量系统坐标系下的三维空间坐标位置.



三角测量示意



双目坐标系示意

图2 双目测量原理示意图

在高速摄影相机安装之后, 我们采用张氏标定法来完成双目测量系统的标定工作^[10], 并且可以采用 Ransac^[11] 方法求解左右图像之间的投影矩阵 $H_{3 \times 3}$, 使得空间中的同一点分别在左图像中的成像位置 $m_L(u, v)$ 和右图像中的成像位置 $m_R(u, v)$ 满足以下关系:

$$\begin{bmatrix} u_L \\ v_L \\ 1 \end{bmatrix} = H_{3 \times 3} \cdot \begin{bmatrix} u_R \\ v_R \\ 1 \end{bmatrix}$$

这样就可以将同一时刻左右图像中检测到的标志点一一对应. 试验中使用的标定模板及标定结果如图3所示.

2.3 二维试验模型图像特征提取

为了捕获模型在 0.85 马赫数下的高速运动过程, 本文采用了 Lucas-Kanad^[12] 光流法检测出模型

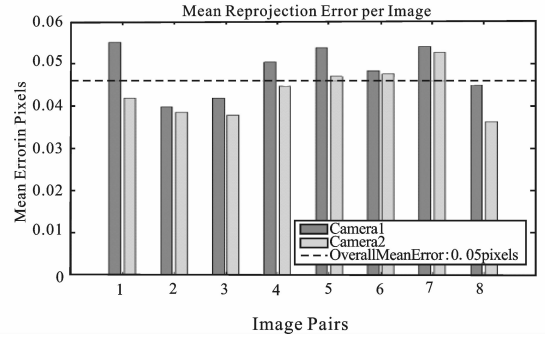


图3 双目标定结果

表面的标志点, 既克服试验段内存在着漫反射、散射等干扰, 又能够准确地地在图像中识别出模型表面标志点位置. 在相邻两帧之间根据光流约束方程 $I_x u + I_y \cdot v + I_t = 0$, 根据时空信息导数 I_x 和 I_y 计算水平方向的光流信息 u 和竖直方向的光流信息 v . 根据 Lucas-Kanade 算法思想, 在 t 时刻图像中的像素位置 P , 根据图像灰度梯度变化的一致性, 在其相邻的连通区域内的所有像素 $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ 满足以下方程关系:

$$\begin{cases} I_x(q_1) + I_y(q_1) + I_t(q_1) = 0 \\ I_x(q_2) + I_y(q_2) + I_t(q_2) = 0 \\ I_x(q_3) + I_y(q_3) + I_t(q_3) = 0 \\ \vdots \\ I_x(q_n) + I_y(q_n) + I_t(q_n) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中, $I_x(q_i)$, $I_y(q_i)$, $I_t(q_i)$ 是 t 时刻图像的分别关于水平方向、竖直方向和时间的偏导数. 若在上述三个变量已知的前提下可将上述关系写成方程 $A \cdot v = b$ 的形式, 采用极小而成的方法即可获得关于水平和竖直两个方向的像素变化矩阵 $M(V_x)$ 和 $M(V_y)$, 将这两个矩阵求模即可获得该时刻的梯度变化图像. 这样只有在模型布置标志点的位置, 梯度变化量不为零, 其余的位置梯度均是零. 这样可以在左右梯度变化图像中获得所有左图像标志点的质心位置和所有右图像标志的质心位置, 并且根据之前标定得到的畸变参数对两组标志点进行降噪处理. 根据之前标定得到的投影矩阵 H , 即可获得左右图像中两组标志点的一一对应关系. 某时刻的标志点检测过程如4图所示.

2.4 计算模型在三维空间的运动轨迹

在时刻获得左右两组一一对应关系的标志点序列之后, 即可根据双目三角测量关系计算出这些标志点的三维空间位置序列 $WP_1, WP_2, WP_3, \dots, WP_n$. 在已知这些标志点序列在数模上相对于整流

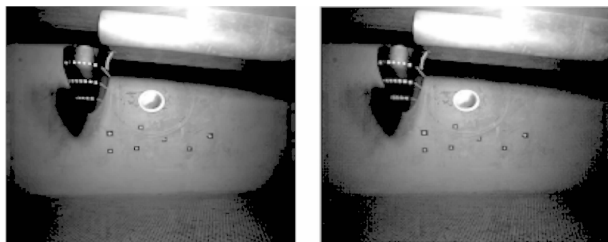


图 4 模型表面标志点检测结果

單模型空间质心距离序列 $D_1, D_2, D_3, \dots, D_n$ 的条件下,此时可以得到以下方程组:

$$\begin{cases} (WP_i^1(x) - OP(x))^2 + (WP_i^1(y) - OP(y))^2 + \\ (WP_i^1(z) - OP(z))^2 = D_1^2 \\ (WP_i^2(x) - OP(x))^2 + (WP_i^2(y) - OP(y))^2 + \\ (WP_i^2(z) - OP(z))^2 = D_2^2 \\ (WP_i^3(x) - OP(x))^2 + (WP_i^3(y) - OP(y))^2 + \\ (WP_i^3(z) - OP(z))^2 = D_3^2 \\ \vdots \\ (WP_i^n(x) - OP(x))^2 + (WP_i^n(y) - OP(y))^2 + \\ (WP_i^n(z) - OP(z))^2 = D_n^2 \end{cases}$$

在空间中找到这样一点 OP ,使得该点到所有标志点的欧式距离与理论距离之和最小.将第一帧图像的质心位置作为起始位置 OP_0 ,此后所有时刻的质心位置序列与 OP_0 .在相机坐标系下的三个方向作比较即可得出该整流罩模型在双目测量坐标系下的位移运动序列.

由于测量得到的标志点空间坐标和理论值存在误差使得该方程组不存在代数解,根据识别出的三维标志点序列和对应质心距离,将目标函数设置 $\min(\sum (WP_i - OP)^2 - D_{i2})$ 并表示为方程组形式,之后采用 levenberg-marquardt^[13]方法来求解这个典型的非线性优化求解问题.

3 试验结果与讨论

本文所采用的计算理论和方法均参考了 Matlab 中的 Computer Version ToolBox 和 OpenCV,其中双目标定过程采用了 Matlab2016 提供的 StereoCalibApp,标志点检测、匹配及最终的位移序列计算过程采用了上述两种方法作为相互验证.最终,模型在相机坐标系下的位移计算结果如图 5 所示.图中,X、Y 方向分别是沿相机水平、垂直两个方向的位移变化,Z 方向为相机坐标系中深度方向上的变化.造成曲线不光滑的原因可以归结于:一方面相机在试验过程中受到震动影响发生了轻微抖动;另

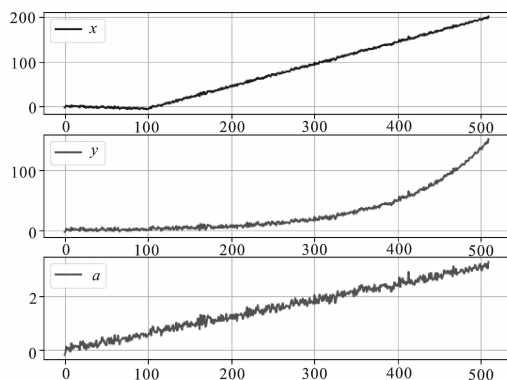


图 5 模型位移序列计算结果

一方面模型在运动过程中发生高速旋转角速度造成模型表面标志点位置存在托尾现象,造成标志点位置检测失真,进而对质心位置优化过程中带来计算误差.

4 结束语

本文从计算机视觉技术阐述了如何实现风洞自由投放试验的相关方法及试验过程,同时也存在着试验和计算方法上的不足和改进之后.为了实现准确地完成自由投放试验模型轨迹才测量工作,既要使所使用的光源、高速相机等硬件设备满足试验要求,获得高质量地原始图像数据;同时也需要进一步完善图像处理算法,在相机标定、标志点检测等环节提高计算精度.在试验方法上,可以使用激光器代替直流 LED 作为光源设备,将现有的常量模式调整为,在曝光的同时将激光器点亮以避免由模型角速度过快带来的标志点位置托尾影响,进一步提高原始图像质量.在后处理过程中,采用 Bundle Adjustment^[14]算法以优化并提高模型表面标志点的三维精度.

参考文献:

- [1] GARCON FRANCOIS. Recent developments in captive trajectory systems of the ONERA Modane wind tunnels[J]. ONERA. U. S. Department of Health, Education and Welfare, 2010 (1):351-355.
- [2] STALLINGS R L. Store separation from cavities at supersonic flight speeds[J]. Journal of Spacecraft, 1983, 20(2):129-132.
- [3] CENKO A, WASKIEWICZ J. Recent improvements in prediction techniques for supersonic weapon separation[J]. AIAA Journal of Aircraft, 1983, 20(8):659-666.

- [4] VOLKOV V, DERUNOV E. Interaction of a Combination of Bodies in Supersonic Flow Interference and Diffraction of Shock Waves in Flow Over Two Bodies of Revolution[J]. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2006, 79(4): 712-721.
- [5] 周述光. 风洞模型位移光学测量技术应用综述[J]. 实验流体力学 2009, 23(2): 94-99.
- [6] 薛飞. 内埋武器高速投放风洞试验技术[J]. 航空学报, 2017, 38(1): 59-65.
- [7] LINDA G SHAPIRO, GEORGE C. Stockman (2001) [M]. Computer Vision, Prentice Hall, 2001.
- [8] 马颂德 张正友. 计算机视觉: 计算理论与算法基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [9] BEARDSLEY P, ZISSERMAN Z, MURRAY D. Sequential updating of projective and affine structure from motion[C]//International Conference Computer Vision, [S. l.]. 1997(23): 235-259.
- [10] ZHANG Z. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations [J]. International Conference Computer Vision, 1999: 666-673.
- [11] FISCHLER M, BOLLES R. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with application to image analysis and automated cartography[J]. Commun. Assoc. Comp. 1981(24): 381-395.
- [12] NIGAM A, GUPTA P. Palmprint recognition using geometrical and statistical constraints[C]//2nd International Conference on Soft Computing for Problem-Solving, (SocProS). JK Lakshmipat University, Jaipur, 2012: 1303-1315.
- [13] MORÉ J J. The levenberg-marquardt algorithm: implementation and theory[J]. Lecture Notes in Mathematics, 1977 (630): 105-116.
- [14] KONOLIGE K. FrameSLAM: from bundle adjustment to real-time visual mapping[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2008, 24 (5): 1066-1077.

作者简介:

王天旭 男, (1983-), 硕士, 工程师. 研究方向为风洞试验测控技术.

王时雨(通讯作者) 男, (1984-), 博士研究生, 工程师. 研究方向为微处理器设计、人工智能、雷达成像、视频处理.

E-mail: onion 0709@mail. nwpu. edu. cn

王争取 男, (1987-), 工程师. 研究方向为风洞特种试验技术.