

文章编号:1002-2082(2018)03-0379-06

# 基于多视场拼接的飞机偏心定位距精确测量

张建花,张杰

(中国飞行试验研究院测试所,陕西 西安 710089)

**摘要:**针对某型飞机飞行试验中,无法采用常规机载影像测量方法精确计算飞机滑跑过程偏心定位距的问题,设计了一套基于地面多像机视场拼接的影像测量方案。通过在跑道边多点交错布设高速像机阵列,组成高速像机测量控制网,实现飞机滑跑过程影像的全覆盖;采用多摄像机交会接力测量以及数据拼接的方式,实现飞机偏心定位距的测量。实验仿真结果表明,采用该方案偏心定位距最大测量误差不大于3 cm,满足飞行试验精度要求。

**关键词:**飞行试验;影像测量;高速摄像机;视场拼接;偏心定位距

中图分类号:TH133.3;PT391

文献标志码:A

DOI:10.5768/JAO201839.0303002

## Accurate measurement of aircraft eccentricity based on multi-field splicing

Zhang Jianhua, Zhang Jie

(Measurement and Test Technology Institute, CFTE, Xi'an 710089, China)

**Abstract:** For the problem that in a certain type of aircraft flight test, the conventional airborne image measurement method can not be used to accurately calculate the eccentric positioning distance during aircraft running, a set of image measurement scheme based on ground multi-camera field stitching was designed. Through installing the high-speed camera array at the runway side, the high-speed camera control network was composed to achieve the full coverage of the image during aircraft running. By using the way of multi-camera intersection relay measurement and data stitching, the measurement of aircraft eccentric positioning distance was achieved. The simulation results show that using this program the maximum measurement error of aircraft eccentric positioning distance is less than 3 cm, which can meet the flight test accuracy requirements.

**Key words:** fight test; image measurement; high-speed camera; field stitching; eccentric positioning distance

## 引言

飞机偏心定位距指飞机两侧主起落架轮胎连线的中线到跑道中心线的距离。偏心定位距是飞行试验诸多试飞科目的一项关键测试参数,用来评价飞机性能指标是否满足设计要求。通常在飞机上安装GPS定位设备,或者利用机上惯导设备获得该测试参数。当GPS、惯导等常规位置测量

体系精度无法满足测试需求时,采用机载影像测量的手段,在飞机机腹加装一台高速像机拍摄飞机滑跑过程中的序列影像,通过影像判读获取飞机主起连线与跑道标识线交点的像素坐标,根据摄影测量原理解算交点在跑道面内的坐标,从而获取飞机偏心定位距数据。某型飞机由于结构的特殊性,机腹无理想的像机安装位置。因此,提出

收稿日期:2017-08-24; 修回日期:2018-01-12

基金项目:工信部十三五民用飞机专项科研项目(MJ-2015-14-0301)

作者简介:张建花(1983—),女,陕西商州人,硕士研究生,高级工程师,主要从事飞行试验图像测量、图像处理方面的技术研究。E-mail:272050862@qq.com

基于地面高速像机阵列的影像测量方案。在跑道边多点交错布设高速像机,通过多台高速像机视频拼接组成测量系统来完成整个飞机滑跑过程的观测,实现对全程偏心定位距的精确测量。

## 1 测试方案设计

### 1.1 高速影像测量系统设计

高速影像测量系统主要以数字高速像机作为主要测试工具,采用光纤网络传输技术和数字摄影测量技术,实现高速影像测量系统的远程综合控制,完成飞行过程影像获取与参数解算。如图1所示,沿跑道交错布设5台高速像机(C1-C5)构成交会测量模式,覆盖整个试验区域。高速像机输出的高分辨率数字影像通过光纤传输网传输到数据处理单元进行实时显示、影像下载、存储、数据判读与事后处理;同时高速像机的控制及参数设置也是通过光纤传输网由控制计算机完成。用测绘型GPS、工程测量型全站仪等设备构建符合国军标要求的坐标体系,然后通过坐标转换计算将多台高速像机测得的位置数据转换到统一的空间坐标系,保证测量系统的空间统一;采用GPS时统

终端为影像测量系统中各高速像机授时,保证测量系统的时间统一。

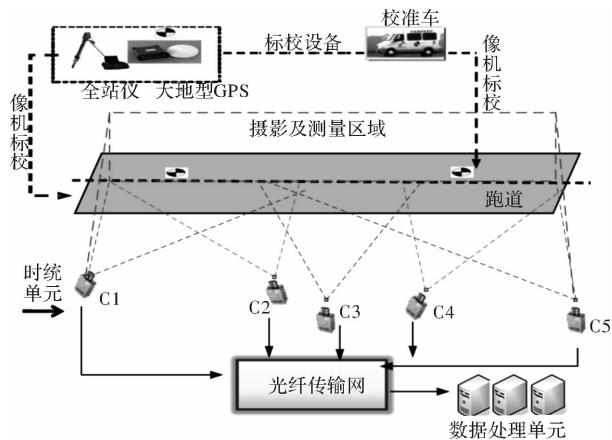


图1 高速影像测量系统组成示意图

Fig. 1 Composition diagram of high-speed image measurement system

高速像机输出的高分辨率数字影像通过光纤传输网传输到高速像机控制及数据处理单元进行实时显示、影像下载、存储、数据判读与事后处理;同时高速像机的控制及参数设置也是通过光纤传输网由控制计算机完成。高速影像测量系统数据处理流程如图2所示。

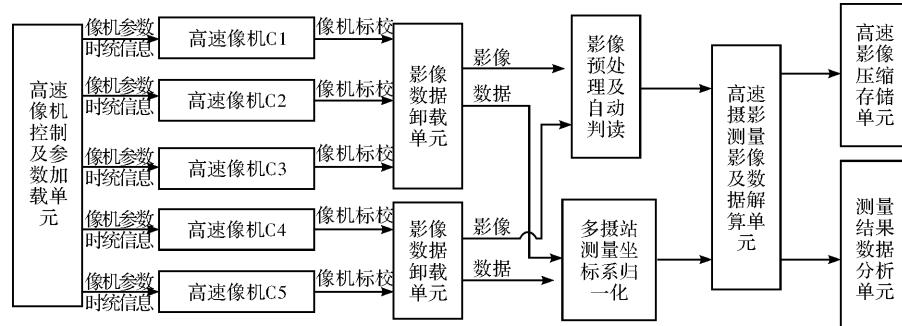


图2 高速影像测量系统数据处理流程

Fig. 2 Data processing flow chart of high-speed image measurement system

### 1.2 测量原理

基于多视场拼接的飞机偏心定位距精确测量的主体思路是:在飞机主轮轮毂中心喷涂四象限测量标志作为跟踪判读点;通过高速影像测量系统获取飞机滑跑运动过程的序列影像;采用空间后方交会方法实现高速像机的标定,得到高速摄像机阵在跑道坐标系下的内外方位元素;采用摄影测量的前方交会原理获得摄像机交会区域内跟踪判读点偏离跑道中心线的距离,结合事先标定好的两侧主起落架轮距对其进行修正,得到飞机偏心定位距随时间变化的序列数据;对多台摄像

机获得的偏心定位距数据进行拼接和平滑处理,最终获得飞机滑跑过程高精度完整的偏心定位距。

## 2 关键技术

### 2.1 测量系统时空统一

高精度偏心定位距的测量离不开时间和空间基准,时间和空间基准是高速影像测量系统的重要组成部分。用测绘型GPS、工程测量型全站仪等设备构建符合国军标要求的坐标体系,然后通过坐标转换计算将多台高速像机测得的位置数据

转换到统一的空间坐标系,并保证数据拼接的坐标统一;采用GPS时统终端为影像测量系统中各高速像机授时,采用标准的高精度时间校准标靶提供的高精度秒脉冲信息等对GPS时统终和系统内高速像机的同步性精度进行检查,保证测量系统的时间统一。

## 2.2 像机标定

像机标定是实现测量的前提,标定精度直接影响测量结果的准确性和可靠性。采用摄影测量空间后方交会原理实现像机的标定,主要步骤为:首先在每一台高速像机视场内不同平面、不同高

度均匀布设标定靶标,使其成像清晰并充满画幅;利用全站仪精确测量出标定靶标上的控制点的三维坐标,同时测量高速像机的安装位置、公共控制点以及跑道控制点坐标;公共控制点和跑道控制点可以采用反射棱镜,根据公共点将所有测量点的坐标统一纳入到一个坐标系中;拍摄标定靶标图像作为高速摄像机的检校片,对检校片中的标定控制点影像进行精确判读,从而获得所有控制点的像方坐标和物方坐标;按照(1)式计算模型,实现高速摄像机的镜头畸变系数和像机外方位元素计算。

$$\begin{cases} x - x_0 + \Delta x = -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ y - y_0 + \Delta y = -f \frac{a_1(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{cases} \quad (1)$$

式中:( $X, Y, Z$ )为地面点坐标;( $x, y$ )和( $x_0, y_0$ )分别为像点和像主点在框标坐标系下的坐标; $f$ 为摄影焦距;( $X_s, Y_s, Z_s$ )为影像的外方位线元素; $a_i, b_i, c_i$ ( $i=1, 2, 3$ )为影像的外方位角元素 $\varphi, \omega, \kappa$ 所确定的旋转矩阵中的各元素;( $\Delta x, \Delta y$ )为系统误差改正数,其表达式为:

$$\begin{cases} \Delta x = (x - x_0)(K_1 r^2 + K_2 r^4) + P_1(r^2 + 2(x - x_0)^2) + 2P_2(x - x_0)(y - y_0) \\ \Delta y = (y - y_0)(K_1 r^2 + K_2 r^4) + P_2(r^2 + 2(y - y_0)^2) + 2P_1(x - x_0)(y - y_0) \end{cases} \quad (2)$$

根据(1)式,求未知参数的偏导,列标定误差方程式:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial X_s} & \frac{\partial x}{\partial Y_s} & \frac{\partial x}{\partial Z_s} & \frac{\partial x}{\partial \varphi} & \frac{\partial x}{\partial \omega} & \frac{\partial x}{\partial \kappa} \\ \frac{\partial y}{\partial X_s} & \frac{\partial y}{\partial Y_s} & \frac{\partial y}{\partial Z_s} & \frac{\partial y}{\partial \varphi} & \frac{\partial y}{\partial \omega} & \frac{\partial y}{\partial \kappa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_s \\ \Delta Y_s \\ \Delta Z_s \\ \Delta \varphi \\ \Delta \omega \\ \Delta \kappa \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial K_1} & \frac{\partial x}{\partial K_2} & \frac{\partial x}{\partial P_1} & \frac{\partial x}{\partial P_2} \\ \frac{\partial y}{\partial K_1} & \frac{\partial y}{\partial K_2} & \frac{\partial y}{\partial P_1} & \frac{\partial y}{\partial P_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta K_1 \\ \Delta K_2 \\ \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x - (x) \\ y - (y) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:( $\Delta X_s, \Delta Y_s, \Delta Z_s, \Delta \varphi, \Delta \omega, \Delta \kappa, \Delta K_1, \Delta K_2, \Delta P_1, \Delta P_2$ )为标定参数改正数;( $x, y$ )为未知数初值代入(1)式计算得到的( $x, y$ )值。为保证有3个以上检查点,需在摄像机视场内布设至少9个以上靶标作为标定控制点;取6个以上控制点数据依据(3)式列误差方程进行标定参数的迭代计算,获得标定参数精确值后进行检查点计算,用以评估摄像机标定精度。

## 2.3 参数解算

偏心定位距的测量根据摄影测量前方交会原理解实现。前方交会的基本过程是根据已知的具有

交会区域的2台摄像机内外方位元素参数以及被测物体上测量特征点的图像坐标,通过一定的数学计算得到物体上测量特征点的几何位置。对(1)式进行变形,得到前方交会计算的公式如下:

$$\begin{aligned} l_1 X + l_2 Y + l_3 Z - l_x &= 0 \\ l_4 X + l_5 Y + l_6 Z - l_y &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

式中:

$$\begin{aligned} l_1 &= f a_1 + (x - x_0 + \Delta x) a_3, \\ l_2 &= f b_1 + (x - x_0 + \Delta x) b_3 \\ l_3 &= f c_1 + (x - x_0 + \Delta x) c_3, \\ l_4 &= f a_2 + (y - y_0 + \Delta y) a_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 l_5 &= fb_2 + (y - y_0 + \Delta y)b_3, \\
 l_6 &= fc_2 + (y - y_0 + \Delta y)c_3 \\
 l_x &= fa_1 X_s + fb_1 Y_s + fc_1 Z_s + (x - x_0 + \Delta x) \\
 &\quad a_3 X_s + (x - x_0 + \Delta x)b_3 Y_s + (x - x_0 + \\
 &\quad \Delta x)c_3 Z_s \\
 l_y &= fa_2 X_s + fb_2 Y_s + fc_2 Z_s + (y - y_0 + \Delta y) \\
 &\quad a_3 X_s + (y - y_0 + \Delta y)b_3 Y_s + (y - y_0 + \\
 &\quad \Delta y)c_3 Z_s
 \end{aligned}$$

根据交会影像上轮毂测量标志的像点坐标每个时刻可以列出4个方程,通过最小二乘原理得到主轮的瞬时位置( $X, Y, Z$ )。 $Z$ 方向为偏心方向,根据两主轮之间的距离对 $Z$ 值修正,得到飞机偏心定位距随时间变化的序列数据。

#### 2.4 数据拼接

综合考虑时间一致性和空间一致性进行测量结果的拼接。将所有相邻2个摄像机按上述计算过程进行测量计算后,重叠区的公共区域一般简单采用均值法进行拼接。对拼接后的数据采用多项式拟合或样条平滑的方法进行数据平滑,然后用样条插值法按摄像机帧频进行数据插值,形成新数据文件后,至此得到整个飞机滑跑过程的偏心

定位距数据。

### 3 试验与精度分析

#### 3.1 试验方案

以汽车作为测试对象,采用跑车试验对本文提出的测试方案进行仿真验证。高速像机的分辨率为1 696像素×720像素,像元8 um,搭配12 mm的镜头。试验前先完成像机和汽车前后轮距标定。驾驶汽车以不同速度在试验区进行偏心运动,采用本文方法计算汽车偏心定位距。

#### 3.2 试验结果

##### 3.2.1 高速像机标定

在每台高速像机视场内分别布设10个控制点,其中7个控制点用于标定参数解算,另外3个控制点作为核算点用于标定精度评估。表1和表2分别为像机标定结果和标定精度分析。精度评定的方法是将全站仪测量给出的核算点三维坐标和前方交会计算得出的核算点三维坐标的计算值进行对比分析,然后给出本文方法在 $X, Y, Z$ 三个方向的中误差。由表2可以看出偏心定位距的测量精度约3 cm。

表1 标定结果

Table 1 Calibration results

测站	畸变系数 K1	畸变系数 K2	畸变系数 P1	畸变系数 P2	$X_s/m$	$Y_s/m$	$Z_s/m$	$\varphi/^\circ$	$\omega/^\circ$	$\kappa/^\circ$
C1	-3.5E-04	2.1E-05	-8.2E-08	-3.4E-07	4.282	0.813	29.671	40.16	1.03	-0.36
C2	-2.7E-05	1.5E-05	-1.5E-07	-2.3E-07	59.439	0.857	29.060	-35.00	1.46	-0.56
C3	4.1E-03	-4.3E-05	-2.9E-08	5.5E-05	76.811	0.911	35.983	8.70	-2.7	-0.60
C4	3.1E-04	5.3E-06	-2.2E-08	6.1E-07	107.272	0.366	33.657	44.21	0.18	-0.17
C5	4.8E-04	-6.2E-07	-1.3E-07	-3.3E-08	150.308	0.710	37.117	-39.13	0.04	0.13

表2 标定精度分析

Table 2 Calibration precision analysis

测站	核算点	$X$ 坐标/m	$Y$ 坐标/m	$Z$ 坐标/m	$X$ 坐标差/m	$Y$ 坐标差/m	$Z$ 坐标差/m	中误差/cm
C1—C2 交会	1	18.765	1.319	-1.817	0.028	0.009	0.017	$m_x = 2.8$
	2	30.582	2.589	-0.832	0.036	-0.009	0.014	$m_y = 0.8$
	3	40.742	1.330	-2.581	-0.015	-0.003	0.029	$m_z = 2.1$
C3—C5 交会	4	63.939	1.976	-0.447	0.025	-0.010	0.031	$m_x = 2.7$
	5	95.582	2.575	2.887	0.015	-0.004	0.032	$m_y = 0.9$
	6	110.272	2.591	2.705	-0.039	0.012	0.018	$m_z = 2.8$
C4—C5 交会	7	122.327	1.980	-2.030	-0.012	0.002	0.037	$m_x = 1.9$
	8	139.224	2.577	0.804	0.030	0.004	-0.033	$m_y = 0.4$
	9	144.153	1.324	0.343	-0.004	0.006	-0.009	$m_z = 2.9$

##### 3.2.2 跑车试验

图3为某次地面跑车试验汽车前轮和后轮偏

心定位距的测量结果。理论上前轮和后轮的偏心定位距应一致,然从图3可以看出,前轮和后轮偏

心定位距最大差值为 2.8 cm,与像机标定时利用检核点所评估的系统测量精度 3 cm 相符。由此表明采用本文方法,可以精确给出试验汽车的偏心定位距以及其变化率,可应用于实行试验中飞机偏心定位距精确测量。

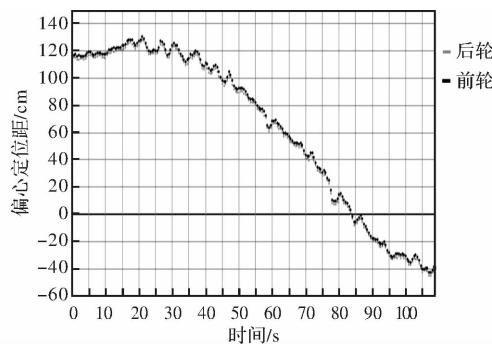


图 3 某次地面跑车模拟试验偏心定位距测量结果

Fig. 3 Eccentricity measurement results of a ground sports car simulation test

## 4 结束语

本文对飞行试验地面影像测试系统的体系架构进行研究,设计了一套适用于某型机滑跑过程偏心定位距的影像测试方案。在实际飞行试验中,经过多架次的试验验证,测试结果稳定、可靠,并结合对应时刻飞机过载、速度、姿态等信息,为飞行讲评及下一次试验提供直观、可靠的决策依据。同时对多次不同动作的这些信息进行综合分析,能有效提高飞行试验效率与安全性。该方法具有鲜明的工程应用价值,对其他类似物体的运动偏心测量具有指导意义。

## 参考文献:

- [1] HU Binghua. Accurate measurement of departure distance from aircraft to runway centerline based on images of forward-looking Runway[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(4): 104-108.  
胡丙华. 基于前视跑道图像的飞机偏心距精确测量[J]. 应用光学, 2016, 37(4): 104-108
- [2] FENG Qiaoning, WU Liwei. Investigation on measurement technology of departure distance from aircraft to runway based on images analysis[J]. Modern Electronics Technique, 2015 (10):87-90.  
冯巧宁,吴立巍. 基于影像分析的飞机偏离跑道距离测量技术研究[J]. 现代电子技术, 2015 (10):87-90.
- [3] WANG Qiyue, WANG Zhongyu. Position and pose measurement of spacecraft based on monocular vision [J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38 (2): 250-255.  
汪启跃,王中宇. 基于单目视觉的航天器位姿测量[J]. 应用光学, 2017,38(2): 250-255.
- [4] LI Bin, RONG Xiaolong, ZHANG Sanxi, et al. Optical method for pose measurement based on image-position sequence Image[J]. Journal of Applied Optics, 2015,36(2):235-241.  
李斌,容晓龙,张三喜,等. 基于影像-位置序图的光学测姿方法[J]. 应用光学,2015,36(2):235-241.
- [5] YU Ningfeng. Non-metric CCD camera calibration algorithm in digital photogrammetry system [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2007,26(2): 190-193.  
于宁峰. 数字摄影测量系统中非量测 CCD 相机标定算法[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26 (2): 190-193.
- [6] ZHANG Jianhua, LV Pengtao ,ZOU Qiang. Research of airborne camera quickly calibration technology[J]. Computer Measurement & Control, 2016, 24 (2):166-167.  
张建花,吕鹏涛,邹强. 机载摄像机快速标定技术研究[J]. 计算机测量与控制,2016,24(2):166-167.
- [7] ZHANG Jianhua, LIU Qi, NIE Ronghua. The research of airborne image measurement debounce technology[J]. Journal of Projectiles, Rokets, Missiles and Guidance, 2016;36(1):174-176.  
张建花,柳琦,聂荣华. 机载影像测量消抖技术研究[J]. 弹箭与制导学报,2016;36(1):174-176.
- [8] FENG Wenhao. Close-range photogrammetry [M]. Wuhan: Wuhan University Press,2001,132-133.  
冯文灏. 近景摄影测量[M]. 武汉:武汉大学出版社,2001:132-133.
- [9] Survey Adjustment Group of School of Surveying and Mapping, Wuhan University. Error theory and measurement adjustment basics[M]. 3rd ed. Wuhan: Wuhan University Press,2014,  
武汉大学测绘学院测量平差学科组. 误差理论与测量平差基础[M]. 第 3 版. 武汉:武汉大学出版社,2014.
- [10] ZHANG Yongjun. Visual detection theory and method based on image sequences[M]. Wuhan: Wuhan university press,2008.  
张永军. 基于序列图像的视觉检测理论与方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2008.
- [11] Wuhan university institute of surveying and mapping surveying adjustment discipline groups. Theory and measurement error adjustment [M]. Wuhan: Wuhan

- university press,2014.
- 武汉大学测绘学院测量平差学科组. 误差理论与测量平差基础 [M]. 第 3 版. 武汉: 武汉大学出版社,2014.
- [12] CAO Liangzhong, YANG Liao, LI Xin, et al. Calibration of a nonmerica camera based on bundle adjustment with additional parameters[J]. Remote Sensing Information, 2014, 29(3):14-18.
- 曹良中,杨辽,李欣,等. 基于附加参数光束法平差的非量测型数码相机检校研究[J]. 遥感学报, 2014, 29(3):14-18.