

文章编号:1002-2082(2009)04-0622-04

结构位移摄像测量系统的设计与实现

张小虎, 周翔, 周剑, 尚洋, 于起峰

(国防科大 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 针对飞机等大型工程结构的位移测量需求, 设计实现了结构位移摄像测量系统。该系统采用多台数字式摄像机从不同方向拍摄飞机机身、机翼表面的人工合作标志点, 在试验前对各个摄像机的参数进行精确标定, 试验过程中实时分析各摄像机采集到的序列图像, 检测跟踪得到标志点在图像上的二维像点坐标, 根据像机参数和标志点二维像点坐标交会计算得到各标志点的三维坐标, 即可得到整个结构的位移与变形参数。结构位移结果可进行三维动画显示, 也可随时查看各标志点的位移曲线。精度测试结果表明该系统位移测量误差标准差小于1 mm, 相对误差小于1%。该系统已成功应用于飞机机翼位移测量中。

关键词: 摄像测量; 结构位移; 像机标定; 目标跟踪

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

Design and realization of videometric system for structural displacement measurement

ZHANG Xiao-hu, ZHOU Xiang, ZHOU Jian, SHANG Yang, YU Qi-feng

(College of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Measurement of 3 dimension structural displacement with wide range and high precision is needed in the manufacturing process of large airplanes. For the displacement measurement requirement of airplanes and other great engineering structures, a videometric system of structural displacement was designed and implemented. The system adopted several digital cameras to take photos of the cooperative mark-points located on the frame and wing of the tested airplane from different directions, the parameters of the cameras were calibrated before the test, the image sequences acquired by the cameras were analyzed in real time during the test, the 2-dimension coordinates in the images of the mark-points were detected and tracked. Based on the camera's parameters and mark-points' 2-dimension coordinates, the 3-dimension coordinates of the mark-points were calculated, then the displacement and deformation of the structure were obtained, the 3-dimension results were visually provided, and the displacement curve was examined. The test results showed the standard deviation of system's displacement measurement error is less than 1 mm, and the relative error is less than 1%. The system was used in the wing displacement measurement of a specific airplane, and the efficiency and precision of the measurement were improved.

Key words: videometric system; structural displacement; camera calibration; object tracking

收稿日期:2009-02-19; 修回日期:2009-05-11

作者简介:张小虎(1973—),男,陕西凤翔人,国防科大航天与材料工程学院副研究员,博士,主要从事图像测量、运动目标检测与跟踪方面研究工作。E-mail:zhangxiaohu@vip.163.com

引言

飞机等大型工程结构由于几何形状、载荷条件和工作环境的复杂性,必须进行结构静力试验来研究其在静载荷作用下的强度、刚度和稳定性等静特性问题^[1]。结构位移测量是结构试验工作的一项基本要求。近年来随着飞机在性能、载重量、几何尺寸等方面的发展,要求能实现大量程、高精度以及三维方向的结构位移测量。而目前常用的位移测量设备,如百分表、千分表以及拉线式位移传感器等,均采用接触式测量方式,量程固定,操作较复杂,而且只能完成一维方向位移测量,存在较大局限性。

摄像测量学是近十几年来国际上迅速发展起来的新兴技术学科^[2],融合了摄影测量与计算机视觉等学科的理论与技术,实现对物体位置、尺寸、姿态以及运动参数的精密测量,是一种非接触测量方法,具有直观、可靠、高精度的特点。摄像测量技术已经广泛应用于各种精密测量和运动测量,涉及到航空航天、国防试验、勘察勘测、交通运输、建筑施工、体育运动等各个领域,例如零部件加工质量检测、三维表面重建、工业反求工程、建筑工程测量、铁路公路质量检测、飞行器弹道姿态运动参数测量等。

针对飞机等大型工程结构的位移测量需求,设计实现了结构位移摄像测量系统。该系统通过多台数字式摄像机从不同方向拍摄飞机机身、机翼表面的人工合作标志点,对采集到的序列图像进行实时分析,交会计算得到各标志点的三维坐标,并可将三维结果可视化输出显示。该系统已成功应用于某型飞机机翼位移测量中,极大提高了测量效率和

精度。

1 摄像测量原理

如图1所示, P 为空间坐标系 O_w, X_w, Y_w, Z_w 下物点; O_1, O_2, O_3 分别为3个摄像机光心;而 p_1, p_2, p_3 分别为物点 P 在3个摄像机像面上的像点。根据理想针孔成像模型,任一像机关于物点 P 的像点 p_i 和光心 O_i 及物点 P 点共线,像点 p_i 图像坐标 (X, Y) 与物点 P 的空间坐标 (x_w, y_w, z_w) 满足共线方程(1)。

$$\begin{cases} \frac{X}{f} = \frac{r_{11}x_w + r_{12}y_w + r_{13}z_w + t_x}{r_{31}x_w + r_{32}y_w + r_{33}z_w + t_z} \\ \frac{Y}{f} = \frac{r_{21}x_w + r_{22}y_w + r_{23}z_w + t_y}{r_{31}x_w + r_{32}y_w + r_{33}z_w + t_z} \end{cases} \quad (1)$$

式中: f 为像机焦距; $r_{11}, r_{12}, \dots, r_{33}$ 和 t_x, t_y, t_z 是由像机外部参数决定的旋转矩阵和平移向量的元素。以上这些像机参数可以通过专门的标定方法确定。

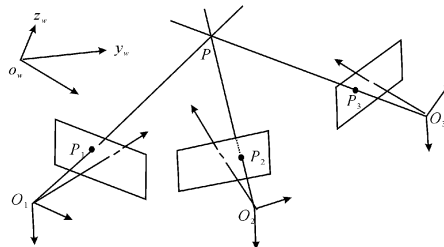


图1 摄像测量原理

Fig. 1 Principle of videometrics

设空间目标 $P(x_w, y_w, z_w)$ 由第 i 个摄像机拍摄的图像点为 $p_i(X_i, Y_i)$,则共线方程(1)可转化为如下关于 x_w, y_w, z_w 的方程组:

$$\begin{cases} (r_{31}X_i - fr_{11})x_w + (r_{32}X_i - fr_{12})y_w + (r_{33}X_i - fr_{13})z_w = t_x - t_zX_i \\ (r_{31}Y_i - fr_{21})x_w + (r_{32}Y_i - fr_{22})y_w + (r_{33}Y_i - fr_{23})z_w = t_y - t_zY_i \end{cases} \quad (2)$$

在已知像点坐标 (X_i, Y_i) 和像机参数的情况下,(2)式是关于 (x_w, y_w, z_w) 的线性方程组。对于单个摄像机成像条件,只有2个方程求解3个未知数,得不到唯一解。而对于2台或2台以上像机成像条件,方程的个数变为 $2i(i \geq 2)$,于是该方程组变为超定方程组,可以用最小二乘法求解。

实际上由图1可知,如果光心和像点已知,就可以确定像点和光心组成的惟一射线,而物点必然在此射线上。当使用2台或多台摄像机从不同的位置对同一目标拍摄时,各个摄像机的光心和其对应

同名像点组成的射线都通过同一空间物点,即各射线应在物点相交。这就是摄像测量学三维交会定位的基本原理。

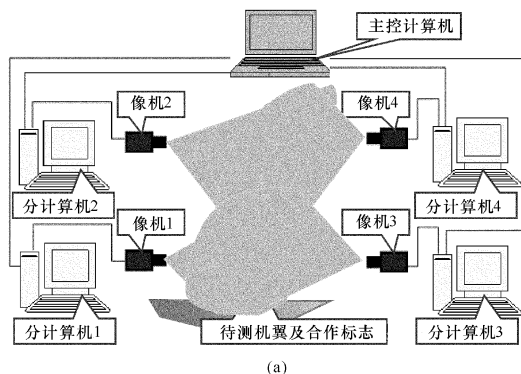
理论上,这些射线应该相交于一点。但是由于实际摄像系统存在各种误差,特别是图像上目标提取定位误差、摄像系统参数标定误差等,使得这些射线通常不是严格的数学意义上的相交于一点,而只是近似相交于一点。因此摄像测量原理很简单,但是要进行高精度的摄像测量,却是一项困难和复杂的工作。只有解决了上面几个关键问题,摄像测

量才能满足高精度测量的需要。

2 系统组成

该系统由图像采集处理硬件系统和相应的软件分析系统两部分组成。

硬件系统包括4台摄像机及与之对应的图像采集和图像处理分计算机,还包括1台用于测量过程控制、三维解算以及结果可视化显示的主控计算机



机,如图2(a)所示。4台摄像机通过千兆网与对应的计算机连接,而4台分计算机与主控计算机又组成一个局域网。各像机将图像传输到对应的分计算机,分计算机自动提取合作标志图像坐标,通过局域网传输到主控计算机,进行交会计算,实时得到机翼上各测量点位移并可视化显示测量数据。

为了提高测量可靠性与精度,在机翼上各待测点设置了主动发光合作标志。像机布置如图2(b)所示。

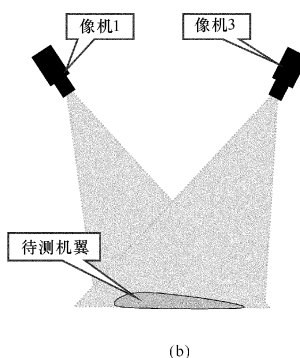


图2 系统结构及像机布置图

Fig. 2 Structural diagram of the system and the Layout of the cameras

软件系统主要由试验任务管理、摄像机标定、合作标志特征提取、三维解算以及结果输出等分系统组成。

该测量系统通过以下过程完成测量任务。

1) 安装调试摄像机,并在摄像机视场中布置标定参照物。各摄像机拍摄标定参照物图像并标定像机参数^[3]。

2) 在平衡状态和机翼静力试验加载过程中,在主控计算机控制下,各分计算机控制相应像机同步采集机翼图像,并对图像进行处理分析,完成各合作标志点的高精度提取^[4]。

3) 各分计算机将标志点提取结果传输给主控计算机,主控计算机结合像机参数和各像机图像合作标志提取结果,交会计算各合作标志的三维位置。

4) 将加载各阶段合作标志三维位置测量结果与平衡状态下的测量结果进行比较,得到机翼各测点的三维位置的动态变化情况,并合成得到机翼表面各部位的航向位移、垂向位移和扭转角等动态变形参数。

3 精度测试实验

为了检验该系统的可靠性与测量精度,进行了精度测试实验。将测量标志灯粘贴在一个可移动座

架上,其移动量可用游标尺精确读出,将移动座架放置在摄像测量系统视场范围内。移动座架,并记录游标尺上读出的移动距离,作为标志灯位移的标准值。同时用摄像测量系统对标志灯进行跟踪测量,将测量得到的位移数据与记录的游标尺数据进行比较,考察系统测量精度。分别将移动座架游标尺按竖直、水平、侧向等多个方向进行放置,以考察系统在多个方向上的精度。

在实验过程中,标志灯在每个方向均移动10次,每次移动100 mm,实验结果见表1。

表1 精度实验结果

Table 1 Results of the test

方向误差	方 向		
	竖直	水平	侧向
最大值/mm	2.7	1.5	2.0
标准差/mm	1.0	0.7	0.4
相对误差/(%)	0.27	0.15	0.20

从精度测试的结果看,该系统位移测量误差标准差优于1 mm,相对误差小于1%。

4 结论

结构位移摄像测量系统已在某飞机设计研究

所强度试验中投入使用,取得了良好的使用效果。该系统具有以下特点:

a) 测量精度高。全场测量误差标准差优于1 mm,相对误差小于1%;

b) 位移测量量程范围大,从毫米级到数米级位移量均可测量;

c) 全自动实时测量,操作简便,可靠性高,抗干扰能力强;

d) 测量过程中提供试验件动态直观图像,测量结果显示直观明了,信息参照方便;

e) 系统具有较强的可扩展性,兼顾测试厂房内其他试验位移测量需求。

该系统在其他需要动态位移或运动测量领域也有较广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 吴森. 结构试验基础[M]. 北京:航空工业出版社, 1992.
WU Sen. Fundament of structural test [M].

Beijing: Aviation Press, 1992. (in Chinese)

- [2] 于起峰,尚洋. 摄像测量学原理与应用研究[M]. 北京:科学出版社, 2009.

YU Qi-feng, SHANG Yang. Videometrics: Principles and Researches [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)

- [3] 于起峰,陆宏伟,刘肖琳. 基于图像的精密测量与运动测量[M]. 北京:科学出版社, 2002.

YU Qi-feng, LU Hong-wei, LIU Xiao-lin. Precise measurement and motion metric based on image [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)

- [4] 李由,张恒,雷志辉. 基于生物视觉 Center-surround 机制的光团目标检测与跟踪[J]. 应用光学, 2008, 29(2): 283-288.

LI You, ZHANG Heng, LEI Zhi-hui. Detect and track light blobs by center-surround mechanism of biological vision [J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(2): 283-288. (in Chinese with an English abstract)