

大型飞机风洞变形测量的相机标定研究

梁晋, 肖振中, 唐正宗, 刘建伟

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了实现大型飞机风洞模型动态视频变形测量, 提出并实现了一种新的大幅面高精度的标定方法. 该方法以张正友摄像机标定算法为基础, 考虑到标定平面模板加工制造中的误差, 采用了摄影测量中的光束平差算法来优化初始的标定结果. 张正友标定算法只是考虑了镜头的二阶径向畸变, 并在镜头畸变模型中加入了径向畸变、切向畸变和薄棱镜畸变的校正. 实验表明, 所提方法的相对误差小于 $1/5\ 000$, 标定误差仅是张正友标定算法的 27%, 具有较高的测量精度. 因此, 该大测量幅面标定方法, 不仅可以灵活地实现不同测量幅面的精确标定, 而且还满足了风洞变形下的不同测量幅面的需求.

关键词: 相机标定; 光束平差; 视频变形测量

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)03-0055-05

Large Space Camera Calibration for Three-Dimensional Videogrammetric Vibration Measurement of Large Aeroplane Model in Wind Tunnels

LIANG Jin, XIAO Zhenzhong, TANG Zhengzong, LIU Jianwei

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To realize three-dimensional videogrammetric vibration measurement of large aeroplane model in wind tunnels, a new large space camera calibration arithmetic is proposed, which considers the calibration board error in manufacture. The initialize calibration result by Zhang Zhengyou calibration arithmetic is optimized by bundle adjustment of the digital close range industry photogrammetry. There are two coefficients of the radial symmetrical distortion for the lens in Zhang zhenyou's method. The error from radially symmetrical, radial asymmetrical and tangential distortions for the lens is eliminated in this method. The experiment show that the precision of this new arithmetic is exceeding of $1/5\ 000$, and the error is only 27% of Zhang Zhengyou calibration arithmetic. The large space camera calibration is achieved with this new calibration arithmetic, which enables to suit the requirements for videogrammetric vibration measurement of large aeroplane model in wind tunnels.

Keywords: camera calibration; bundle adjustment; videogrammetric

大型飞机在高亚音速条件下巡航需要采用大展弦比后掠机翼, 因受材料、质量和成本等因素的制约, 设计时需要牺牲一定的结构刚性, 因此为了提高结构效率, 必须采用柔性机翼设计原则.

传统的风洞模型测量方法(如贴应变片测量应变)不仅模型加工困难, 而且测量精度较低, 只能推

算估计出飞机模型变形的大概数值, 无法满足大飞机风洞模型大变形测量的要求. 我国现在生产的飞机多为小展弦比机翼, 其风洞实验模型在吹风实验中变形极小, 基本视为刚性模型, 为了提高风洞实验数据的精准度, 就需要获取风洞实验迫切需要的模型变形数据. 我国的大型飞机主要在 2.4 m 直径的

跨音速风洞中进行实验,由于模型的尺寸大、变形大,因此迫切需要进行变形监测以获得与外形对应的气动力数据.大型风洞是今后的发展方向,也迫切需要动态变形测量技术.

目前,国内对大型飞机模型的变形测量研究处于探索阶段,还未应用到风洞实验中.在国外,特别是美国国家航空航天局 NASA 的风洞实验室从 20 世纪 90 年代就开始研究视频风洞模型的变形测量技术,并经不断完善应用到各种大飞机的风洞实验中.视频变形测量技术与传统的传感器方法相比,使用方便、快捷,可直接测量大型飞机模型的变形.

1 大幅面相机标定技术

在进行大型飞机风洞模型吹风实验时,其机翼有很大变形,如图 1 所示,因此需要精确测量飞机模



图 1 典型变形的大展弦比飞机模型

型的动态变形情况.大型飞机模型风洞实验的三维视频动态变形测量方法包括:①采用 XJTUOM 三维光学面扫描系统和 XJTUDP 静态摄影测量系统,建立飞机静态模型表面轮廓的三维数学模型;②在风洞实验中采用多组相机(2 个相机为一组)高速拍摄模型多个部位的视频图像,计算飞机模型关键点在各个时刻的三维坐标,从而计算出模型关键点的位移变化和变形数据;③将飞机模型关键点的动态变形数据与飞机模型的静态模型结合起来,产生完整的飞机模型动态变形数据.

与传统的风洞模型的位移和变形测量(如贴应变片测量应变)相比,该方法具有很多优点:使用简单、方便、直观,只需要在风洞模型上粘贴标志点,就可测试模型的变形.由于不需要在风洞模型上安装任何传感器,也不需要 在风洞模型上埋设线缆,所以大大提高了风洞实验的效率.该技术也可用于其他行业的变形和位移测量,如冲压变形分析、焊接变形分析、汽车变形分析、碰撞实验分析及各种设备的变形分析等.

大型飞机风洞模型动态视频变形测量的一个关键技术难题是大幅面相机的标定,传统的标定方法多采用高精度的标定板,要求标定板的所有尺寸及标志点的坐标都要非常精确.图 2 为 NASA 采用的标定块.现有的标定方法多适用小幅面的标定,标定幅面在 100~300 mm,而拍摄幅面往往比较大(400~2 000 mm),但现有的标定板制作复杂,使得测量精度无法保证,而且制作成本巨大.本项目的双相机标定是一种新的自标定方法,其依据摄影测量技术原理,在标定板上的标志点的精度不要求绝对的精度,只需要知道标定板上的 2 个标志点的精确距离.

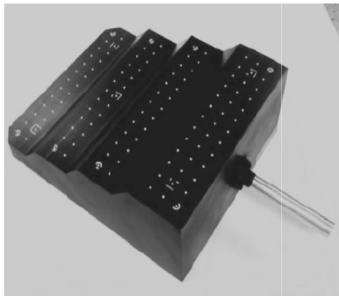


图 2 NASA 采用的标定块

大型飞机主要在 2.4 m 风洞中进行实验,其模型的尺寸为 2 m×4 m 左右,而且今后还要在 5 m 风洞中进行实验.风洞实验时大型飞机的翼尖变化范围很大,这要求一组双相机的空间测量幅面至少在 1 m×1 m×1 m(长×宽×高),而且今后还要测量更大的空间幅面.传统的视觉测量幅面很小,一般最大只能做到 400 mm×300 mm×300 mm 的空间范围.近年来,随着数字工业相机硬件的快速发展,相机的像素数从 40 万快速发展到 1 000 万以上,相机硬件本身在保证一定测量精度的前提下为测量大幅面提供了硬件基础,而制约测量大幅面的因素主要是相机标定,因此相机标定技术决定了测量精度.但是,传统的相机标定多采用高精度的标定块,受机械和光学加工的限制,无法制作大尺寸的标定块,而且制作成本巨大、较大的标定块体积也很难在风洞狭小的空间使用.

在新的大幅面双相机自标定技术中,采用了十字架标定(见图 3).由于十字架可以在风洞内灵活拆装,它只需要事先知道十字架上各个点的精确距离,因此加工和使用都很方便.十字架标定的双相机自标定算法,主要是研究编码和非编码标志点的识别、编码点的预定向和捆绑调整算法.同时,对大幅面的标定精度进行了实验分析,验证了测量精度、分析标定误差的规律.



图3 大幅画十字架标定

风洞大幅面双相机标定技术包括标志点识别、预定向、捆绑调整和匹配非编码标志点,标定算法可以灵活地实现不同测量幅面的精确标定,满足风洞变形的不同测量幅面,标定幅面从 $400\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 到 $2\,000\text{ mm} \times 2\,000\text{ mm} \times 2\,000\text{ mm}$ 。

2 标定算法研究

摄像机标定是指通过拍摄外部参照物,然后计算获取摄像机内外参数的过程,双目立体测量系统的标定需要标定出2个摄像机的内参数和外参数,并且需要计算出2个摄像机相对的位置关系,典型的摄像机标定算法需要精确控制摄像机和标定物的相对运动,或者需要精确的知道标定物的几何尺寸,这类方法能够实现高精度的标定,但标定过程复杂,在实际中难以应用。张正友提出一种使用平面棋盘网格进行摄像机标定的柔性方法^[1],该方法只需对平面模板在不同方位拍摄几幅图像即可,因此简单、方便。然而,这种算法的前提是把平面模板作为理想平面来对待,因此忽略了实际平面模板的误差。张正友标定需要平面模板上特征点的二维尺寸信息,在后期的优化中,以这些二维尺寸作为标定物的世界坐标来计算摄像机的内外参数,而实际的平面模板在印刷特征点则很难精确控制其位置尺寸。为了进一步提高标定精度,并考虑平面模板和特征点在实际加工制造中的误差,以张正友标定作为标定的初始值,利用摄影测量中经过验证的光束平差算法^[2-3]来优化初始标定结果,调整摄像机的内外参数,同时也调整标定平面模板特征点的世界坐标。光束平差算法考虑了标定物的世界坐标误差,具有较高的标定精度,而以张正友标定作为初始值,则为光束平差算法的稳定性提供了保证。

2.1 摄像机模型

在计算机视觉领域中,摄像机模型解决的是三维场景中的物方点与二维图像点的对应关系问题。

其中,针孔模型是应用最为广泛的一种^[3],在实际的关系中需要考虑镜头畸变,因此三维点与投影中心、图像点的关系式为

$$\begin{aligned} x - x_0 + d_x = & -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ & (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y - y_0 + d_y = & -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ & (2) \end{aligned}$$

式中: (X, Y, Z) 为物方点世界坐标; (X_s, Y_s, Z_s) 为投影中心坐标; (x, y) 为图像点坐标; (x_0, y_0) 为主点坐标; f 表示焦距; d_x, d_y 为畸变量。

世界坐标到摄像机坐标的旋转矩阵为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix}$$

2.2 畸变模型

在张正友标定算法中,仅考虑了二阶径向畸变,忽略了切向畸变和薄棱镜畸变^[4],主要是因为畸变参数过多可能导致非线性优化失败^[5],因此以张正友的计算结果为初始值,在光束平差时再加入更多的畸变参数,既提高了标定精度,又避免了非线性迭代不收敛的问题。初始值使用的畸变模型为

$$d_x = A_1 x r^2 + A_2 x r^4 \quad (3)$$

$$d_y = A_1 y r^2 + A_2 y r^4 \quad (4)$$

光束平差使用的畸变模型为

$$\begin{aligned} d_x = & A_1 x r^2 + A_2 x r^4 + A_3 x r^6 + B_1 \cdot \\ & (r^2 + 2x^2) + 2xyB_2 + E_1x + E_2y \\ d_y = & A_1 y r^2 + A_2 y r^4 + A_3 y r^6 + \\ & B_2(r^2 + 2y^2) + 2xyB_1 \end{aligned}$$

式中: $A_1 \sim A_3$ 为径向畸变参数; B_1, B_2 为切向畸变参数; E_1, E_2 为薄棱镜畸变参数; r 为半径。

2.3 光束平差

共线条件方程的摄影测量光束平差法,是一种把控制点的像点坐标、待定点的像点坐标以及其他内、外测量数据的一部分或全部均视作观测值,同时求解它们的值和待定点空间坐标的解算方法。张正友标定算法使用了最大优化标定结果,其中物方点世界坐标是作为没有误差的真实值进行计算的(忽略了平面模板实际的加工误差)。本文在光束平差法中将物方点世界坐标作为观测值参与优化,基于共线方程列出光束平差的误差为

$$V = \boldsymbol{A}\boldsymbol{X}_1 + \boldsymbol{B}\boldsymbol{X}_2 + \boldsymbol{C}\boldsymbol{X}_3 - \boldsymbol{L}$$

式中： $\boldsymbol{X}_1$ 为摄像机的内参数变化量； $\boldsymbol{X}_2$ 为摄像机的外参数变化量； $\boldsymbol{X}_3$ 为物方点三维坐标变化量； $\boldsymbol{L}$ 为常数项； $\boldsymbol{A}$ 、 $\boldsymbol{B}$ 、 $\boldsymbol{C}$ 分别是相应变化量的偏导矩阵。

3 实 验

双目立体测量系统采用 VC++6.0 开发,运行环境为 Windows XP 系统,硬件平台由 2 个 130 万像素的工业 CCD 摄像机和投影光源组成. CCD 的尺寸为 6.6 cm×5.3 cm,像素大小为 5.2 μm×5.2 μm,分辨率为 1 280×1 024 像素,帧率为 15 帧/s,光学镜头采用施奈德的焦距为 17 mm 的定焦镜头. 如图 4 所示,测量装置安装在一个重型操作架上,2 个摄像机分布于横梁两端,中间部分是投影光源.



图 4 双目立体测量系统

本系统采用如图 3 所示的十字架标定模板,该模板上有多个圆形特征点,其中有 17 个带有环形编码的特征点. 这些环形编码点具有旋转、缩放不变性,即模板在多种位置放置、拍摄图像时,都可以从图像中解析出这些点的惟一编号,这样就可以方便地识别其他没有编码的特征点在模板中的对应位置. 实验步骤如下.

- 步骤 1 将标定平面模板放置在测量装置前 1 m 处,用 2 个摄像机同时拍摄 5 组不同姿态的图像.
- 步骤 2 对所拍摄的图像进行特征点识别,得到圆形特征点中心的图像坐标,带编码的特征点还要得到其编码.
- 步骤 3 根据编码特征点分析得到其他特征点在模板中的行列位置.
- 步骤 4 根据标定平面模板特征点的实际尺寸和对应的图像坐标,使用张正友标定算法计算出 2 个摄像机的内参数和每幅图像对应的外参数.
- 步骤 5 使用光束平差法对 2 个摄像机内外参数、

标定平面模板世界坐标进行迭代平差.

步骤 6 利用光束平差法前、后的摄像机内外参数,分别计算出优化前、后的双目立体测量系统的标定结果.

4 结果与分析

为验证实验结果的精度,首先分析标定模板三维空间点的重投影误差,利用标定得到的摄像机的内外参数,对标定模板上的三维空间点进行重投影,得到在该内外参数条件下的标定模板特征圆圆心的理想像素坐标 $\hat{m}_i=(\hat{u}_i,\hat{v}_i)$,再分别计算 $\hat{m}_i$ 与实际图像中检测到的对应的椭圆圆心像素 m_i 之间的平均误差、最大误差、误差之和及标准偏差.

表 1 和表 2 分别列出了利用光束平差法前、后的重投影结果. 可以看出:在使用光束平差法之前,特征圆圆心的重投影平均误差在 0.23 个像素左右,最大误差在 0.42 个像素;使用光束平差法之后,圆心的重投影平均误差在 0.07 个像素左右,最大误差在 0.25 个像素. 从重投影误差结果可以看出,在考虑了标定模板的制造误差,并使用了光束平差法对标定模板的三维坐标进行调整之后,减小了重投影误差,提高了标定精度.

表 1 采用张正友标定法的重投影误差				像素
模板位置	平均误差	最大误差	误差和	标准偏差
1	0.255 1	0.353 6	25.254 9	0.047 3
2	0.339 9	0.424 6	33.650 1	0.042 9
3	0.216 5	0.311 7	21.433 5	0.049 9
4	0.250 3	0.364 5	24.779 7	0.058 8
5	0.175 2	0.256 3	17.348 0	0.041 8

表 2 经过光束平差的重投影误差				像素
模板位置	平均误差	最大误差	误差和	标准偏差
1	0.061 3	0.251 2	6.068 7	0.034 807
2	0.068 7	0.170 3	6.801 3	0.038 973
3	0.060 7	0.149 9	6.009 3	0.029 181
4	0.079 9	0.218 7	7.910 1	0.042 366
5	0.061 8	0.213 4	6.118 2	0.037 280

为了进一步验证光束平差对标定结果的影响,对一个已知精确长度的标尺进行多次不同角度的拍摄,并重建其三维长度作为精度验证.

表 3 和表 4 分别列出了使用光束平差法前、后

的对标尺多个位置进行测量的误差.可以看出:在使用光束平差法之前,多次测量的平均误差为 0.12 mm,标准差为 0.11 mm;使用光束平差法之后,多次测量的平均误差为 0.03 mm,标准差为 0.026 mm,说明使用光束平差法之后,提高了测量结果的准确性和稳定性.

表 3 张正友标定算法的标尺测量结果 mm

序号	测量结果	误差
1	221.231	0.23
2	221.213	0.212
3	221.153	0.152
4	221.178	0.177
5	220.987	−0.014
6	221.216	0.215
7	221.032	0.031
8	220.969	−0.032
平均值	221.122	0.121
标准差		0.11

表 4 光束平差算法的标尺测量结果 mm

序号	测量结果	误差
1	221.038	0.037
2	221.022	0.021
3	220.981	−0.020
4	221.056	0.055
5	221.024	0.023
6	221.039	0.038
7	221.062	0.061
8	221.051	0.050
平均值	221.034	0.033
标准差		0.026

5 结 论

为了实现大型飞机风洞模型动态视频变形的测量,本文提出并实现了一种新的大幅面高精度标定方法.该方法以单个摄像机的张正友标定算法为基础,考虑了标定平面模板的加工制造误差,引入了摄影测量中严密的光束平差算法对初步的标定结果进行了优化,从而进一步减小了摄像机重投影的误差.实验结果表明,本文标定方法的相对误差小于 1/5 000,测量误差仅是使用张正友标定算法的 27%,因此具有较高的测量精度,可实现大测量幅面的标定.本文的标定算法可以灵活地实现不同测量幅面的精确标定,满足风洞变形的不同测量幅面的要求.

参考文献:

[1] ZHANG Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.

[2] THOMAS L. Close range photogrammetry [M]. London, UK: Whittles Publishing,2000:116-122.

[3] 冯文灏. 近景摄影测量 [M]. 武汉:武汉大学出版社, 2002:125-130.

[4] REZA H,VOLKAN A. Camera auto-calibration using a sequence of 2D images with small rotations [J]. Pattern Recognition Letters, 2004, 25(7):989-997.

[5] CLIVE S F. Digital camera self-calibration [J]. Photogrammetry and Remote Sensing, 1997(52):149-159.

(编辑 管咏梅)