

文章编号 1004-924X(2012)09-1929-10

# 飞机结构件运动数据的动态视觉测量系统

李磊刚, 梁 晋\*, 唐正宗, 郭 成, 崔学龙  
(西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 基于近景摄影测量理论和立体视觉技术, 提出并实现了一种针对机身结构件在飞行状态下的轨迹、姿态、位移、变形等多种运动数据的动态视觉测量方法。研究了基于工业近景摄影测量的多相机快速自标定方法; 飞行状态下相机动态定位及抖动消除技术; 刚性结构件的运动轨迹及姿态的快速求取和通过多相机( $\geq 3$ )协作实现非编码标志点阵列的精确匹配等多项关键技术。在模拟飞行环境下的实验结果表明, 相机标定的重投影误差小于 0.03 pixel, 系统的运动轨迹姿态测量精度可达 0.01 mm/1 m, 关键点位移变形测量精度可达 0.05 mm/1 m, 基本满足飞机测试行业的精度和可靠性测量标准。

**关键词:** 相机自标定; 相机动态定位; 轨迹姿态求取; 多相机匹配; 立体视觉

**中图分类号:** TP391; V214 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122009.1929

## Optical and dynamic measuring system for movement data of aircraft structural parts

LI Lei-gang, LIANG Jin\*, TANG Zheng-zong, GUO Cheng, CUI Xue-long

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

\* Corresponding author, E-mail: liangjin@mail.xjtu.edu.cn

**Abstract:** In order to obtain the movement data of an aircraft, including trajectory, attitude, displacement, deformation and other kinds of movement data of the aircraft structural parts in the flight accurately, an optical and dynamic measurement method is proposed and implemented based on the theory of close-range photogrammetry and stereo vision technology. The main contents of the method are multi-camera self-calibration technique based on close-range photogrammetry, camera dynamic positioning and jitter eliminating in flight technology, rapid acquisition for the trajectory and attitude of rigid structure, precise matching of non-coding landmark array by multi-camera ( $\geq 3$ ) collaboration. The simulation results show that the reprojection error of the camera is less than 0.03 pixel, the trajectory and attitude measurement accuracy of the system can be up to 0.01 mm/1 m, and the measurement accuracy of key point displacement and deformation is 0.05 mm/1 m. It demonstrates that the system have met the standards of accuracy and reliability for aircraft testing industry.

**Key words:** camera self-calibration; camera dynamic positioning; trajectory and attitude acquisition; multi-camera matching; stereo vision

收稿日期: 2012-03-07; 修订日期: 2012-03-28.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 50975219); 江苏省科技支撑计划资助项目(No. BE2008058)

## 1 引言

在现代飞机性能测试中,飞机及其结构件的运动分析绝大多数都是基于理论模拟或者风洞实验来进行的。然而,在实际飞行中,飞机的变形和应变情况复杂多变,尤其是机翼的起伏变形、舱门的开闭轨迹、起落架的伸展姿态等均直接影响飞机的空中安全性以及空气动力性能。因此,通过快速、高精度的在线测量方法,获取飞机飞行过程中的变形分布情况,对提高飞机可靠性和缩短飞机的研发测试周期具有重大意义。针对该应用背景,本文提出并实现了一种针对机身结构件及机载物在空中飞行状态下轨迹、姿态、位移、变形等多种运动数据的动态视觉测量方法。主要思路是将摄像机安装在飞机上,机体飞行中实时采集影像,结束后进行数据分析和处理,从而获得测量结果。

视频测量模型变形(Videogrammetric Model Deformation, VMD)<sup>[1]</sup>,即在模型上粘贴标志点,采用一个或多个相机同时拍摄模型表面标志点的变形视频图像,通过摄影测量技术和立体视觉技术计算出每帧中标志点的三维坐标,从而获得每个标志点在受载时的位移和变形。从 20 世纪 80 年代开始,美国国家航空航天局(NASA)的风洞试验室就开始研究该技术,二十多年来一直进行改进和完善,并逐步应用于低速、高速、超高速风洞模型的变形测量和姿态测量<sup>[2-8]</sup>。德国亚琛大学的 Ballmann 等在欧洲跨音速风洞对柔性机翼模型进行了高雷诺系数下空气结构动力学测试,成功获得了机翼振动时的位移分布<sup>[9]</sup>。近几年,随着相机工业的快速发展以及近景摄影测量理论的完善,国外已经成功将该方法应用在实际飞行测试中,如荷兰国家航空实验室(NLR)在 2008 年利用数字图像相关技术成功实现了空中客车 A380 在飞行过程中机翼的变形测量<sup>[10]</sup>。而国内在这方面的应用还处于起步阶段,本课题组近期已与中国空气动力研究与发展中心合作,对大型飞机风洞试验的三维视频动态变形测量方法进行了研究和实验<sup>[11-12]</sup>。

本系统的开发涉及到以下关键技术:首先,考虑相机标定是确定其内参数的过程,其精度直接影响到最终的测量结果,本文提出使用基于近景

摄影测量理论的柔性自标定方法<sup>[13]</sup>,该方法不要求高精度的标定板,只需在刚性标定板上任意放置多个标志点就可准确地标定出相机的内外参数。其次,针对飞行状态下需要消除或补偿机载相机的抖动,本文提出了一种动态定位相机的方法。再次,针对飞机运动轨迹和姿态的测量,考虑王习文、赵立荣<sup>[14-15]</sup>等提出一系列基于经纬仪测量的方法精度较差,采集速度有限制,本文基于单像空间后方交会理论,提出一种动态定位运动目标的方法,该方法能快速并准确地获得刚体的运动轨迹和姿态。最后,针对在基于标志点检测的三维测量中,常用的双目立体视觉仅适用在以编码标志点为图像匹配基础的情况或者采用稀疏非编码标志点排布的条件,而在飞机结构件位移、变形测量中,常常需要对目标区域进行密集的点阵测量,仅使用外极线约束进行标志点匹配的方法出错率很高,无法满足需要的问题,本文在普通双目测量方法的基础上,使用多个相机( $\geq 3$ )进行标志点匹配,由于约束条件的增多,图像匹配的成功率和精度得到了很大的提升<sup>[16]</sup>。

## 2 相机自标定

### 2.1 相机模型

相机成像的理想模型是小孔成像模型,在这个模型中,物方点、镜头中心和像点 3 点共线,但理想的相机是不存在的,由于各种因素的干扰,使得像点在成像平面上和其理论位置存在偏差,考虑到这些因素,得到共线方程式(1):

$$\begin{cases} x - x_0 + \Delta x = \\ \quad - f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)}, \\ y - y_0 + \Delta y = \\ \quad - f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $(x_0, y_0)$  为主点 S 在像平面上投影点 S' 的坐标,即主点偏差;  $(X, Y, Z)$  为物方点 P 在世界坐标系中的坐标;  $(X_s, Y_s, Z_s)$  为主点 S 在世界坐

标系中的坐标;  $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix}$  是从世界坐标系

到摄像机坐标系的正交旋转矩阵; $\Delta x, \Delta y$ 为镜头畸变引起的像点偏差。

本文的标定算法将所有可能的畸变都考虑在内,所采用的畸变模型为:

$$\begin{cases} \Delta x = K_1 \bar{x}r^2 + K_2 \bar{x}r^4 + K_3 \bar{x}r^6 + \\ P_1(r^2 + 2\bar{x}^2) + 2\bar{x}\bar{y}P_2 + B_1\bar{x} + B_2\bar{y} \\ \Delta y = K_1 \bar{y}r^2 + K_2 \bar{y}r^4 + K_3 \bar{y}r^6 + \\ P_2(r^2 + 2\bar{y}^2) + 2\bar{x}\bar{y}P_1 \end{cases}, \quad (2)$$

其中: $K_1, K_2, K_3$ 为径向畸变参数; $P_1, P_2$ 为偏心畸变系数; $B_1, B_2$ 为像平面畸变。 $\bar{x} = (x - x_0), \bar{y} = (y - y_0), r^2 = \bar{x}^2 + \bar{y}^2$ 。

## 2.2 相机标定方法

本文所使用的标定算法是对方程式(1)线性化后的光束平差过程,具体方法及理论公式见文献[13]。

为了满足自动化测量的需要和适应飞机测试行业的大视场、短焦距,相机标定专门设计了一种带有编码标志点的米字型标定架,如图1所示。该标定架上所有的标志点均随机分4层布置,不在同一个平面上,这样能很好地消除由于标志点共线共面后使用角锥法进行后方交会时相机空间方位初值计算出错的可能。

与此同时,广角相机的标定极易因开始阶段的相对定向出错而失败,为解决该难题,本文结合已开发的摄影测量系统XJTUDP,在相机标定前使用单反相机精确获得标定架上所有点的准确三维坐标并导入标定程序,当自标定流程由于相对定向失败而终止时,可将此数据导入,进行后续的绝对定向和光束平差,使标定过程顺利完成。

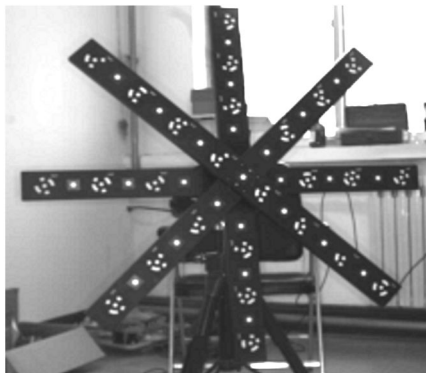


图1 米字型标定架

Fig. 1 Cross-shaped calibration target

标定流程主要如下:

(1)使用摄影测量系统XJTUDP准确测量出标定架上所有点的三维坐标备用;

(2)将带有编码标志点的标定架放置于相机前标准测量距离处,通过移动标定架获取其在多个( $\geq 10$ )不同位置和姿态的相机图像并识别图像上的编码点和非编码点;

(3)利用编码点对前两幅图片进行相对定向,并重建编码点三维坐标。如果失败,直接将第一步获得的结果导入使用;

(4)利用后方交会计算其余图片的外方位参数,并利用前方交会计算所有非编码点的三维坐标;

(5)通过光束调整优化算法对相机内参数、外参数、物方点坐标进行整体的迭代优化;

(6)优化结束后就得到了相机内参数、相对外参数,实现了相机标定。

## 3 相机动态定位及轨迹姿态测量

飞机在飞行过程中,机身各结构件均在无规律振动,机载相机也会随之振动,振幅大小大大超出测量精度。本文通过已知的全局控制点,采用空间后方交会方法实时定位相机。经实验证明,该方法可以有效消除由相机抖动带来的测量误差。

### 3.1 空间后方交会

单像空间后方交会解法,是把一张照片覆盖的一定数量的控制点的像点坐标作为观测值,并求解该像片内、外方位元素的过程。

仅仅解算外方位元素的单像后方交会,是单像空间后方交会的一个特例。在这种情况下,内方位元素和控制点坐标已知,对应的光束平差方程可表示为:

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}t - L, \quad (3)$$

其中: $\mathbf{V}$ 是像点坐标残差, $\mathbf{A}$ 为外参数偏导矩阵, $t$ 为外参数改正数, $L$ 是观测值。

因为外方位元素只有6个未知数,所以至少需要3个控制点才可进行计算。单像空间后方交会算法是对非线性方程进行线性化后的迭代运算,因此需要未知数的初值。本文使用摄影测量中的三角锥算法来计算初值。

### 3.2 相机动态定位

飞行状态下,虽然机身结构件均在无规律振动,但机身局部刚性件整体的柔性变形相对于机载相机的刚性移动可忽略不计,所以,本文描述的定位方法前提是机身刚性结构件无柔性变形。

定位方法如图 2 所示,如果测量相机的视场内可以观测到固定区域的控制点,则使用已知的控制点三维坐标和相机内参数可直接计算出测量相机坐标系相对于世界坐标系的旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和平移矩阵  $\mathbf{T}$ ,所使用方法即为上文描述的空间后方交会方法。

然而,更多时候,由于飞机上空间的限制,主测量相机很难做到既观测到待测目标区域又观测到固定区域。此时可采用耦合相机的方法来间接定位主测量相机。

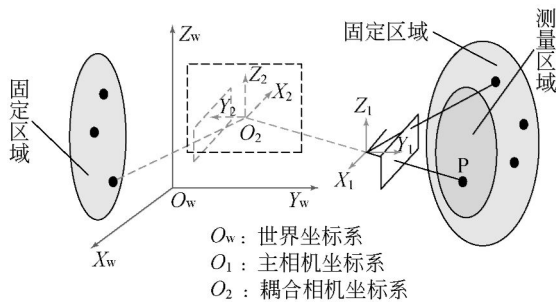


图 2 相机动态定位

Fig. 2 Camera dynamic positioning

首先,将主相机和耦合副相机刚性连接,测量过程中两者之间位置关系不发生变化,在实验室环境下标定出两相机的相对关系,即副相机坐标系相对主相机坐标系的旋转矩阵  $\mathbf{R}_c$  和平移矩阵  $\mathbf{T}_c$ 。在实验过程中,副相机观测固定区域,主相机观测目标区域,这样先使用上文描述的定位算法获得  $\mathbf{R}_c$  和  $\mathbf{T}_c$ ,再根据两相机已知的位置关系间接求取主相机相对于世界坐标系的旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和平移矩阵  $\mathbf{T}$ 。

### 3.3 轨迹姿态测量

试飞过程需要精确获得飞机上刚性件的运动轨迹与姿态,如起落架伸缩时候的运动轨迹,机载装备在空投开始阶段的运动姿态等。针对该类问题,试飞领域现今主要采用的方法是传感器、经纬仪测量或者简单的二维影像跟踪测量,这些方法能粗略地估算出飞机的运动规律,属性分析。

本文基于空间后方交会理论,提出一种快速解算刚体形心运动轨迹与姿态的方法,如图 3 所示。首先在刚体表面均匀放置多个标志点并精确解算其三维坐标(在自身坐标系下);然后,使用与定位相机相同的方法求解刚体自身坐标系与相机坐标系之间的关系  $\mathbf{R}_0$  和  $\mathbf{T}_0$ ,再利用已知的相机位置  $\mathbf{R}_c$  和  $\mathbf{T}_c$  间接反求出刚体坐标系相对于世界坐标系的旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和平移矩阵  $\mathbf{T}$ ,即姿态与轨迹,计算方法如式(4)所示。

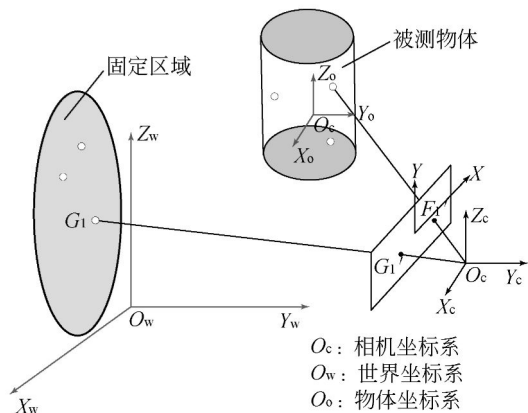


图 3 轨迹姿态测量

Fig. 3 Trajectory and attitude measurement

$$\begin{cases} \mathbf{R} = \mathbf{R}_c \mathbf{R}_0^{-1} \\ \mathbf{T} = \mathbf{T}_c - \mathbf{R}_c \mathbf{R}_0^{-1} \mathbf{T}_0 \end{cases} \quad (4)$$

其中:矩阵  $\mathbf{T}$  对应着目标形心相对于世界坐标系的轨迹,而  $\mathbf{R}$  并非对应着目标形心相对于世界坐标系的姿态,需要经过简单的转换。

飞行数据中,姿态所代表的是目标相对于某特定坐标系 3 个轴的旋转量,如图 4 所示。

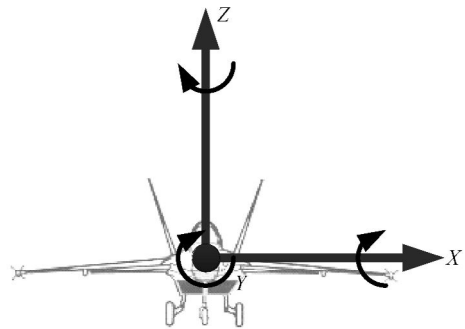


图 4 飞机姿态示意图

Fig. 4 Schematic diagram of aircraft attitude

绕 X 轴旋转角  $\omega$  称为倾角,绕 Y 轴旋转角  $\varphi$  称为回滚角,绕 Z 轴旋转角  $\kappa$  称为航向角。

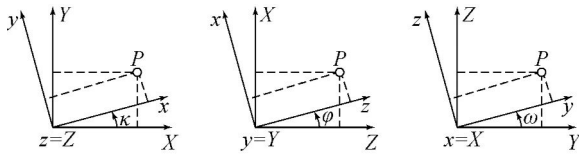


图 5 姿态解算方法

Fig. 5 Attitude evaluation method

根据上图所示,经过简单推导计算得到 3 个角度的计算公式:

$$\begin{cases} \tan \omega = \frac{R_{32}}{R_{22}} \\ \tan \varphi = \frac{R_{13}}{R_{33}} \\ \tan \kappa = \frac{R_{21}}{R_{11}} \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $R_{ij}$  为旋转矩阵(3×3)对应的行列数值。 $\omega, \varphi, \kappa$  的象限区间由公式中  $R_{ij}$  的正负号决定。

### 4 位移变形测量

位移变形测量是结构件性能和运动分析的主要方法,机翼起伏、舱门开闭等都需要精确测量关键点的三维位移与变形。位移变形测量的基础是三维点测量,即三维重建,一般的三维测量系统均为双目测量,针对稀疏、散乱分布的编码点可以准确测量;但对于密集阵列排布的非编码点,由于左右匹配的不稳定性,三维重建准确率很低。因此,本文使用多相机( $\geq 3$ )系统进行三维点测量,由于能有效地消除非编码标志点的误匹配,该方法获得了很好的测量结果。

#### 4.1 核线匹配

两幅图像之间的对极几何是图像平面与以基线为轴的平面束交线的几何,如图 6 所示。基线定义为两相机中心的连线。假定三维空间点  $M$  在两幅视图中成像,在第一幅图像上的像为  $u$ ,在第二幅图像上的像为  $u'$ 。从图中可以看出,像点  $u, u'$ , 空间点  $M$  和相机中心是共面的。核线约束是指,如果已知道其中一张图片上的像点  $u$ ,则另外一张图片上的对应像点  $u'$  必然在像点  $u$  在第二张图片上对应的核线  $l'$  上;反之亦然。

假设  $m, m'$  分别是投影点  $u, u'$  在图像坐标系

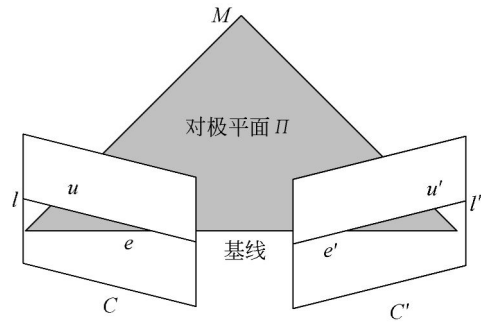


图 6 对极几何

Fig. 6 Epipolar geometry

下的齐次坐标矩阵,则极线方程可以表示为:

$$m'^T F m = 0. \quad (6)$$

其中:  $F$  是立体视觉中基础矩阵。

#### 4.2 多相机匹配

在匹配时,由于核线约束是一维约束,而且像点存在误差,仅考虑两幅图片时,很容易产生歧义,即沿某一极线搜索时有多个像点会被选为对应像点,而利用 3 幅或者 3 幅以上图像之间的多个外极线约束即可消除或大大降低匹配出错的可能性。

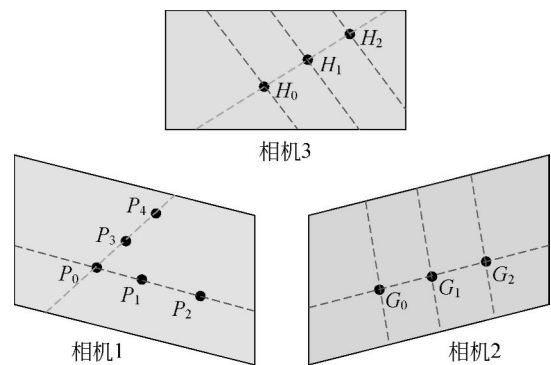


图 7 密集点阵的多相机匹配

Fig. 7 Dense lattice matching using multi-camera

针对图 7 所示的密集点阵目标,对于图像点  $P_0$ ,如果使用典型的双目匹配,在相机 1 和相机 2 下,很容易出现一对多的匹配问题( $P_0-G_0, P_0-G_1, P_0-G_2$ ),这种情况出现的概率非常高,而且一旦出现很难避免。相比之下,如果使用 3 个相机,虽然也会出现一对多问题( $P_0-H_0-G_0, P_0-H_1-G_1, P_0-H_2-G_2$ ),但是出现概率非常小,而且可以使用额外约束条件予以消除。

多相机匹配流程如图 8 所示,其中匹配约束判定条件有以下 5 项:

(1)每个非编码点必须在至少 3 张图片上出现并且两两符合外极线约束条件。

(2)3 个图像点两两三维重建获得的 3 个物体点在空间里的聚集度小于给定值  $E_a$ 。

(3)计算获得的物体点的平均值,其在每张图片上的重投影误差小于给定值  $E_r$ 。

(4)成功匹配对数等于 1。

(5)重复匹配全过程,直到成功匹配点个数不再增加。

在实验中,如果用双相机进行非编码的重建,由于匹配错误率很高,几乎没有正确重建的三维点;而使用三相机时,所有相机拍摄到的非编码点均能准确匹配并重建出来。

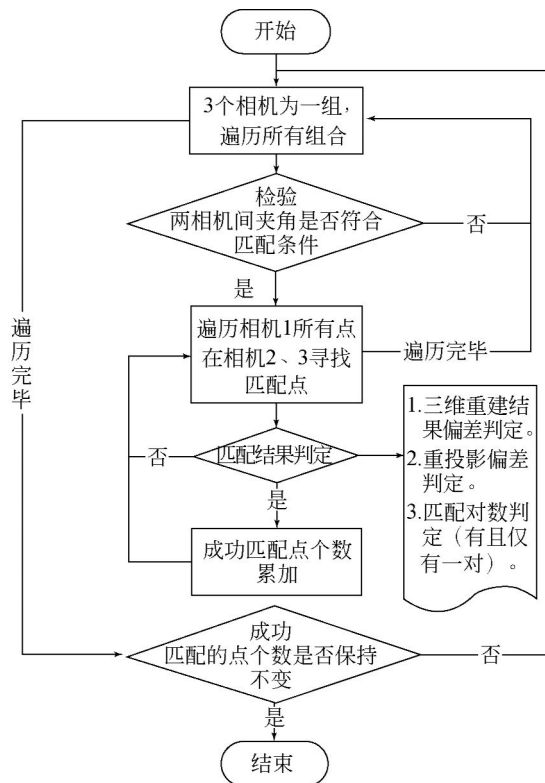


图 8 多相机匹配流程图

Fig. 8 Flow diagram of multi-camera matching

## 5 实验验证

使用上文描述的测量原理,自主开发了一套支持多相机的位移变形动态测量系统,开发平台

为 VS2010,如图 10 所示。由于现场实验图像及数据不便公开,本文仅展示一组室内模拟实验,如图 9 所示。被测物体为一个可以上下移动的金属板,幅面大小为 250 mm×400 mm,模拟飞机舱门开闭过程。机构上半部分在整个实验过程中保持不动,下半部分向下缓慢匀速运动。为了更真实地模拟机载环境,本次实验采用密集排布的非编码点作为测量点,并且使用三相机进行位移跟踪测量,实验过程中实时定位相机。实验中,下半部分使用特殊机械传动机构以保证单方向刚性平动,运动速度为 10 mm/min。从理论上分析,下半部分上所有待测点的位移及其形心轨迹应完全相同,并且运动姿态(旋转量)始终为 0,因此,可以通过对测量区域的多个点位移数据以及目标形心轨迹姿态进行分析,间接反映出两套系统的测量精度以及结果的统一性。针对该方面的测量,由于行业内还无更高精度的测量设备,因此,本文仅能使用静态测量结果与动态测量结果比对的方法。测量过程中,开始和结束阶段均为静态,可使用项目组已开发的摄影测量系统测量所有点的静态值,然后匹配同名点,获得相对位移。

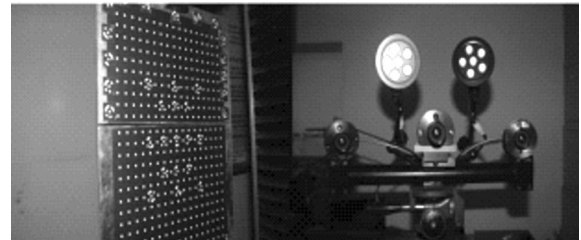


图 9 实验现场

Fig. 9 Experiment site

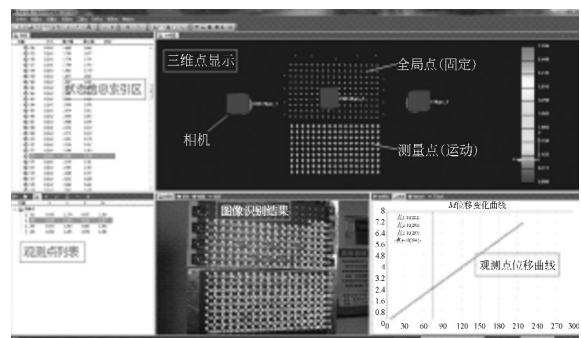


图 10 动态测量系统

Fig. 10 Dynamic measurement system

本次实验使用的相机为 BASLER 千兆网相机,型号为 acA-1300-20gm,幅面大小为  $1\ 280 \times 960$ ,像素大小为  $3.75\ \mu\text{m}$ ,最高采集速度为  $40\ \text{frame/s}$ ,镜头为施耐德  $8\ \text{mm}$  定焦镜头。本次实验的采集频率为  $5\ \text{frame/s}$ ,共采集 219 帧图像。

5.1 相机标定

用摄像机从不同角度拍摄标定板 10 幅照片,使用上文描述的标定方法,对本次模拟实验使用的 3 个相机的内参数进行标定计算,标定结果见表 1。

表 1 相机标定结果

Tab.1 Results of camera calibration

参数	相机 1	相机 2	相机 3
$K_1$	$-2.6311 \times 10^{-8}$	$-2.6867 \times 10^{-8}$	$-2.9398 \times 10^{-8}$
$K_2$	$4.9610 \times 10^{-15}$	$9.8347 \times 10^{-15}$	$1.55736 \times 10^{-14}$
$K_3$	$2.8401 \times 10^{-21}$	$-6.3670 \times 10^{-21}$	$-1.2136 \times 10^{-20}$
$P_1$	$-7.6621 \times 10^{-8}$	$4.2672 \times 10^{-8}$	$5.5658 \times 10^{-9}$
$P_2$	$4.4828 \times 10^{-8}$	$3.0775 \times 10^{-8}$	$-1.2982 \times 10^{-8}$
$B_1$	$1.3516 \times 10^{-4}$	$2.1397 \times 10^{-4}$	$9.1880 \times 10^{-5}$
$B_2$	$1.6521 \times 10^{-4}$	$-8.4905 \times 10^{-5}$	$-1.3750 \times 10^{-4}$
dX/pixel	-23.4277	2.7356	64.738
dY/pixel	-42.5415	-37.8924	12.5985
f/pixel	2189.5964	2199.4253	2200.2031
RMS(pixel)	自标定	0.023	0.030
	张正友	0.310	0.256

可以看出,本文描述的柔性自标定方法重投影误差比张正友提出的标定方法低一个数量级,已完全满足工业测量的精度要求。

5.2 轨迹姿态测量

轨迹姿态数据可由单相机采集的全部图像数据计算获得,为评价该系统的测量精度,本文分层收取 11 帧数据进行比对,如表 2 所示。

$d\omega, d\varphi, d\kappa$  3 列数据为物体形心的相对姿态,可以看出,所有数据均小于  $0.000\ 5^\circ$ ,基本接近于

0,验证了本次实验姿态始终不变的假设。

$dX, dY, dZ, dD$  4 列数据为形心的轨迹数据。第 219 帧数据的 dD 值与 XJTUDP 系统的测量值(表 3)比较,XJTUDP 系统测量精度已被证明在  $0.01\ \text{mm}/1\ \text{m}$ 。两者测量偏差最大为  $0.003\ 2\ \text{mm}$ ,最小偏差为  $0.000\ 7\ \text{mm}$ ,因此,可以认为两系统测量精度基本相同。系统轨迹姿态模块的测量精度可达到  $0.01\ \text{mm}/1\ \text{m}$ 。

表 2 轨迹姿态测量结果

Tab.2 Trajectory and attitude measuring results

状态号	$d\omega/(\circ)$	$d\varphi/(\circ)$	$d\kappa/(\circ)$	dX/mm	dY/mm	dZ/mm	dD/mm
20	0.000 2	-0.000 2	-0.000 0	0.009 8	0.523 6	-0.009 4	0.523 8
40	-0.000 3	-0.000 3	-0.000 1	0.010 0	1.194 6	0.000 2	1.194 7
60	0.000 0	0.000 0	-0.000 0	0.024 7	1.853 4	0.050 7	1.854 3
80	0.000 2	-0.000 6	-0.000 0	0.016 4	2.512 3	0.084 6	2.513 8
100	-0.000 1	-0.000 2	-0.000 1	0.067 3	3.194 2	0.061 0	3.195 5
120	0.000 2	-0.000 2	0.000 0	0.073 6	3.847 1	0.106 8	3.849 3
140	0.000 1	-0.000 0	-0.000 0	0.088 8	4.516 9	0.136 1	4.519 8
160	0.000 1	0.000 0	-0.000 1	0.130 9	5.189 2	0.102 6	5.191 9
180	0.000 4	-0.000 1	-0.000 1	0.114 0	5.851 4	0.189 5	5.855 6
200	-0.000 1	-0.000 1	-0.000 1	0.148 1	6.525 8	0.122 6	6.528 6
219	0.000 1	0.000 2	-0.000 0	0.142 6	7.143 5	0.207 1	7.147 9

表 3 XJTUDP 系统获得的末状态位移结果

Tab. 3 Displacement measuring results of XJTUDP

(mm)

状态号	最大位移	最小位移	平均位移	标准差
219	7.151 1	7.146 3	7.148 6	0.001 6

### 5.3 位移变形测量

为评价该系统位移变形测量精度,本文分层抽取 11 个状态位移数据进行比对,如表 4 所示。其中,系统的位移数据标准差均低于 0.005 mm。

为了对比出系统的测量精度,本实验将所有数据与上文获得的轨迹数据结果进行比对,统计结果如表 4 所示,对比两份结果,可得两系统在当前实验幅面下位移测量偏差平均值低于 0.005 mm。

将系统测量偏差转换到标准 1 m 幅面下,累计误差通过合成为:

$$0.005 \text{ mm} \times 4 + 0.005 \text{ mm} \times 4 + 0.01 \text{ mm} = 0.05 \text{ mm}.$$

其中:第一个  $0.005 \text{ mm} \times 4$  代表系统自身的跳动偏差;第二个  $0.005 \times 4$  代表系统与 XJTUDP 的相对偏差;0.01 为 XJTUDP 的自身偏差,三者互相独立,可线性叠加,因此可以用三者的算数和表示误差累计的最大值,即测量精度。

综合分析,系统位移变形测量模块的精度为 0.05 mm/1 m,同时,能够成功解算所有非编码标志点,直接证明了多相机匹配方法的有效性。

表 4 位移测量结果

Tab. 4 Displacement measuring results

(mm)

状态号	最大位移	最小位移	平均位移	标准差	轨迹系统	偏差
20	0.533 9	0.511 1	0.520 3	0.004 6	0.523 8	0.003 5
40	1.199 5	1.178 9	1.188 2	0.004 4	1.194 7	0.006 5
60	1.866 6	1.845 7	1.856 3	0.004 0	1.854 3	0.002 0
80	2.531 2	2.509 2	2.519 8	0.004 4	2.513 8	0.006 0
100	3.201 8	3.173 3	3.186 3	0.004 6	3.195 5	0.009 2
120	3.868 8	3.844 6	3.853 6	0.004 2	3.849 3	0.004 3
140	4.528 3	4.507 9	4.519 4	0.004 0	4.519 8	0.000 4
160	5.200 9	5.177 4	5.188 4	0.004 5	5.191 9	0.003 5
180	5.871 4	5.844 6	5.857 4	0.004 7	5.855 6	0.001 8
200	6.537 7	6.517 0	6.524 9	0.004 0	6.528 6	0.003 7
219	7.165 6	7.140 6	7.153 6	0.004 9	7.147 9	0.005 7

## 6 结 论

针对飞机测试行业在线测量的需求,本文基于近景摄影测量理论和立体视觉技术提出并实现了一种针对机身结构件轨迹、姿态、位移、变形等多种运动数据的动态视觉测量系统。对系统涉及

的关键技术进行了研究和改进,包括:相机自标定;相机动态定位与消抖;轨迹姿态快速求取;多相机立体匹配等。实验结果表明:相机标定的重投影误差小于 0.03 pixel,在有效消除相机抖动的同时,轨迹姿态测量精度可达 0.01 mm/1 m,关键点位移变形测量精度可达 0.05 mm/1 m,基本满足飞机测试行业精度和可靠性的测量标准。

## 参考文献:

- [1] BURNER A W, LIU T SH. Videogrammetric model deformation measurement technique[J]. *Journal of Aircraft*, 2001, 38 (4): 745-754.
- [2] BLACK J T, PITCHER N A, REEDER M F, et al.. Videogrammetry dynamics measurements of a lightweight flexible wing in a wind tunnel [J]. *Journal of Aircraft*, 2010, 47 (1): 172-180.
- [3] BURNER A W, LOKOS W A, BARROWS D A. Aeroelastic deformation; adaptation of wind tunnel measurement concepts to full-scale vehicle flight testing [C]. *Symposium on Flow Induced Unsteady Loads and the Impact on Military Applications; Budapest, RTO/AVT-123, April 25-29, 2005*.
- [4] JONES T W, LUNSFORD C B, GRAVES S S. Design and development of a real-time model attitude measurement system for hypersonic facilities [C]. *The 43<sup>rd</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting, Reno; Nevada, AIAA-2005-1411, 10-13 January 2005*.
- [5] KVATERNIK R G, EURE K W, JUANG J. Exploratory studies in generalized predictive control for active gust load alleviation [C]. NASA TM, 2006:214296.
- [6] BURNER A W, LIU T SH, DELOACH R. Uncertainty of videogrammetric techniques used for aerodynamic testing [C], *The 22<sup>nd</sup> AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference St. Louis Missouri, AIAA-2002-2794, 24-26 June 2002*.
- [7] MCGOWAN A-MR, WASZAK M R. NASA's Morphing project research summaries in fiscal year 2002 [C]. NASA TM-2005-213266L-18385, February 2005.
- [8] ROY J P, LIU T SH, BRITCHER C P. Extracting dynamic loads from optical deformation measurements [C]. *The 47<sup>th</sup> AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Newport, Rhode Island, AIAA 2006-2187, 1-4 May 2006*.
- [9] JOSEF B A D, DAFNIS A, BAARS A, et al.. Aero-structural dynamics experiments at high reynolds numbers [J]. *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, 2010, 109: 389-424.
- [10] VEERMAN H P J, KANNEMANS H, JENTINK H W. High accuracy in-flight wing deformation measurements based on optical correlation technique [C]. *18<sup>th</sup> SFTE (EC) Symposium, Manching; Germany, 22-24 September 2008*.
- [11] 梁晋, 肖振中, 唐正宗, et al.. 大型飞机风洞变形测量的相机标定研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2009(3): 55-59.
- LIANG J, XIAO Z Z, TANG Z Z, et al.. Large space camera calibration for three-dimensional videogrammetric vibration measurement of large aeroplane model in wind tunnels [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2009(3): 55-59. (in Chinese)
- [12] 刘建伟, 梁晋, 梁新合, et al.. 大尺寸工业视觉测量系统 [J]. *光学精密工程*, 2010, (1): 126-134.
- LIU J W, LIANG J, LIANG X H, et al.. Industrial vision measuring system for large dimension work-pieces [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010(1): 126-134. (in Chinese)
- [13] 胡浩, 梁晋, 唐正宗, et al.. 大视场多像机视频测量系统的全局标定 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(2): 369-378.
- HU H, LIANG J, TANG Z Z, et al.. Global calibration for multi-camera videogrammetric system with large-scale field-of-view [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(2): 369-378. (in Chinese)
- [14] 王习文, 马军, 陈娟, et al.. 飞机三维姿态测量的角平分线方向向量法 [J]. *光学精密工程*, 2010 (2): 369-376.
- WANG X W, MA J, CHEN J, et al.. Direction vector method of angle bisector lines for measuring aircraft's 3D attitude [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010(2): 369-376. (in Chinese)
- [15] 赵立荣, 柳玉晗, 朱玮, et al.. 光电经纬仪单站空间余弦及多站面面交汇的飞机姿态测量 [J]. *光学精密工程*, 2009(11): 2786-2793.
- ZHAO L R, LIU Y H, ZHU W, et al.. Measurement of aircraft attitude by spatial cosine relationship in single-station and planes to intersection in multi-station of electro-optical theodolite [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009 (11): 2786-2793. (in Chinese)
- [16] 顾征, 苏显渝. 三目自适应权值立体匹配和视差校准算法 [J]. *光学学报*, 2008(4): 734-738.
- GU Z, SU X Y. An algorithm based on adaptive support-weight and disparity adjustment for trinocular stereo-matching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008(4): 734-738. (in Chinese)

## 作者简介:



李磊刚(1987—),男,陕西宝鸡人,博士研究生,2009年、2010年于西安交通大学分别获得学士、硕士学位,主要从事三维光学测量方面的研究。E-mail: liracfe@foxmail.com



郭成(1948—),男,山东潍县人,博士,教授,博士生导师,1975年、1981年、1999年于西安交通大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事冲压件质量控制与模具 CAD/ CAE/ CAMPDM、金属材料近净成形和先进材料制备与成形过程控制方面的研究。E-mail: guocheng@mail.xjtu.edu.cn

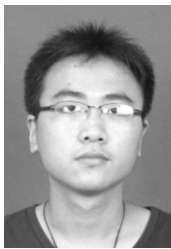
## 导师简介:



唐正宗(1982—),男,山东日照人,博士研究生,2005年、2008年于西安交通大学分别获得学士、硕士学位,主要从事三维光学测量方面的研究。E-mail: nevret@gmail.com



梁晋(1968—),男,河南郑州人,博士,教授,博士生导师,1990年、1993年、2001年于西安交通大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事机电控制、机器视觉等方面的研究。E-mail: liangjin@mail.xjtu.edu.cn



崔学龙(1988—),男,山东德州人,硕士研究生,2010年于青岛科技大学获得学士学位,主要从三维光学测量方面的研究。E-mail: cuixuelonga@163.com

## ●下期预告

## 基于 NiTi 合金丝的反射镜柔性支撑结构应力补偿设计

曹乃亮,徐宏,辛宏伟,袁野,李志来,杨会生  
(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林长春 130033)

为解决大口径反射镜柔性支撑结构中柔性槽根部应力集中问题,提出一种将 NiTi 记忆合金丝复合于柔性槽周边的结构方案,借助其预应变产生的拉应力,在保证支撑结构柔性的前提下,降低柔性槽根部的应力。首先,建立了柔性槽根部的应力分布方程,并得出了柔性槽危险截面位置。然后,建立了 NiTi 合金丝的一维本构方程,设计了桥型和 U 型两种复合方案,并分别进行了有限元分析。结果表明,采用 U 型复合的柔性支撑结构的应力改善明显优于桥型复合结构,且对结构柔性影响较小。以 NiTi 合金丝的拉力  $F$  为设计变量,以支撑结构的最大应力  $P$  及变形量  $\delta$  为优化目标,对 U 型复合结构进行参数优化设计。优化结果表明,在  $F$  为 200 N 时有最优解, $P$  由 76 MPa 降到 37.9 MPa, $\delta$  由 0.031 mm 降到 0.028 mm,并且最大应力位置偏离柔性槽根部危险区域。对所提出的 U 型复合方案进行了随机振动试验,试验结果表明,该应力补偿设计有效降低了柔性支撑结构的最大应力。