

文章编号: 0258-7025(2009)01-0182-07

# 线结构光三维轮廓测量系统的标定方法

张维光 赵宏 张琦 周翔

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘要** 在线结构光 360° 三维轮廓测量方法中, 采用多图像传感器系统可实现物体整体轮廓及局部形貌细节同时高精度测量。为了实现测量系统多传感器同时标定, 提出一种线结构光多传感器三维轮廓测量系统的标定方法。以直接线性变换法为系统标定模型, 设计含有多特征点的靶标控制场来解算系统模型参数, 应用二元全区间插值误差校正方法对物方坐标计算误差进行校正, 实现对整个测量系统的标定。并提出了一种基于二维离散傅里叶变换的多分辨率标定靶标特征点提取的新方法。论述了线结构光四传感器测量系统的标定过程。实验结果表明这种标定方法可实现多传感器测量系统高精度同时标定。

**关键词** 测量; 三维测量; 标定; 直接线性变换法; 离散傅里叶变换; 线结构光

**中图分类号** TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093601.0182

## Calibration Method for Three-Dimensional Measurement System Based on Linear-Structure Light

Zhang Weiguang Zhao Hong Zhang Qi Zhou Xiang

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering,  
Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shanxi 710049 China)

**Abstract** Several cameras are used in three-dimensional(3D) measurement system with linear-structure light, to measure whole profile and partial detail of complex object with high-precision and 360° measurement range. A measurement system, which is composed of four cameras, has been developed. A new calibration method is presented to calibrate the cameras simultaneously. It uses direct linear transformation model and a self-designed drone control field with many control points to calculate the model parameters, and adopts duality interpolation to rectify the 3D coordinates of measured object. The calibration process of the system is particularly described. Furthermore, a novel method, which is based on two-dimensional discrete Fourier transform, to extract multi-resolution control points on drone is introduced. The result shows the method can calibrate several cameras synchronously for multi-sensor measurement system.

**Key words** measurement; three-dimensional measurement; calibration; direct linear transformation; discrete Fourier transform; linear-structure light

## 1 引言

基于线结构光的三维物体形貌测量方法是光学三维传感技术之一, 已成功应用于工业测量、逆向工程、生物医学等领域, 具有重要的研究意义和应用价值<sup>[1,2]</sup>。线结构光三维形貌测量系统可分为单图像传感器系统和多图像传感器系统<sup>[3]</sup>。单图像传感器

系统 360° 形貌测量采用工件旋转的方式完成, 这种系统的缺点是在测量时图像传感器放大倍率在测量范围内基本不变, 对测量截面曲线曲率半径相对小的形貌细节测量误差较大, 且要求工件旋转台的运动精度较高, 采用多图像传感器系统可以有效地解决这些问题。然而, 多图像传感器系统的标定技术

收稿日期: 2008-01-07; 收到修改稿日期: 2008-05-04

基金项目: 国家 973 计划(2005CB724106)和国家自然科学基金(50575169)资助课题。

作者简介: 张维光(1973-)男, 博士研究生, 主要从事智能化光电检测及机器人视觉技术方面的研究。

E-mail: Wg\_zhang05@126.com

导师简介: 赵宏(1964-)男, 教授, 主要从事智能化光电检测、实时在线检测以及机器人视觉技术、光纤生物信息检测以及生物组织成像技术等方面的研究。E-mail: zhaohong@mail.xjtu.edu.cn

是影响测量精度和测量效率的重要因素。测量系统常用的标定技术有: 细丝散射法、齿形靶标法以及交比不变法等<sup>[4~6]</sup>。这些标定方法都要求精密加工的标准模型, 且模型的定位精度要求很高, 标定难度较大。此外这些标定方法适用于单传感器系统的校准, 对于多传感器测量系统, 需考虑多传感器之间的位置关系, 测量系统后续的数据融合难度大。文献[7]介绍了双图像传感器系统的标定, 这种标定方法的靶标分辨率固定, 摄像机畸变分量采用有限项近似的方法处理, 对于放大倍率相差大的多图像传感器标定误差较大。

本文针对航空发动机叶片 360°高精度测量的要求设计了多放大倍率的四图像传感器线结构光三维形貌测量系统。根据测量系统标定的特点及要求, 利用机器视觉系统标定的直接线性变换法模型解算模型参数, 应用设计的可进行多分辨率控制点提取的靶标对四图像传感器系统进行了标定。介绍了多分辨率靶标特征点的二维离散傅里叶变换提取方法及四图像传感器在同一靶标下标定的过程, 并给出了测量结果。

## 2 测量系统

图 1 系统是为满足航空发动机叶片 360°高精度测量要求而设计的。叶片测量的要求是测量气动数据曲线的形状。叶片尾缘处气动数据曲线曲率半径接近于 1 mm。测量系统由四个激光线结构光发生器、四个图像传感器及带动载物台上下运动的机械机构组成。传感器 1 和 3 用于测量叶片的叶盆和叶背表面轮廓, 该部分气动数据曲线曲率变化小; 传感

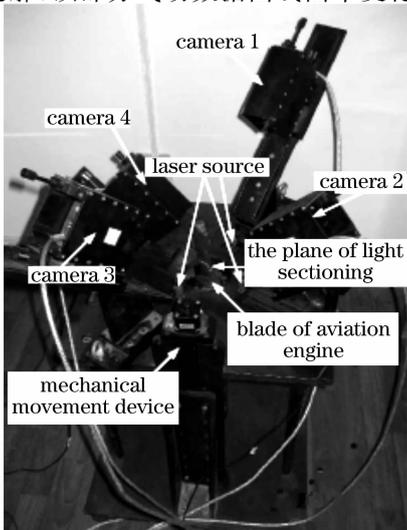


图 1 测量系统

Fig. 1 Measurement system

器 2 和 4 要求能对叶片前缘尾缘的形貌细节进行测量。四激光线结构光发生器经过调整, 使光带中心在同一平面内。被测物体置于中间的载物台上, 用一个精密的运动机构带动上下运动。图像传感器 2 和 4 可以绕系统中心在一定范围内旋转, 以此来对准叶片前缘尾缘处的形貌细节。物体上下运动时, 激光发生器产生的光会在物体表面形成光带, 光带的形状包含有三维物体轮廓的截面形状信息。四图像传感器从四个方向获得光带的图像, 经过标定解算得到物体一个截面的空间分段曲线, 对分段曲线进行数据处理得到物体一个截面的测量数据。根据测量精度要求, 设置上下运动机构的运动步长。工件在系统中上下运动一次, 完成一次测量过程。

## 3 系统标定方法

### 3.1 摄像机的数学模型

在测量过程中, 各摄像机获得的只是光带在一定范围内的图像, 两摄像机彼此获得的光带图像重叠部分少且在实际测量中存在遮挡现象, 因此机器视觉中的双目视差标定理论不能满足系统的标定要求。系统各摄像机的标定必须采用单摄像机标定的方法完成。工业测量中单摄像标定方法可以分为两类: 摄像机内外参数标定方法和直接线性变换法<sup>[8]</sup>。摄像机内外参数标定法可以标定出摄像机内参数和外参数, 畸变参数一般要建立非线性畸变模型或通过插值的方法完成。直接线性变换法通过解算三维空间坐标与成像平面之间的线性模型, 获得变换关系的参数, 对模型计算误差用一定的校正算法处理来完成对系统的标定。本系统的标定采用直接线性变换方法。直接线性变换法共线方程的数学模型如图 2 所示。 $O-XYZ$  为物方空间坐标系,  $\sigma-xy$  为成像平面坐标系,  $S-xyz$  为像空间坐标系,  $S$  为摄影中心。成像平面主点的坐标为  $o(x_0, y_0)$ , 与其对应的物方空间点的坐标为  $O(X_0, Y_0, Z_0)$ 。物点  $A$  的坐标为  $(X, Y, Z)$ , 其在像空间坐标系中的坐标为  $(X_s, Y_s, Z_s)$ , 成像的像点  $a$  的坐标为  $(x, y)$ 。根据成像过程满足物点  $A$ , 像点  $a$  及摄影中心  $S$  共线的条件可推导出关系式<sup>[8]</sup>

$$\begin{cases} l_1 X + l_2 Y + l_3 Z + l_4 + \\ x(l_9 X + l_{10} Y + l_{11} Z + 1) = 0, & (1a) \\ l_5 X + l_6 Y + l_7 Z + l_8 + \\ y(l_9 X + l_{10} Y + l_{11} Z + 1) = 0, & (1b) \end{cases}$$

式中  $l_1 \sim l_{11}$  是摄像机内、外参数的函数<sup>[8]</sup>。(1a)式表示平面  $\beta$  的表达式, (1b)式表示平面  $\alpha$  的表达式,

AaS 三点共线的条件是两平面的交线。至少应用 6 组物点与像点的对应坐标,就可解算出  $l_1 \sim l_{11}$  参数。

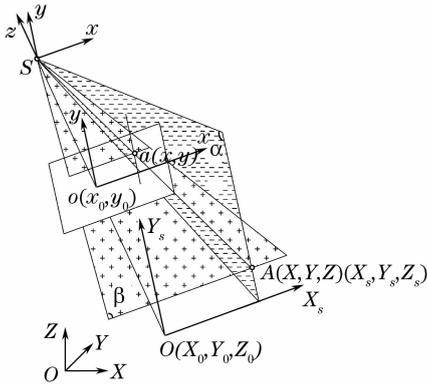


图 2 直接线性变换法共线方程示意图  
Fig.2 Schematic of colinear equation of direct linear transformation

测量系统中光带的中心平面不变,标定光带中心平面与成像平面之间的关系,选取光带中心平面为物方空间坐标系  $Z=0$  的平面。令(1)式中  $Z=0$  简化为

$$\begin{cases} l_1 X + l_2 Y + l_4 + x(l_9 X + l_{10} Y + 1) = 0 \\ l_5 X + l_6 Y + l_8 + y(l_9 X + l_{10} Y + 1) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

本系统采用(2)式进行标定。

### 3.2 标定控制场及特征点的提取

为了解算出成像平面与光带中心平面之间最佳的映射关系所对应的  $l_1 \sim l_{11}$  参数,求解(2)式中的物点  $A(X, Y, 0)$  及所对应的像点  $a(x, y)$  在测量范围内的数量越大,迭代求解  $l_1 \sim l_{11}$  参数收敛性越好,同时通过成像平面坐标  $a(x, y)$  求解物点坐标  $A(X, Y, 0)$  应用插值方法进行的误差校正范围越小,所标定的精度越高。设计系统标定所使用的具有两级分辨率的标准靶标控制场如图 3 所示。控制场中的物点坐标为两条线的交点。摄像机 1 和 3 放大倍率相对较小,标定所用物点坐标为图 3 中粗线的交点。摄像机 2 和 4 放大倍率大,标定所用物点

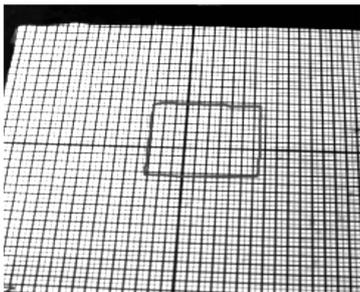


图 3 标定所用标准控制场(摄像机 1)  
Fig.3 Control field of coordination (camera 1)

坐标为图 3 中粗细线所有的交点。图 4 为摄像机 2 在测量时的标定靶标图像,在一次测量中的范围如图 3 矩形区域所示。摄像机 3 标定靶标图像与图 3 类似,摄像机 4 的标定靶标图像与图 4 类似,成像平面中特征像点的坐标采用如下步骤求得。

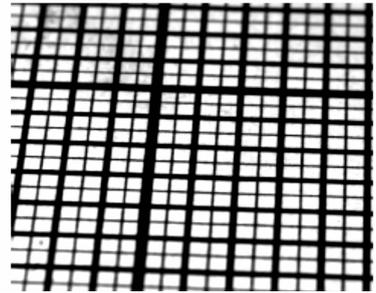


图 4 标定所用标准控制场(摄像机 2)  
Fig.4 Control field of coordination (camera 2)

1)若图 3 所示控制场的数字图像为  $f(x, y)$  (大小  $N \times N, N = 2^m$ ),其二维傅里叶变换的表达式为

$$F(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{[-j2\pi(ux+vy)/N]} \quad (3)$$

在进行二维傅里叶变换时,应用傅里叶变换中心化平移性质将变换后图像的直流成分移至图像的中心  $(N/2, N/2)$ 。

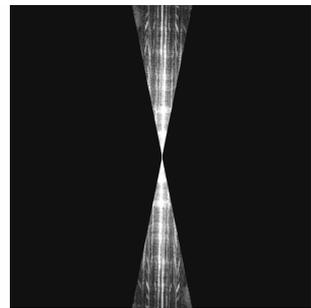


图 5 扇形区域滤波后的频谱图  
Fig.5 Spectrum after fan-shaped filtering

2)根据图像中线条与其频谱的对应关系,  $f(x, y)$  中两个方向线条的频谱在频谱图  $F(u, v)$  中分布的区域与它们在  $f(x, y)$  的方向垂直。以  $F(u, v)$  中心为旋转中心,在  $180^\circ$  范围内将  $F(u, v)$  分割成  $M$  个扇形区域,为了保留  $f(x, y)$  中图像水平方向线条的频谱,选用图 5 所示的扇形滤波器对  $F(u, v)$  进行滤波得到  $F'(u, v)$ ,图 5 所示扇形区域是所分的  $M$  份扇形区域之一,它的边缘起始位置与  $f(x, y)$  中线条的方向有关,  $M$  的取值与  $f(x, y)$  中线条的间距有关。图 5 中保留的大部分是图 3 中水平方向线条的频谱。

3)采用下式傅里叶逆变换得到只含有水平方向线条的图像。

$$f^h(x, y) = \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} F'(u, v) e^{[j2\pi(ux+vy)/N]} \right\}, \quad (4)$$

4) 设

$$D(u, v) = \left[ \left( u - \frac{N}{2} \right)^2 + \left( v - \frac{N}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

采用下式低通滤波器对  $F(u, v)$  滤波,

$$F^s(u, v) = \begin{cases} F(u, v) & |D(u, v)| \leq 1 \\ 0 & \text{other} \end{cases}. \quad (6)$$

对  $F^s(u, v)$  进行逆二维傅里叶变换, 得到背景图像  $f^b(x, y)$

5) 对  $f^h(x, y)$  和  $f^b(x, y)$  用下式作图像差分运算, 得到增强的水平方向的线条图像。

$$I(x, y) = \begin{cases} k_2 * |f^b(x, y) - f^h(x, y)| & f^b(x, y) - f^h(x, y) > k_1 \\ 0 & \text{other} \end{cases}, \quad (7)$$

式中  $k_1$  系数为用于去除由于标定靶面不平摄像机成像质量等因素引起的噪声,  $k_2$  系数为调整差分后的图像中含有线条区域的灰度值。

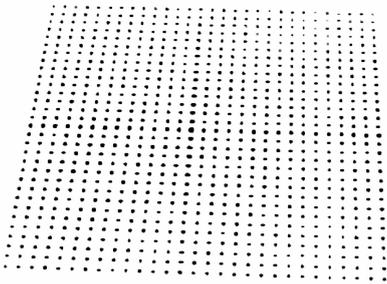


图 6 提取图 3 中两粗线条相交点的图像

Fig. 6 Extraction control points of wide intersection lines of image in Fig3

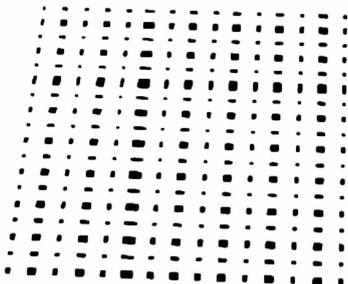


图 7 提取图 4 中线条相交点的图像

Fig. 7 Extraction control points of all intersection lines of image in Fig4

6) 调整 2) 中的滤波器方向重复 3)~5) 步骤, 得到另一方向的线条图像。

7) 用 5), 6) 两步所得图像计算得到两条线相交

区域的同时, 若附加判断相交线宽的条件, 可求得图像 3 所示靶标中粗线的相交图像如图 6 所示, 对于图 4 所示的靶标图像求相交区域时, 不用附加条件, 求得相交粗细线的区域图像如图 7 所示。

8) 上述步骤得到的是相交直线的相交区域, 对图 6 和 7 进行图像边缘检测得到相交区域的边缘像素点, 假定每组边缘点为某圆的圆周上的点, 应用最小二乘确定圆心的算法计算出圆心作为两相交直线交点的坐标——像方特征点坐标  $o_i(x_i, y_i)$ 。

### 3.3 未知点空间坐标的求解

1) 若像方特征点坐标为  $o_i(x_i, y_i)$ , 与其各自相对应的物方控制场的直线交点坐标为  $O_i(X_i, Y_i, 0)$ 。将标定范围内所有  $o_i(x_i, y_i)$  和  $O_i(X_i, Y_i, 0)$  代入 (2) 式组成超定方程组, 用最小二乘法计算出  $l_1 \sim l_{11}$  参数<sup>[9]</sup>。

2) 将  $o_i(x_i, y_i)$  和  $l_1 \sim l_{11}$  参数代入 (2) 式计算反求成像平面点相对应的光带中心平面点的坐标  $O_i^e(X_i^e, Y_i^e, 0)$ 。应用下式计算直接线性变换模型物方各控制点的计算坐标误差,

$$\begin{cases} D_x(i) = X_i - X_i^e \\ D_y(i) = Y_i - Y_i^e \end{cases}. \quad (8)$$

3) 成像平面上任一点  $a(x, y)$  物方坐标  $A(X, Y, 0)$  的求解。将  $a(x, y)$  及  $l_1 \sim l_{11}$  参数代入 (2) 式, 求得坐标  $A'(X', Y', 0)$ 。从透镜成像系统畸变测量及校正模型可以得出<sup>[10, 11]</sup>: 成像系统畸变分量是矢量且在某一点处畸变分量可以分解成相互垂直的两个分量分别进行求解; 每一个方向的分量是摄像机坐标系中坐标的函数, 将摄像机坐标系中的坐标变换到世界坐标系下, 则两个方向的畸变分量成为世界坐标的函数。  $D_x, D_y$  主要是由透镜成像畸变引起的, 因此  $D_x, D_y$  分别是世界坐标  $X, Y$  的函数, 在世界坐标系中它们之间构成不规则数据场<sup>[12]</sup>, 文献<sup>[13]</sup>给出了根据  $D_x, D_y$  应用双线性插值求解  $X, Y$  的方法, 但求解误差较大。本文采用二元全区间插值方法求解  $X, Y$ <sup>[14]</sup>。若  $A'(X', Y', 0)$  落在  $O_i(X_i, Y_i, 0)$  中的四个点中间, 沿  $X$  方向前后各取 4 个坐标, 沿  $Y$  方向前后各取 4 个坐标:

$$\begin{aligned} X_{i-4} < X_{i-3} < X_{i-2} < X_{i-1} < X' < \\ & X_{i+1} < X_{i+2} < X_{i+3} < X_{i+4}, \\ Y_{i-4} < Y_{i-3} < Y_{i-2} < Y_{i-1} < Y' < \\ & Y_{i+1} < Y_{i+2} < Y_{i+3} < Y_{i+4}. \end{aligned}$$

$$\begin{cases} D_x(X', Y') = \sum_{l=1}^{i+7} \sum_{m=i}^{i+7} \left( \prod_{k=i, k \neq l}^{i+7} \frac{X' - X_k}{X_l - X_k} \right) \times \\ \left( \prod_{n=i, n \neq m}^{i+7} \frac{Y' - Y_n}{Y_m - Y_n} \right) D_X(l, m) \\ D_y(X', Y') = \sum_{l=1}^{i+7} \sum_{m=i}^{i+7} \left( \prod_{k=i, k \neq l}^{i+7} \frac{X' - X_k}{X_l - X_k} \right) \times \\ \left( \prod_{n=i, n \neq m}^{i+7} \frac{Y' - Y_n}{Y_m - Y_n} \right) D_Y(l, m) \\ \begin{cases} X = X' + D_x \\ Y = Y' + D_y \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

3.4 各摄像机的标定

测量系统中摄像机 2 和 4 的放大倍率大, 测量范围比摄像机 1 和 3 的小。为了使四个摄像机标定统一于一个物方坐标系, 标定时摄像机像方主点(成像图像的中心点)对准物方主点(测量范围的中央)。摄像机 1 和 3 对准所选物点坐标原点(图 3 中两条粗线的交点), 摄像机 2 和 4 根据测量范围的要求选择对准靶面上某处两线的相交点(如图 8)。标定过程和任意空间坐标反求过程四摄像机均相同。将四摄像机测量数据统一于世界坐标系下通过两步完成: 首先根据测量时摄像机主点对准的位置之间的关系, 将摄像机 2 和 4 的测量数据坐标平移到摄像机 1 和 3 对准的坐标系下。其次, 由于标定时存在对准误差, 标定靶面上的一点在四个摄像机上对应点的坐标会有小量的差别, 减小这种测量误差的方法是采用文献[15]中矢量场同一化算法中的单一值分解算法, 具体的步骤如下: 取两摄像机标定时共同视场中控制点经过上述第一步处理后的坐标分别组成数据集  $E_1, E_2$ , 总数为  $N$  个, 可分别用矢量  $\vec{E}_1^i, \vec{E}_2^i$  表示。构造函数

$$\Delta f_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|\vec{E}_1^i - \vec{R}_k \vec{E}_2^i - \vec{T}_k\|^2, \quad (10)$$

求解(10)式取得最小值时对应的旋转矩阵  $\vec{R}_k$  和平移矢量  $\vec{T}_k$  作为两摄像机测量坐标统一于一个世界

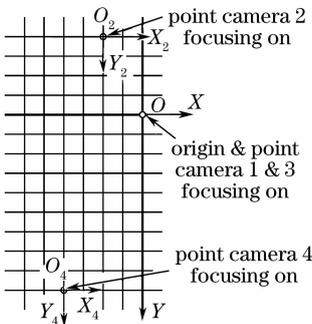


图 8 测量某一物体时的坐标系

Fig. 8 Coordination system when an object is measured

坐标系的旋转矩阵和平移矢量。经过上述两步可将四个摄像机的测量数据统一于一个坐标系下的准确度进一步提高。旋转矩阵  $\vec{R}_k$  和平移矢量  $\vec{T}_k$  的求解参阅文献[15]。

4 实验及结果

图 3 系统的靶标用绘图的方式制作, 粗细线间距大约为 1.5 mm, 线间准确间距在测量精度为 0.001 mm 的测微目镜下测得, 靶纸中较粗线的平均宽度为 0.439 mm, 细线的平均宽度为 0.140 mm, 成像系统的像素点为  $1280 \times 1024$ , 激光器发射的线结构光的宽度在测量范围内小于 0.5 mm, 摄像机 1 和 3 的成像透镜的参数为:  $f = 35$  mm, F/1.7。摄像机 2 和 4:  $f = 25$  mm, F/1.4, 测量时垂直方向机械机构运动长为 0.5 mm。图 3 所标定的测量范围约为  $80$  mm  $\times$   $90$  mm。图像提取特征点时先分块成左右两个  $1024 \times 1024$  的图像, 按 3.2 节的方法提取, 在提取过程的步骤 5) 后将左右两图像重新拼接成  $1280 \times 1024$  的图像, 然后进行下面的步骤处理结果佳。经过解算图 3 标定的计算坐标误差,  $X$  方向误差  $D_x(i)$  范围  $(-0.3, 0.2)$ ,  $Y$  坐标误差  $D_y(i)$  范围  $(-0.2, 0.3)$ , 控制点的个数为  $29 \times 31$ , 误差用图示的形式如图 9 所示。

应用上述标定的系统对一直径为 39.900 mm 的圆柱的圆截面进行测量。光带中心提取采用沿光带边缘的法线方向使用重心法求得。测量结果如图

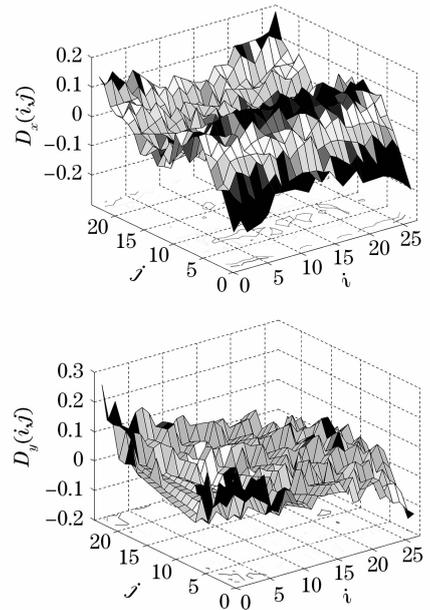


图 9 标定控制场坐标的计算误差

Fig. 9 Calculated coordination error of control points

10 所示,应用最小二乘拟合的方法求得圆心,在未使用坐标误差的插值算法时,测得圆半径均值为 19.938 mm,半径的标准差为 0.081 mm,使用坐标误差的插值算法后圆形半径的均值为 19.940 mm,半径的标准差为 0.058 mm。应用迭代求解最近点算法(ICP)<sup>[15]</sup>将测量数据处理成一个闭合的曲线(如图 11),求得均值为 19.944 mm,半径的标准差为 0.0544 mm。对航空发动机叶片测量的结果如图 12 所示,图 13 是经过 ICP 算法形成测量闭合曲线,也就是发动机叶片的气动数据曲线。图 14 为测量叶片部分形貌的三维显示图。

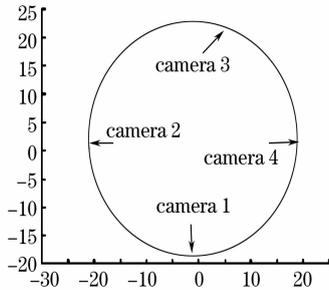


图 10 圆柱截面测量结果

Fig. 10 Measurement result of section of a column

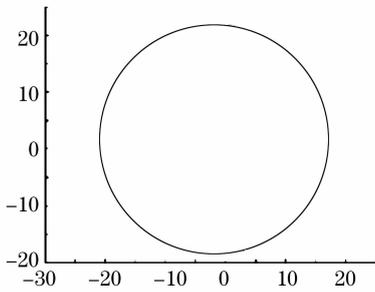


图 11 圆柱截面经 ICP 算法处理

Fig. 11 Measurement result of section of a column after iterative closest point(ICP) algorithm

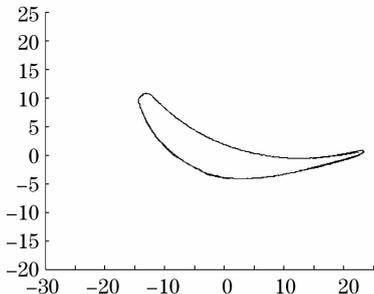


图 12 叶片某一截面测量数据

Fig. 12 Measurement result of a section of blade

分析系统测量误差产生的原因有以下几个方面:线结构光带中心与标定靶面的重合程度误差;靶纸上标准距离的测量误差;标定时像平面主点与物

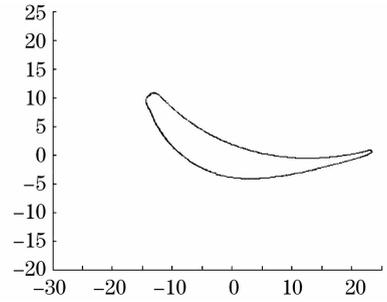


图 13 经 ICP 算法处理后的截面数据

Fig. 13 Measurement result of cylinder section of blade after ICP algorithm

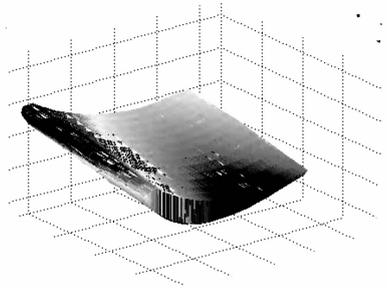


图 14 叶片部分三维形貌

Fig. 14 Some portion of 3D profile of a measured blade

方坐标原点的对准误差;光带图像中心提取误差。从圆柱测量结果可以看出,均值接近标准量,测量数据的标准差大。由此可以看出标定方法及标定过程中采用的空间坐标校正算法以及四摄像机的测量数据世界坐标统一算法可以使多传感器测量系统测量精度接近于 0.05 mm。引起测量位置坐标标准差大的主要原因是光带图像中心提取误差引起的,改进的措施是改善光带中心提取算法并采用曲线光滑的算法对点的坐标误差进行校正。

### 5 结论

根据航空发动机叶片测量的特点设计了基于线结构光的多传感器测量系统。论述了一种适用于线结构光多传感器同时标定的方法。同时设计了一种可实现两级分辨率的标定靶标,对于不同测量系统的需要以同样的思想可以较容易地设计出两级以上分辨率的靶标。提出一种标定控制场多分辨率特征点的提取方法。该方法可根据系统要求灵活地制作标定控制场实现 360°测量范围高精度标定。标准控制场特征点的提取一次完成,受图像局部噪声影响小。实验结果表明这是一种 360°测量范围,高精度,多传感器同时标定的有效方法。在仪器的产品化过程中,该标定方法设计的靶标易于标准化,有利于系统的产品化。

## 参 考 文 献

- 1 Makoto Senoh, Fusaki Kozawa, Masashi Yamada. Development of shape measurement system using an omnidirectional sensor and light sectioning method with laser beam scanning for hume pipes[J]. *Optical Engineering*, 2006, **45**(6):064301
- 2 Jia Bo, Su Xianyu, Guo Lurong. 3D measurement for turbine blade profile by light knife[J]. *Chinese J. Lasers*, 1992, **A19**(4):271~275  
贾 波, 苏显渝, 郭履容. 采用激光光刀的叶片三维测量方法[J]. *中国激光*, 1992, **A19**(4):271~275
- 3 Li Qingquan, Wang Zhi, Li Yuguang. Measurement and multi-resolution modeling of 3D object using linear structured light projection [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2006, **35**(11):371~378  
李清泉, 王 植, 李宇光. 基于线结构光的三维目标测量与多分辨率建模[J]. *测绘学报*, 2006, **35**(11):371~378
- 4 Zhou Fuqiang, Zhang Guangjun, Jiang Jie. Field calibration method for line structured light vision sensor [J]. *Chin. J. Mechanical Engineering*, 2004, **40**(6):169~173  
周富强, 张广军, 江 洁. 线结构光视觉传感器的现场标定方法[J]. *机械工程学报*, 2004, **40**(6):169~173
- 5 Li Yong, Su Xianyu. New method for system calibration in phase measurement profilometry with large view field[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8):1162~1166  
李 勇, 苏显渝. 一种大视场相位测量轮廓术系统标定方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8):1162~1166
- 6 Liu Fengmei, Duan Fajie, Ye Shenghua. New accurate calibrating technique for the light-strip sensors[J]. *J. Tianjin University Sinica*, 1999, **32**(5):547~550  
刘凤梅, 段发阶, 叶声华. 一种新的高精度的线结构光传感器标定方法[J]. *天津大学学报*, 1999, **32**(5):547~550
- 7 Wu Qingyang, Su Xianyu, Xiang Liqun *et al.*. A new calibration method for two-sensor measurement system based on line-structure light[J]. *Chinese J. Laser*, 2007, **34**(2):259~264  
吴庆阳, 苏显渝, 向立群 等. 线结构光双传感器测量系统的标定方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2):259~264
- 8 Feng Wenhao. Industry Measurement-Wuhan University Academic Library[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2004: 183~252  
冯文灏. 工业测量-武汉大学学术丛书[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004:183~252
- 9 Zhang Jingrui, Guan Youjiang, Qin Kaihuai. Stereo calibration based on Tri-linearly interpolating spatial coordinates [J]. *Computer Engineering and Application*, 2002, (7):83~85  
张景瑞, 关右江, 秦开怀. 基于空间坐标的三线性插值立体视觉定标算法[J]. *计算机工程与应用*, 2002, (7):83~85
- 10 H. Janne, S. Olli, A four-step camera calibration procedure with implicit image correction[C], Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1977. 1106~1112
- 11 Yu Jun, Lin Jiaming, Yang Jianyu *et al.*. Distortion measurement and calibration technology for CCD camera system based on new target board [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8):1440~1442  
余 俊, 林家明, 杨建宇 等. 基于新型靶的 CCD 摄像系统畸变测量与校正[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8):1440~1442
- 12 Tang Zesheng. 3D Data-Field visualization-Tsinghua University Academic Monograph [M]. Beijing: Tsinghua University Press 1999. 110~129  
唐泽圣. 三维数据场可视化-清华大学学术专著[M]. 北京: 清华大学出版社. 1999. 110~129
- 13 Kenneth R. Castleman. Digital Image Processing [M]. Zhu Zhigang *et al.* translation. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 95~114  
Kenneth R. Castleman 著, 数字图像处理[M]. 朱志刚等译. 北京: 电子工业出版社, 2002. 95~114
- 14 He Yu. Computer General Algorithm and Program[M]. Beijing: Posts & Telecommunication Press, 2003. 226~266  
何 渝著. 计算机常用数值算法与程序[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003. 226~266
- 15 Paul J. Beasl, Neil D. McKay. A method for registration of 3-D shapes [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, **14**(2):239~256