

线结构光多传感器三维测量系统误差校正方法

张维光^{1,2,3}, 赵宏^{1,2}

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 西安交通大学苏州研究院, 215021, 江苏苏州; 3. 西安工业大学光电工程学院, 710032, 西安)

摘要: 针对线结构光多传感器三维轮廓测量系统中多传感器坐标系统一误差及线结构光带特征平面方程求解误差的校正问题, 应用一种可进行特征点多分辨率提取的平面靶标, 选择两传感器共同测量范围内部分特征点作为参考点, 应用迭代求解最近临点算法, 求解两标定坐标系精确统一的参数, 实现多传感器测量系统中两坐标系统一误差的校正. 提出了一种带参数的线结构光带图像特征点亚像素提取算法, 通过参数设置改变线结构光带特征平面的位置, 对线结构光带特征平面方程求解误差进行校正. 实验结果表明, 误差校正算法精度高、重复性好, 确保测量系统可以获得复杂型面物体高精度的截面测量配准数据.

关键词: 三维测量; 误差校正; 平面靶标; 迭代求解最近临点算法; 多传感器

中图分类号: TH741 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)06-0075-06

Error Correction Method for Three-Dimensional Measurement System With Multi-Sensor and Linear-Structure Light

ZHANG Weiguang^{1,2,3}, ZHAO Hong^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Xi'an Jiaotong University Suzhou, Jiangsu Academy, Suzhou, Jiangsu 215021, China;

3. School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

Abstract: To correct the multi-sensor coordinate system's unifying error and the equation resolving error of the feature point plane of linear-structure light strip in multi-sensor 3-D measurement system development process, a plane calibration target with multi-resolution feature points extraction nature is chosen. Some feature points in two sensors common measuring region are selected as the reference points, and the iterative closest point algorithm(ICP) is adopted to resolve unifying parameters of two sensors coordinate system. A sub-pixel feature extraction algorithm with parameter setting is also presented for the image of linear-structure light strip to correct the equation resolving error of the feature point plane. The result shows that the correction methods are of high accuracy and good repeatability to obtain high accuracy measurement registration data for complex-profile objects.

Keywords: three-dimensional measurement; error correction; planar target; iterative closest point algorithm; multi-sensor

误差分析与校正方法是光学三维轮廓测量系统设计、标定及数据处理等环节研究的关键问题之一.

光学成像系统是测量系统数据误差的主要来源, 单光学成像系统对测量数据的影响分为内参数影响因

收稿日期: 2010-10-28. 作者简介: 张维光(1973—), 男, 博士生; 赵宏(联系人), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目(2009ZX04001-061).

网络出版时间: 2011-02-28

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20110228.1717.000.html>

素和外参数影响因素. 内参数影响因素包括: 光学系统成像非线性畸变、光学系统分辨能力局限以及数字图像传感器空间量化效应等^[1]. 外参数影响因素主要是光学成像系统空间方位参数求解误差. 光学成像系统的非线性误差校正按原理可分为基于控制对象法和模式法^[2]. 光学系统分辨能力误差由光学系统成像质量决定. 校正图像传感器空间量化效应典型有效的模型有平均分布模型和正态分布模型^[3-5]. 外参数影响因素所引起的误差与系统的标定方法有关, 校正方法有立体靶标校正方法、平面移动线性靶标及平面多线性组合靶标校正方法等^[6-8]. 另外, 自校准技术可以实现光学成像系统内外参数影响因素所引起误差的同时校正, 特别适用于双摄像机系统.

线结构光多传感器三维轮廓测量系统是为了实现(精锻航空发动机叶片及精铸伞形齿轮等)复杂型面物体三维轮廓测量而设计开发的, 同时研究适应于复杂型面物体三维轮廓测量的相关技术及理论. 测量系统主要误差来源有单传感器的标定误差、多个传感器标定坐标系的统一误差、线结构光带平面方程的求解误差以及光带图像特征点的提取误差等. 其中, 多个传感器标定坐标系的统一误差校正正是多传感器测量系统需研究的新问题. 另外, 在多传感器系统中, 由于立体靶标在标定过程会引起测量盲区, 单传感器测量系统的光带特征平面方程求解方法在多传感器系统中求解误差较大. 本文针对线结构光多传感器三维轮廓测量系统的多坐标系的统一误差及光带平面方程求解误差, 提出了一种带参数的光带图像亚像素特征点提取新算法, 并且应用可实现多分辨率特征点提取的平面靶标对多传感器坐标系的统一误差及线结构光特征点平面方程求解误差进行校正. 光带图像特征点提取算法可以通过参数设置改变光带平面方程的位置, 使线结构光带平面方程求解精度更高.

1 测量系统

多传感器测量系统各传感器在测量过程中可以根据测量对象的要求采用不同的系统参数, 具有不同的测量范围及测量精度, 有利于对复杂型面物体整体轮廓和局部形貌细节的同时测量, 实现三维形貌轮廓的多分辨率测量, 同时可以有效地扩展测量范围, 提高测量速度. 图1是开发的线结构多传感器三维轮廓测量系统, 它主要由4个图像传感器、线结构光源子系统和带动测量对象上下运动的机械机构

组成. 传感器1和传感器3位置固定, 其光轴在结构光平面内的投影近似成 180° , 用于对物体整体轮廓的测量. 根据测量要求, 调整传感器2和传感器4的位置及成像系统参数, 用于物体细节形貌测量. 通过对4个摄像机采集的图像进行解算, 可获得测量对象一个截面的测量数据. 当测量对象上下移动时, 可获得一系列的截面测量数据, 根据一系列的截面数据, 可以获得物体的整体三维轮廓.

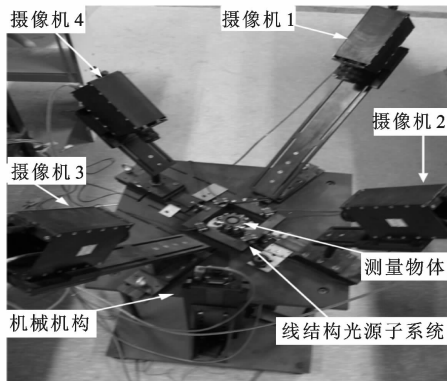


图1 测量系统

2 带参数的线结构光带图像特征点亚像素提取算法

由于受被测物体表面粗糙度等因素的影响, 线结构光带各处漫反射效果并不相同. 光学成像系统光轴与光带平面近似成 45° , 且由于物体表面形状在测量过程中具有随机性, 光带图像灰度分布表现出非均匀、非对称性的特点. 应用光带中心提取算法提取光带的特征点, 测量误差较大. 本文提出带参数的基于图像灰度插值的光带上边缘特征点提取方法, 通过参数设置可以有效地校正光带图像非对称、不完整所引起的光带特征点提取误差. 该方法可用以下步骤描述.

(1)应用高斯低通滤波器对光带图像进行平滑滤波, 高斯滤波器的窗口宽度约等于光带图像宽度, 方差大于50.

(2)应用图像边缘检测的算法, 获得光带边缘图像.

(3)应用数学形态学算法, 将上一步获得的图像边缘连接起来, 并填充边缘曲线内部, 形成光带图像的分割区域.

(4)检测获得各分割区域的边缘数组, 根据边缘数组所组成曲线的曲率, 从光带图像两端将各边缘

数组分成表示系统光带上边缘及下边缘的两个数据集。

(5)应用KD树算法,求出光带上边缘图像数据集中与下边缘图像各数据点空间距离最近的点,形成对应点对。

(6)对每组对应点对,求出图像中位于两点之间的所有点,并在低通滤波后的图像中获得所有点的灰度值,形成光带图像截面的灰度分布数据。

(7)根据光带截面图像灰度分布,求解截面光带上边缘特征点的过程如下。

①为了校正边缘检测算法对数据处理结果的影响,以截面图像灰度最大值为依据,以最大值的30%~40%为分割阈值(该取值与测量系统光源及图像传感器特性有关),从光带图像截面数据中分割灰度值大于阈值的一部分作为光带截面灰度分布有效的数据序列。

②数据序列中的每一个灰度值都是图像传感器在单个像元范围内对光强记录量化的结果,为了近似图像灰度分布,以各有效数据点集的下标为中心,将数据序列下标扩展放大10倍。序列下标扩展后最大和最小的图像灰度值取0。以有效数据点集中图像灰度为控制点,采用样条插值得到下标扩展后所有图像序列的灰度值。

③若下标扩展后序列长度为 N 、序列下标为 i 时的序列值为 g_i ,图像序列灰度之和 $G = \sum_{i=1}^N g_i$,计算数据量为

$$A_n = \sum_{i=1}^n \frac{g_i}{G} \quad (1)$$

$A_n=0$ 表示分割所得光带下边缘图像特征点, $A_n=1$ 表示分割所得光带上边缘图像特征点。对于对称灰度分布的光带图像, $A_n=0.5$ 所确定的位置就是光带的中心位置。

④测量系统光带图像不完整主要表现在光带下半部分对应图像的不完整。上半部分光带图像完整性好,取 A_n 为0.5~1,应用插值方法求解对应的下标。对下标进行坐标扩展运算的逆运算后,再向 X 轴和 Y 轴投影获得第(6)步光带图像截面灰度分布数据的特征点。测量系统通过圆台截面测量数据分析得出,当 $A_n=0.72$ 时,圆截面半径测量值标准差最小。 A_n 的取值由系统参数决定。

(8)将第(5)步形成的数据点对应用第(6)和第(7)步算法,可得到光带图像的所有特征点。

上述光带图像特征点的提取算法可以实现光带

图像特征点的亚像素提取,光带特征曲线的光滑性好,可以有效保留曲率大的光带图像的细节特征。特别地,通过改变 A_n 的值,可以改变线结构光特征点的位置,从而改变光带特征平面的位置,有助于对线结构光带特征平面方程求解误差进行校正。

3 测量系统的误差校正

3.1 系统标定

成像系统内外参数标定包括建立世界坐标系到像平面坐标系之间的变换矩阵、应用非线性模型近似求解成像系统的畸变等。线结构光多传感测量系统中光带平面及像平面均不与成像系统光轴垂直,成像系统畸变模型的有效性需进行验证,因此应用求解内外参数的方法进行系统标定难度大。应用图2所示靶标可以建立起光带平面坐标与像平面坐标之间的关系,有效地简化多传感器同时标定的过程,同时有助于统一4个摄像机标定的世界坐标系。靶标中心的十字线交点是测量系统中摄像机1及摄像机3像方主点(光轴与像平面的交点)对准的共同点。靶标中所有直线的交点是标定靶标的特征点。采用粗线中间夹细线的设计方案,可以在测量范围及测量精度不同时,尽可能多地将靶标特征点均匀分布在标定范围之内,使利用靶标图像特征点求解标定平面任一点的坐标时,采样点多、标定精度高。应用摄像机直接线性变换模型求解系统参数,应用插值方法求解靶标特征点之间未知点的世界坐标。系统标定过程及基于二维离散傅里叶变换的标定靶标特征点的提取方法见文献[9]。这种标定方法插值范围小,可以有效地校正成像系统畸变。采用复向量插值的方法,可以有效地保留插值过程中 X 、 Y 坐标之间的相关性。其过程如下:若 X_i^e 、 Y_i^e 、 $E_X(i)$ 、 $E_Y(i)$ 表示第 i 个标定像方特征点对应的 X 、 Y 方向的坐标及误差,那么对应的误差为

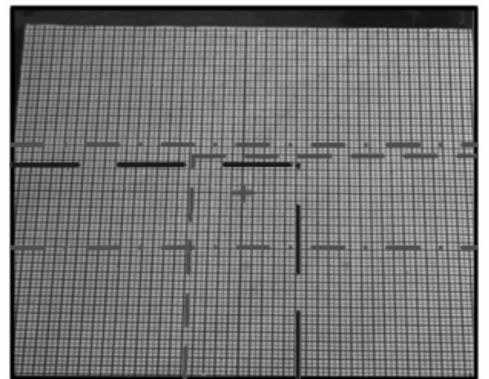


图2 测量系统打靶标

$$E(i) = E_X(i) + jE_Y(i) \quad (2)$$

若像平面上任一点应用直接线性变换模型计算的世界坐标为 $P'(X', Y', 0)$, 实际对应的世界坐标点为 $P(X, Y, 0)$. 应用“ v_4 ”插值算法, 得到 $P'(X', Y', 0)$ 的误差插值为

$$E' = G(X^e, Y^e, E, X', Y', v_4') \quad (3)$$

G 是插值函数^[10], 那么

$$\left. \begin{aligned} X &= X' + \operatorname{Re}(E') \\ Y &= Y' + \operatorname{Im}(E') \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

当选取 $Z=0$ 的平面为标定平面时, 为了校正截面数据对物体三维轮廓整体重构数据的影响, 要求光带截面与载物台上下运动方向垂直. 在标定之前, 用水平仪调整测量系统, 使标定靶标平面在载物台上下运动过程中一直处于水平状态.

3.2 4 摄像机世界坐标系的统一—误差校正

4 摄像机世界坐标系的统一是测量数据拼接融合的基础. 在光带图像特征点提取误差相同的情况下, 各摄像机不同区域测量误差不同. 当系统测量对称形状物体(如齿轮)时, 4 摄像机测量范围及测量精度大致相等, 摄像机 2 及摄像机 4 对准图 2 中靶标中心十字交线的交点. 以摄像机 1 的世界坐标系为参考坐标系进行 4 摄像机世界坐标系的统一, 选取两摄像机有效测量范围内的部分特征点作为两坐标系统一的参考点. 图 2 中两条水平点划线之间区域为参考坐标系与摄像机 3 坐标系统一时选取特征点的区域. 图 2 左下方实线包围的区域是摄像机 2 坐标系与参考坐标系统一时选取特征点的区域. 图 2 右下方短虚线包围的区域是摄像机 4 坐标系与参考坐标系统一时选取特征点的区域. 用标定的摄像机求解所选取的公共区域参考点对应的世界坐标(这些点在系统标定过程中不参与计算), 再用迭代求解最近临点(ICP)算法求解两坐标系统一时的旋转矩阵和平移向量^[11]. ICP 算法要求特征点具有非中心对称分布特性. 当测量非对称物体时, 4 摄像机测量范围相差较大, 测量系统在参考坐标系与摄像机 3 坐标系统一后, 根据摄像机 2 及摄像机 4 测量对准区域, 选取统一后的参考坐标系与坐标系 2 或 4 重叠的区域, 重复坐标系 3 向参考坐标系统一的过程, 完成 4 个坐标系的统一. 这种方法在两坐标系统一时可以选取足够多的参考点, 有效地校正两摄像机坐标系的统一误差.

3.3 线结构光带特征平面求解误差校正

通过上述标定及误差校正方法, 完成了 4 摄像

机世界坐标系的统一. 标定平面方程为 $Z=0$, 系统光带特征点平面方程求解误差转化为光带特征平面与标定坐标系中 $Z=0$ 平面的重合误差. 重合误差的校正方法如下: 图 3 中的同心圆台是用于重合误差校正的标准块, 圆台半径相差 2 mm, 精度为 0.01 mm, 光带平面的位置及方位可以通过图中螺钉进行调整, 当圆台在载物台上下移动时, 系统所测得的数据形成 3 个同心椭圆. 选标定统一坐标系中 Y 轴与 3 个同心椭圆相交, 交点为 A, B, C, D, E, F . 当光带特征平面向摄像机 1 倾斜时

$$R_1 = \frac{DE}{EF} < 1; R_3 = \frac{AB}{BC} > 1 \quad (5)$$

调整螺钉, 直到 R_1 与 R_3 近似相等时, 统一坐标系的 Y 轴与光带特征平面平行. X 轴方向的调整与 Y 轴调整相同. 当光带特征平面与标定平面平行且光带特征平面位于标定平面上方时, 所测圆台截面圆的半径小于标准值, 当光带特征平面位于标定平面向下方时, 测量值大于标准值. 通过调整螺钉, 使测量值接近于标准值, 达到光带特征平面与标定平面的重合.

上述调整方法使光带特征平面与 $Z=0$ 平面重合时仍存在一定的误差, 改变 A_n 使光带特征平面在微小的范围内上下移动, 可以进一步校正光带特征平面与 $Z=0$ 平面重合误差, 使误差达到更小的水平.

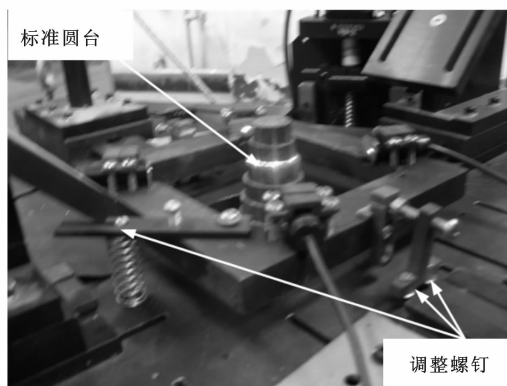


图 3 两平面重合调整装置

4 实验及结果

精铸伞形齿轮齿廓是中心对称的, 测量过程中 4 摄像机测量范围近似相等, 4 传感器在 360° 范围内均匀放置, 各像平面中心对准图 2 靶标中心十字交线的交点. 应用上述标定校正方法, 完成各摄像机的标定及坐标系的统一.

光带特征平面与标定平面平行过程调整的数据如表 1 所示. R_1 与 R_3 近似相等表示在靶标平面与标定平面内,沿标定世界坐标 Y 方向的线互相平行.与摄像机 2 及摄像机 4 相对应,类似于 R_1 及 R_3 参数 R_2 及 R_4 近似相等,判断两平面沿标定世界坐标 X 方向的线互相平行.这样,就完成了两平面平行的调整,见图 4.

表 1 两平面平行调整过程中的数据

调整次数	R_1	R_3
1	0.959 2	1.015 3
2	1.025 5	0.958 1
3	1.039 2	0.930 0
4	1.021 7	1.018 4

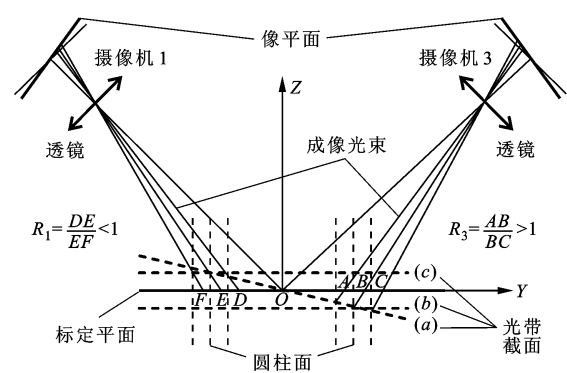


图 4 两平面重合调整原理示意图

测量对象圆台的半径标准值为 10~26 mm,中间圆台半径相差 2 mm,精度为 0.01 mm.从表 2 调整之前的数据可得,圆台截面半径的测量值比标准值大,表明经过平行调整后光带特征平面位于标定平面的下方,需将光带特征平面向上调整.从调整后的数据可以看出,测量数据逼近标准值,随着截面半径的增大,测量数据的标准差有变大的趋势,这主要是由光学成像系统的分辨率降低引起的.

应用上述完成标定的系统对已知直径为 39.880 mm 和 31.480 mm、精度为 0.01 mm 的圆柱进行多次测量.测得圆形截面的平均半径为 19.946 mm 和 15.747 mm,标准差分别为 0.053 mm 和 0.047 mm.

测量精铸伞型齿轮时,将其夹持在圆台夹具上,一个夹持位置齿廓测量数据会因有遮挡而不完整.为了获得完整的轮廓测量数据,齿轮在旋转平台上根据齿轮齿数及模数分别旋转两个角度,测得 3 组

表 2 两平面重合调整过程中圆台截面半径测量数据

测量次数	调整前		调整后	
	半径均值	半径标准值	半径均值	半径标准值
1	10.085	0.039	10.031	0.046
2	12.108	0.046	12.020	0.042
3	14.107	0.042	14.027	0.045
4	16.106	0.050	16.036	0.052
5	18.105	0.048	18.027	0.054
6	20.100	0.055	20.029	0.049
7	22.104	0.061	22.018	0.059
8	24.113	0.065	24.039	0.063
9	26.117	0.068	26.035	0.065

数据.应用多传感器测量数据或单传感器多个位置测量数据的拼接融合方法,获得齿轮三维轮廓.图 5 是 4 摄像机测量得到的一组数据.图 6 是 3 组测量数据的拼接融合结果,图中 3 种灰度表示 3 组数据集合.从图 5 实验数据可以看出,本文提出的多传感

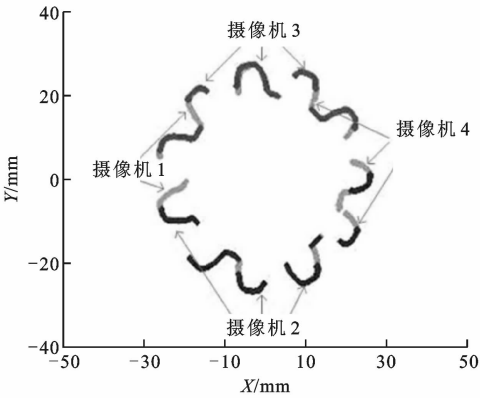


图 5 4 摄像机测量齿轮的一组截面数据

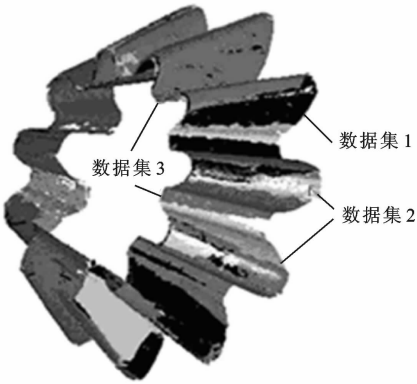


图 6 齿轮 3 组数据的融合结果

器坐标系统一误差小,线结构光带特征方程求解精度高,可确保多传感器获得高精度的测量配准数据。从表2及图6的测量数据可以看出,上述校正方法对于线结构多传感器的误差校正是有效的。

5 结 论

应用可进行多分辨率特征点提取的标定靶标,实现线结构光多传感器三维轮廓测量系统各传感器世界坐标系的统一,可以确保测量系统在放大倍率相差较大时,各传感器世界坐标系具有高精度的统一结果。对于线结构光多传感器测量系统来说,首先确定系统标定的平面方程,再通过调整的方法实现线结构光带特征平面与已知方程的标定平面重合,从而实现线结构光带平面方程求解误差的校正。测量系统获得的复杂型面物体截面高精度配准数据验证了该方法的有效性。

参考文献:

- [1] 周利民,胡德洲,卢秉恒.激光扫描三角法测量精度因素的分析与研究[J].计量学报,1998,19(2):130-135.
ZHOU Limin, HU Dezhou, LU Bingheng. A study of the precision factors of the laser scanning triangulation method[J]. Acta Metrologica Sinica, 1998, 19(2): 130-135.
- [2] 杨必武,郭晓松.摄像机镜头非线性畸变校正方法综述[J].中国图象图形学报,2005, A10(3):269-274.
YANG Biwu, GUO Xiaosong. Overview of nonlinear distortion correction of camera lens[J]. Journal of Image and Graphics, 2005, A10(3): 269-274.
- [3] 陈泽志,吴成柯,沈沛意.计算机视觉测量系统的误差模型分析[J].计算机辅助设计与图形学报,2002, A14(5):389-393.
CHEN Zezhi, WU Chengke, SHEN Peiyi. Error model analysis of computer vision photogrammetry system[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2002, A14(5): 389-393.
- [4] BLOSTEIN S D. Error analysis in stereo determination of 3D point position[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1987, 9(6): 752-765.
- [5] 徐巧玉,姚怀,车仁生.立体视觉测量系统现场校准技术[J].光学学报,2009,29(6):1546-1551.
XU Qiaoyu, YAO Huai, CHE Rensheng. Online calibration of stereo vision measurement system [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(6): 1546-1551.
- [6] 徐巧玉,叶东,车仁生.基于光学参考棒的立体视觉测

量系统现场标定技术[J].光学学报,2008,28(1):81-86.

XU Qiaoyu, YE Dong, CHE Rensheng. On-line calibration of stereo vision measurement system based on optical reference bar[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(1):81-86.

- [7] 周富强,刘珂,张广军.交比不变获取标定点的不确定性分析[J].光电子·激光,2006,17(12):1524-1528.
ZHOU Fuqiang, LIU Ke, ZHANG Guangju. Uncertainty analysis of construction calibration points based on invariance of cross ratio[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2006, 17(12): 1524-1528.
- [8] 丁建军,蒋庄德,李兵,等.线结构光扫描测头误差分析与补偿方法[J].西安交通大学学报,2008,42(3):286-290.
DING Jinajun, JIANG Zhuangde, LI Bing, et al. Error analysis and compensation of linear structured light scanning probes[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(3): 286-290.
- [9] 张维光,赵宏,张琦,等.线结构光三维轮廓测量系统的标定方法[J].中国激光,2009,36(1):182-188.
ZHANG Weiguang, ZHAO Hong, ZHANG Qi, et al. Calibration method for three-dimensional measurement system based on linear-structure light[J]. Chinese J Laser, 2009, 36(1): 182-188.
- [10] 薛定宇,陈阳泉.高等应用数学问题的MATLAB求解[M].2版.北京:清华大学出版社,2008:275-312.
- [11] BEASL P J, MCKAY N D. A method for registration of 3-D shape[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256.

[本刊相关文献链接]

射频溅射功率密度对Ga:ZnO透明导电薄膜性能的影响.西安交通大学学报,2010,44(8):58-62.
板料成形回弹三维光学测量技术研究.西安交通大学学报,2009,43(9):51-55.
法向约束的多幅点云数据融合算法.西安交通大学学报,2009,43(5):71-75.
谱域光学相干层析成像系统的实验研究.西安交通大学学报,2008,42(7):815-817.
 $Cd_{1-x}Zn_xS$ 能带第一性原理计算.西安交通大学学报,2008,42(2):248-251.
 $ZnIn_2S_4$ 薄膜喷雾热分解制备及其光电化学性质.西安交通大学学报,2008,42(1):106-109.
基于二维位置敏感探测器的空间对接过程研究.西安交通大学学报,2007,41(9):1110-1114.

(编辑 杜秀杰)