一种点扫描形貌测量系统的现场标定方法

李旭东 崔 磊 姜宏志 赵慧洁

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院,北京 100191)

摘 要:针对三角法点扫描形貌测量系统结构参数标定的非线性问题,提出并实现了一种简单易行的系统结构参数现场标定方法.利用二维靶标在测量空间内自由摆放,根据靶标上特征点及其像点间的位置关系,基于坐标系转换实现了点扫描形貌测量系统结构参数的精确标定.通过对平面及已知直径圆柱面进行测量,利用测量点到拟合平面或圆柱面的距离评价了系统标定的精度.所提标定方法无需精密调整靶标位置,具有较高的可靠性与实用性;也可用于其它基于三角法原理的三维形貌测量系统结构参数的标定.

关 键 词:三维形貌测量;三角法;现场标定

中图分类号:TN 948.41

文献标识码:A **文 章 编 号**:1001-5965(2010)12-1444-04

Structure parameters field calibration of fly point scanning shape measurement system

Li Xudong Cui Lei Jiang Hongzhi Zhao Huijie

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The calibration of structure parameters of a triangulation-based fly point scanning shape measurement system is usually a non-linear problem. A practical and easy-to-use calibration procedure of such system was proposed and implemented. The proposed calibration procedure was based on the coordinate transformation between the feature points and their images taken by the measurement system. Several pictures of a special designed planar calibration board were taken from arbitrary orientations. There was no need to precisely measure the position and altitude of the calibration board. A planar board surface and a cylinder surface with known diameter were measured by using the obtained structure parameters. The average error of the distances between measuring points and the fitted plane or cylinder was used to evaluate the calibration accuracy. The proposed calibration procedure can meet the needs of the calibration such as validity and stabilization. It can also be used for the calibration of other triangulation based shape measurement systems.

Key words: three dimension shape measurement; triangulation; field calibration

高精度非接触三维形貌测量技术被广泛地应用于航空、航天、汽车工业和先进制造业.激光三角法形貌测量系统由于测量速度快、实时性好、系统简单可靠而得到了广泛应用[1].

三维形貌测量系统的结构参数一般通过精确标定而获得,标定精度直接决定了系统的测量精度.由于三角法形貌测量系统结构参数间存在非线性关系,对其准确标定比较困难[2].文献中提及的标定方法可分为3类:①采用测量已知特征点,根据特征点位置关系及像点像平面坐标建立方程,引入辅助变量将模型线性化,通过解方程组求取系统结构参数[3-4],该类标定方法求解复杂;②在测量空间内均匀布置特征点,将特征点坐标与像点坐标进行曲线拟合,建立测量物点与像点对

收稿日期:2009-11-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60802044);中国航天科技集团公司航天科技创新基金资助项目

作者简介:李旭东(1974—),男,陕西蓝田人,副教授,xdli@buaa.edu.cn.

应关系查找表[5],该类标定方法要求特征点数目多且覆盖范围大,操作过程较为繁琐;③采用神经网络方法,将特征点坐标与对应像点坐标作为神经网络的输入和输出,建立被测物点与像点的对应关系实现标定[6-8],该类方法需要大量样本数据训练神经网络,标定过程费时,不能满足测量系统现场快速标定的要求.

本文利用具有圆形特征点的二维靶标在测量空间内的不同位置自由摆放,根据靶标上特征点间已知位置关系及对应像点像平面坐标,以坐标转换为基础实现了点扫描三维形貌测量系统结构参数的精确标定.

1　系统结构及模型建立

点扫描三维形貌测量系统采用三角法原理实现物体形貌的非接触测量.原理样机系统如图 1 所示,由激光器、双振镜、电机及控制卡、相机、图像采集卡、计算机等组成.

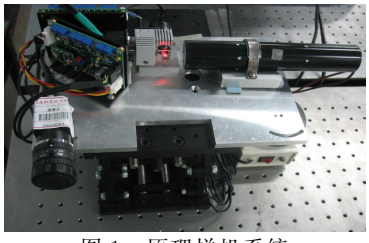


图 1　原理样机系统

系统测量及标定模型如图 2 所示.以相机镜头中心为原点建立世界坐标系 $OXYZ$ 及相机坐标系 $OX_CY_CZ_C$;像平面坐标系为 O_1uv.双振镜轴线成垂直布置.X 轴为垂直振镜轴线指向相机的方向,Y 轴铅垂向下,Z 轴为水平振镜轴线指向靶标的方向.X_C,Y_C 轴平行于像平面坐标系 u,v 轴;Z_C 轴为相机光轴.引入辅助坐标系 $O_PX_PY_PZ_P$,其 X_P 轴和 Y_P 轴建立在二维靶标上,Z_P 轴与 X_P 轴、Y_P 轴构成右手坐标系.

振镜起始位置调整为与 XOZ 平面成 45°夹角,激光器光束调整为与 X 轴平行,光束经双振镜后的方向与 Z 轴平行.记两振镜相对于起始位置的偏转角分别为 θ,φ,分别沿 Z 轴和 X 轴正方向看去顺时针转角为正,光束经振镜反射后入射到物体表面点 $P(x,\ y,\ z)$,P 的像点为 P'.

激光束入射到水平振镜上的点为 M,水平振镜处于起始位置时,光束反射到垂直振镜上的点为 B,则两点间距离 d_{MB} 为振镜轴线间距.测量时,激光束入射到物体表面形成光斑,相机对光斑成像,通过处理可得到光斑的像平面坐标,结合振镜偏转角及系统结构参数可计算物体表面点三维坐标.

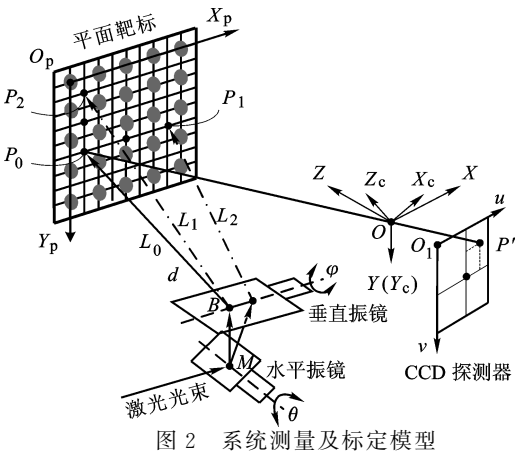


图 2　系统测量及标定模型

由图 2 中几何关系,物体表面点 P 在 $OXYZ$ 下坐标为

$$\left.\begin{aligned} x &= x_B + (d_{MB} + d/\cos(2\varphi)) \times \tan(2\theta) \\ y &= y_B - d \times \tan(2\varphi) \\ z &= z_B + d \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

其中,d 为点 P 与点 B 沿 Z 轴方向的距离,可由成像光线 OPP' 上点列交比的不变性求得.

需要标定的系统结构参数为 B 点的世界坐标系坐标 $B(x_B,y_B,z_B)$ 及 d_{MB}.

2　标定原理及步骤

2.1　标定原理

利用具有圆形特征点的二维标定靶标在测量空间内自由摆放,由靶标上特征点及其像点间的位置关系,基于坐标系转换标定系统结构参数.

标定用二维靶标如图 3a 所示.靶标上具有均匀分布的 11×9 个圆形特征点,其中较大的 5 个特征点用于定义坐标系以及对其它点的识别与定位.靶标上特征点编号如图 3b 所示.

为了实现系统结构参数的标定,采用文献[9]的方法对相机内外参数矩阵标定,步骤如下:

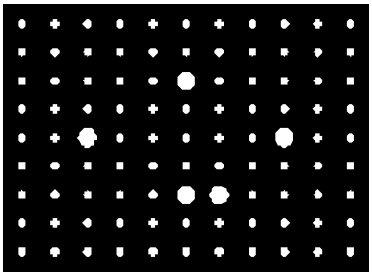
1) 拍摄图像.利用相机对不同姿态的标定靶标拍摄,得到标定图像;

2) 特征点提取.对标定图像处理得到所需的特征点;

3) 相机内参数标定.根据特征点数据进行相机内参数的优化计算;

4) 相机外参数标定.根据靶标特征点计算相机相对于靶标的外参数矩阵.若外参数矩阵不是正交阵,应采用奇异值分解的方法将其正交化[10-11].

由标定出的相机内外参数矩阵即可求得靶标上任意点 P 在 $O_PX_PY_PZ_P$ 下的坐标,由 $O_PX_PY_P$



a 二维靶标平面图



b 特征点编号

图3 标定用二维靶标

Z_P与$OX_CY_CZ_C$间的外参数矩阵即可求得靶标上未知点在$OXYZ$下的坐标.

2.2 标定步骤

1) 二维靶标在测量空间内不同位置及不同角度自由摆放n次,标定相机内参数矩阵、镜头畸变系数以及相机相对$O_PX_PY_PZ_P$的外参数矩阵$\boldsymbol{R}_j$和$\boldsymbol{T}_j$($j=1,2,\cdots,n$).

2) 设振镜处于起始位置时靶标上的光点为P_{0j};水平振镜偏转角度为θ,垂直振镜处于起始位置时靶标上的光点为P_{1j};垂直振镜偏转角度为φ,水平振镜处于起始位置时靶标上的光点为P_{2j}($j=1,2,\cdots,n$);计算P_{0j},P_{1j},P_{2j}在$O_PX_PY_PZ_P$下的坐标,并由$\boldsymbol{R}_j$和$\boldsymbol{T}_j$($j=1,2,\cdots,n$)将其转化为$OX_CY_CZ_C$下坐标.

3) 在$OX_CY_CZ_C$下分别拟合直线L_0、直线L_1、直线L_2;拟合P_{0j}点和P_{1j}点构成的平面π_1和P_{0j}点和P_{2j}点构成的平面π_2;

4) 计算直线L_1与平面π_2交点M、直线L_2与平面π_1交点B在$OX_CY_CZ_C$下坐标;计算$OXYZ$与$OX_CY_CZ_C$间的旋转矩阵$\boldsymbol{R}$和平移矩阵$\boldsymbol{T}$;得到d_{MB}及$OXYZ$下B点坐标.

2.3 标定结果

按前述标定原理及步骤,本文提及的原理样机系统结构参数标定结果为

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}1\,335.643 & 0 & 371.851\\ 0 & 1\,336.489 & 299.851\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}0.998\,413 & -0.004\,819 & -0.056\,076\\ -0.001\,567 & 0.998\,342 & -0.057\,829\\ -0.056\,264 & -0.057\,651 & 0.996\,752\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{T}=[0\quad 0\quad 0]^{\mathrm{T}}$$

$$d_{MB}=6.702\ \mathrm{mm}$$

$$B(x_B,y_B,z_B)=$$

$$(-96.545,-12.754,-120.756)\ \mathrm{mm}$$

3 实验结果

为验证本文所提标定方法的有效性,分别利用前面提及的原理样机系统对标定靶标上特征点坐标、标定靶标平面以及已知直径圆柱面进行测量.样机系统参数为:激光器波长为632.8 nm,面阵CCD(Charge Coupled Device)相机分辨率为768×576,像元大小为6.25 μm,镜头焦距为8 mm.

3.1 内外参数矩阵标定实验

选取标定靶标上10个特征点(包含5个大圆点,其余点任意选取,但尽量避免多点共线),以特征点坐标测量结果评价相机内外参数矩阵标定精度.测量数据如表1.特征点X,Y坐标测量误差均值分别为0.012 mm,0.013 mm.表明内外参数矩阵标定具有较高精度.

表1 特征点验证数据表格 mm

特征点编号	理论坐标	实测坐标	X偏差	Y偏差
5	(100,0)	(100.002,−0.018)	0.002	−0.018
8	(175,0)	(175.009,−0.008)	0.009	−0.008
21	(225,25)	(224.994,24.981)	−0.006	−0.019
28	(125,50)	(124.990,49.995)	−0.011	−0.005
37	(75,75)	(74.997,75.008)	−0.003	0.008
47	(50,100)	(50.013,99.985)	0.0127	−0.015
53	(200,100)	(200.007,99.985)	0.007	−0.015
72	(125,150)	(125.008,150.008)	0.008	0.008
73	(150,150)	(149.995,149.978)	−0.005	−0.022
99	(250,200)	(249.970,199.989)	−0.030	−0.011

3.2 结构参数标定实验

对于点扫描三维形貌测量系统标定方法的评价,目前还没有统一的方法,文献中多利用系统对标准面或标准件进行形貌测量,用形貌测量结果评价标定方法[3−8].

本文对标定靶标平面及已知直径圆柱面进行测量,以测量点到拟合平面距离误差均值及圆柱截面直径测量误差均值验证系统标定精度.测量距离为1 m.靶标平面范围约为300 mm×250 mm,圆柱面测量范围约为100 mm×100 mm;深度范围约为990～1 020 mm.

靶标平面重建结果如图4所示,测量数据如表2所示.平面测量误差均值为0.72 mm.

圆柱面重建结果如图5.对圆柱面测量点进行最小二乘拟合,计算圆柱截面直径,测量数据如表3.实验用圆柱的直径为119.87 mm,圆柱截面

直径测量误差均值为 0.50 mm,测量相对误差为 0.42%.

表 2　平面测量结果　　mm

测量次数	1	2	3	4	5
误差均值	0.72	0.71	0.73	0.72	0.71

表 3　圆柱面测量结果

参数	测量次数					均值
	1	2	3	4	5	
圆柱面直径/mm	119.28	119.39	119.11	119.06	120.01	119.37
绝对误差/mm	0.59	0.48	0.76	0.81	0.14	0.50
相对误差/%	0.49	0.40	0.63	0.68	0.12	0.42

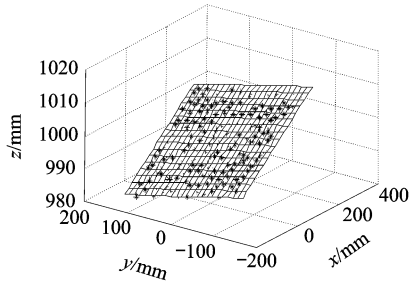


图 4　靶标平面重建图

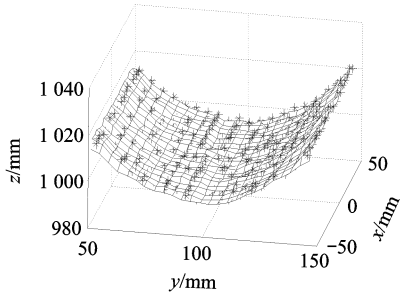


图 5　圆柱面重建图

4　结　论

提出了一种简单易行的点扫描三维形貌测量系统结构参数的现场标定方法.利用具有圆形特征点的二维靶标在测量空间内自由摆放多次,以其上特征点及像点在世界坐标系、相机坐标系和辅助坐标系下坐标变换为基础,实现了系统结构参数的快速标定.通过对靶标平面和已知直径圆柱面的测量评价了标定方法的有效性和精度,在 1 m 远处,测量点到拟合平面的距离误差均值为 0.72 mm,圆柱截面直径测量误差均值为 0.50 mm.所提标定方法不需要精确测量靶标的位置和姿态,为结构参数的现场快速标定提供了可靠实用的新方法,也适用于其它三角法原理的形貌测量系统结构参数标定.

参考文献(References)

[1] 吴兆喜,黄元庆.基于光学原理的三维形貌测量技术研究[J].光学技术,2006,32(S1):654－658
Wu Zhaoxi, Huang Yuanqing. Study on optical methods for 3D shape measurement[J]. Optical Technique, 2006, 32(S1):654－658(in Chinese)

[2] Franca J G D M, Gazziro M A, Ide A N, et al. A 3D scanning system based on laser triangulation and variable field of view[C]//Proc of IEEE Conference on International Conference on Image Processing. Genoa, Italy: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, 2005:741－750

[3] Wang Guoyu, Zheng Bing, Houkes Z. Modeling and calibration of the laser beam-scanning triangulation measurement system[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2002, 40(4):267－277

[4] 刘安心,余跃庆.三维机器视觉测量系统的标定模型研究[J].机械制造与自动化,2005,34(4):43－46
Liu Anxin, Yu Yueqing. Study on the calibration model for 3D machine vision measuring system[J]. Machine Building & Automation, 2005, 34(4):43－46(in Chinese)

[5] 章小兵,戚俊,张毅,等.一种关于大位移激光三角法测量参数标定方法的研究[J].量子电子学报,2002,19(1):74－77
Zhang Xiaobing, Qi Jun, Zhang Yi, et al. A research on the method of calibrating parameters of laser triangulation of long displacement[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2002, 19(1):74－77(in Chinese)

[6] 杜立彬,高晓辉,夏进军,等.一种新型激光三维扫描测量仪的研制[J].激光技术,2005,29(4):366－369
Du Libin, Gao Xiaohui, Xia Jinjun, et al. Research of a novel 3-D laser scanning system[J]. Laser Technology, 2005, 29(4):366－369(in Chinese)

[7] 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(in Chinese)

[8] 李晶,吴章江.基于图像处理的激光双三角法测量三维曲面[J].激光与红外,2001,31(2):87－89
Li Jing, Wu Zhagnjiang. Laser double triangulation method measurement for 3-D surface based on image processing[J]. Laser & Infrared, 2001, 31(2):87－89(in Chinese)

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

[10] 张广军.机器视觉[M].北京:科学出版社,2005:84－89
Zhang Guangjun. Machine vision[M]. Beijing: Science Press, 2005:84－89(in Chinese)

[11] 张辉,张丽艳,陈江.基于平面模板自由拍摄的双目立体视觉测量系统的现场标定[J].航空学报,2007,28(3):695－701
Zhang Hui, Zhang Liyan, Chen Jiang. Field calibration of binocular stereo system based on planar template and free snapping[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(3):695－701(in Chinese)

(编　辑:刘登敏)