

文章编号 1004-924X(2009)12-2990-07

基于液晶靶标的多 CCD 线结构光测量系统全局标定

贾倩倩,王伯雄,赵博华,罗秀芝

(清华大学精密仪器与机械学系精密测试技术及仪器国家重点实验室,北京 100084)

摘要:为了对多 CCD 线结构光测量系统进行精确快速的全局标定,研究了一种基于液晶平面靶标的多 CCD 全局标定方法。首先,将液晶靶标放入光平面,在靶标上显示一系列特征点,然后进行各个 CCD 同步采集。通过时间序列对应特征点的图像坐标与靶标坐标,建立起像平面与靶标平面间的非线性模型,对形位关系已知的标准块进行测量,利用标准块的形位关系对像平面与靶标平面间的非线性模型进行优化,得到像平面与光平面间的映射关系,从而完成多 CCD 的全局标定。利用优化后的标定结果进行测量,结果表明,在自由曲面类物体的测量中,3 个摄像机的数据拼接精度高,对标准块上特征点距离测量的 RMS 误差为 0.217 mm,角度测量的绝对误差为 $\pm 0.2^\circ$ 。该方法快速简便,适合现场操作,已在多 CCD 线结构光测量系统中得到了实际应用。

关键词:多摄像机;线结构光;液晶靶标;全局标定;优化

中图分类号:TP391;TP212.14 **文献标识码:**A

Global calibration of multi-CCD line-structured-light measurement system based on LCD target

JIA Qian-qian, WANG Bo-xiong, ZHAO Bo-hua, LUO Xiu-zhi

*(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,**Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)*

Abstract: In order to realize the global calibration of a multiple CCDs line-structured-light measurement system, an approach to calibrate multiple CCDs based on a LCD target is investigated. Firstly, the LCD target is arranged at the position of light section, and the characteristic points are shown on the target one by one, then they are captured by cameras at the same time. The relationship between the target coordinate and the image coordinate is established in a nonlinear model through synchronizing pulses, and the model is optimized by the shape restraints of a calibrating part to get the mapping between the light sectioning plane and the image plane. So far, the global calibration is achieved successfully. Measurements of free surface show that the data from different CCDs are well spliced in the light sectioning plane, and measurements of the calibrating part show that the RMS error in a distance is 0.2 mm and the absolute error in a angle is $\pm 0.2^\circ$. This method is easy to use, and has been applied to a multi-CCD 3D measurement system.

Key words: multi-CCD camera; line-structured-light; LCD target; global calibration; optimization

收稿日期:2009-01-06;修订日期:2009-03-24.

基金项目:科技部中德科技合作重点项目(No. 2003DFB00028)

1 引言

线结构光测量系统是一种非接触式的光学测量方法,其基本原理是^[1-2]是将线激光投射到物体表面,基于被测物体表面的深度不同会引起激光线的变形,用 CCD 摄像机记录这种变形,并在计算机中解算,得到光切面上的物体三维信息。线结构光测量系统由于其适用范围广、测量范围大、精度较高、可控性强等特点,在逆向工程、质量控制、人体测量学等领域有很多应用^[3-4]。

采用线结构光测量时,由于单个 CCD 的视场范围有限,如果要求在一次测量中快速得到物体的全三维信息,则需要增加摄像机的数目,即搭建多 CCD 测量系统,为各个 CCD 分配不同的视场范围,通过在光切面上的数据拼接来实现快速测量。

标定是测量过程中的关键步骤^[5],多 CCD 线结构光测量系统的全局标定可以分为两种^[2]:线面模型或面面模型。线面模型需要先标定摄像机,求出摄像机的各个内外参数以及光平面方程^[2],利用摄像机的投影模型,对图像中的点进行逆投影,并求出其与光平面的交点。张广军等^[2,6]利用拉丝法产生特征点,并使用电子经纬仪精确测量特征点的三维坐标来求解摄像机的模型参数和光平面方程,方法精确可靠,但是需要额外使用电子经纬仪;面面模型则需求解光平面和像平面之间的映射关系,常见的方法是锯齿靶法^[2]。这类方法借助外部标定物与光平面交点作为特征点,由外部标定物的加工尺寸提供特征点的世界坐标,避免了数值求解摄像机参数的繁琐步骤,可直接求解像平面与光平面的映射关系。这两类方法共同的缺点是对标定模块的加工精度要求高,且特征点个数有限,如果增加特征点个数,会增加标定模块的设计难度,降低寻找世界坐标与图像坐标的对应关系的效率。

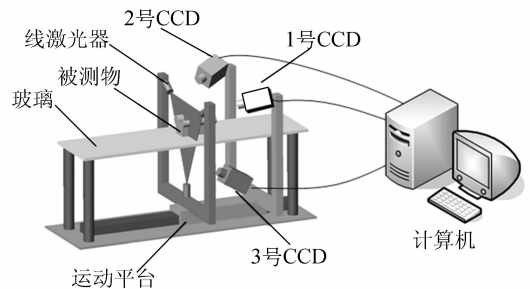
针对以上难点,本文提出了基于液晶靶标的多摄像机全局标定方法,先建立靶标平面与像平面间的非线性模型,通过对标准块的形位参数的

测量,对靶标平面与像平面之间映射关系进行数值修正,优化求解出光平面与像平面间的映射关系,方法操作简便,适合现场应用。

2 多摄像机线结构光测量系统

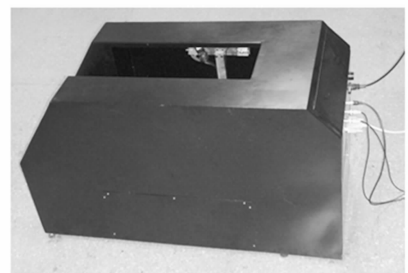
图 1 示出了由清华大学开发的多摄像机线结构光形貌测量系统^[4]。该系统包含 3 组激光-摄像机传感单元,被测物体放置在钢化玻璃上,3 组传感单元在运动平台的带动下,对被测物体进行扫描,得到物体的三维形貌数据。

3 个摄像机的主要视场范围分别为被测物体截面的 $0\sim 120^\circ$ 区域、 $120\sim 240^\circ$ 区域及 $240\sim 360^\circ$ 区域,只需一次扫描(16 s),即可实现物体被测截面的 360° 测量。



(a) 测量系统内部结构示意图

(a) Illustration of measurement system



(b) 测量系统外形

(b) Appearance of measurement system

图 1 多摄像机线结构光形貌测量系统

Fig. 1 Line-structured-light measurement system with multiple CCDs

3 基于液晶靶标的摄像机全局标定

直接求解光平面与像平面的映射关系是避

免繁琐计算,减小数值误差的好途径。本实验将液晶平面靶标放置于光平面内,在液晶平面内显示特征点,用多个摄像机进行拍摄,寻找各个摄像机的像平面与液晶靶标平面的映射关系,最后通过数值修正,得到光平面与像平面的映射关系。

3.1 液晶平面靶标

液晶显示屏的大小为 $170.9 \text{ mm} \times 128.8 \text{ mm}$,单个像素定位精度为 $2 \mu\text{m}$ 。利用液晶作为靶标,符合靶标的精度要求。由于各个摄像机的视场范围不同,液晶靶标上的所有特征点难于被所有摄像机同时拍摄到,因此,将靶标上的 n 个特征点分成 n 次显示,每次只显示一个特征点。通过时间序列同步各个摄像机采集以及液晶靶标上的特征点显示,得到了各个特征点的靶标坐标和图像坐标,如图 2 所示。

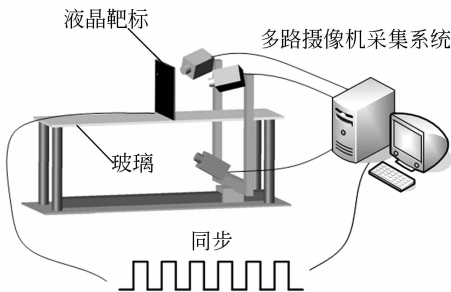


图 2 基于液晶靶标的特征点采集

Fig. 2 Acquisition of characteristic points based on LCD target

3.2 像平面到靶标平面的映射关系

坐标系 $\Omega_1(u, v)$ 表示原点位于图像左上角的图像坐标系,坐标系 $\Omega_2(X_T, Y_T)$ 表示原点位于液晶靶标左上角的靶标坐标系。用 $G(u, v; X_T, Y_T)$ 来表示由坐标系 Ω_1 到 Ω_2 的映射关系。按照多项式模型,有:

$$\begin{cases} X_T = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij} u^i v^j \\ Y_T = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} b_{ij} u^i v^j \end{cases} \quad (1)$$

假设靶标中实际点的坐标为 (X_T, Y_T) ,则有:

$$\begin{cases} e_x = \sum_m (X_T - \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij} u^i v^j)^2 \\ e_y = \sum_m (Y_T - \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} b_{ij} u^i v^j)^2 \end{cases}, \quad (2)$$

式中, m 为特征点的个数, n 为多项式的阶数。多项式共有 $(n+1)(n+2)/2$ 项。

系数 a_{ij} 和 b_{ij} 的计算公式为^[4]:

$$\begin{cases} \frac{\partial e_x}{\partial a_{ij}} = 0 \\ \frac{\partial e_y}{\partial b_{ij}} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

3.3 像平面到光平面的映射关系

由于实际实验时靶标平面无法与光平面完全重合,需要对靶标平面与像平面之间的映射关系进行数值修正。用向量 $\tilde{\mathbf{a}}$ 表示 $\{a_{ij}\}$,用向量 $\tilde{\mathbf{b}}$ 表示 $\{b_{ij}\}$,其长度均为 $(n+1)(n+2)/2$,像平面到光平面的映射关系可通过对 $\tilde{\mathbf{a}}$ 和 $\tilde{\mathbf{b}}$ 的数值修正来获得:

$$\begin{cases} \mathbf{a} = \tilde{\mathbf{a}} + \Delta\mathbf{a} \\ \mathbf{b} = \tilde{\mathbf{b}} + \Delta\mathbf{b} \end{cases} \quad (4)$$

$\Delta\mathbf{a}$ 和 $\Delta\mathbf{b}$ 可通过被测物体的形状约束(如平行度和垂直度),通过非线性优化^[7]求出。

4 实验结果和误差分析

4.1 全局标定实验

全局标定实验包括如下部分:特征点检测,特征点的靶标坐标与图像坐标的对应,求解映射关系以及对标定结果的精度评价。

4.1.1 特征点检测

实验过程中使用的特征点为 X 型角点,有利于特征点位置的准确检测^[8]。角点检测的精度与图像中的噪声大小有关。图 3 显示出了在图像中添加均值为 0,不同方差的高斯噪声时,角点检测的精度与噪声的关系。根据实际图像的噪声情况,实际的角点检测精度约为 0.1 pixel。

4.1.2 特征点的靶标坐标与图像坐标的对应关系

液晶靶标上的 n 个特征点分成 n 次显示,按

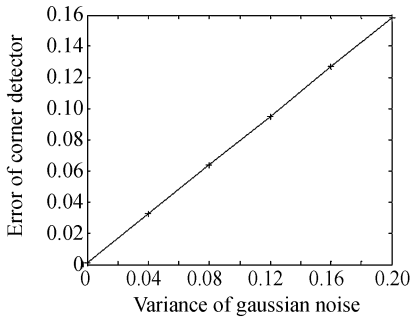


图 3 角点检测精度与噪声的关系

Fig. 3 Relationship between noise and accuracy of corner detector

照每秒显示一幅特征点图像的速度,则多个摄像机同时采集特征点图像,需要 n 秒。按照图 4 所示流程,将特征点的靶标坐标与图像坐标进行对应。

在时刻 t_i ,液晶靶标上的特征点是唯一的,其靶标坐标为 (X_T, Y_T) ;同时,利用各个摄像机拍摄得到的图像,含有的特征点信息也是唯一的,可以通过图像处理的方法找出其图像坐标。如果由于拍摄角度的原因而导致某个摄像机没有拍到特征

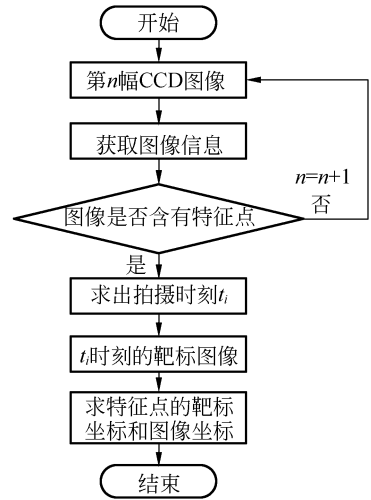


图 4 特征点的坐标对应关系计算流程图

Fig. 4 Calculation flow chart of mapping of coordinates of characteristic points

点,就处理下一帧,寻找下一特征点。

4.1.3 求解映射关系

按照上述方法求出特征点的靶标坐标和图像坐标的结果如表 1 所示。

表 1 特征点的靶标坐标与图像坐标的对应关系

Tab. 1 Relationship between target coordinates and image coordinates

序号	靶标/mm	1号摄像机/pixel	2号摄像机/pixel	3号摄像机/pixel
1	(13.350, 13.350)	(85.9943, 351.498)	(318.495, 94.503 4)	(143.007, 211.997)
2	(13.350, 26.700)	(116.485, 396.009)	(300.507, 121.508)	(141.503, 261.994)
3	(13.350, 40.050)	(143.999, 436.998)	(281.008, 150.993)	(140.009, 312.013)
4	(13.350, 53.400)	(169.506, 475.501)	(260.492, 182.507)	(138.503, 362.009)
.....
88	(93.450 0, 133.500)	(373.505, 442.982)	无	(369.996, 738.990)

靶标上共显示过 88 个特征点,但不是每个点都能被所有摄像机拍摄到,从表 1 的 2 号摄像机的数据中可以看出,第 88 号特征点并无对应的图像坐标。

由式(1)、(2)和(3)可以求出表示映射关系的多项式系数向量 a, b 。

利用向量 a, b ,由图像坐标反求靶标坐标的

结果如图 5 所示,误差(3σ)为 0.029 2 mm。

4.1.4 标定结果的精度评价

利用以上的标定结果,对标准块进行测量,得到的点云数据如图 6 所示。

标准块为一个圆柱形台阶,分别用 $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4$ 表示标准块的各面。特征点 1 和 2 分别为两条棱线的中点,特征点 3 为底面圆心。 π_1 平面与 π_2 平面的高度差为 50.013 mm。光平面与这

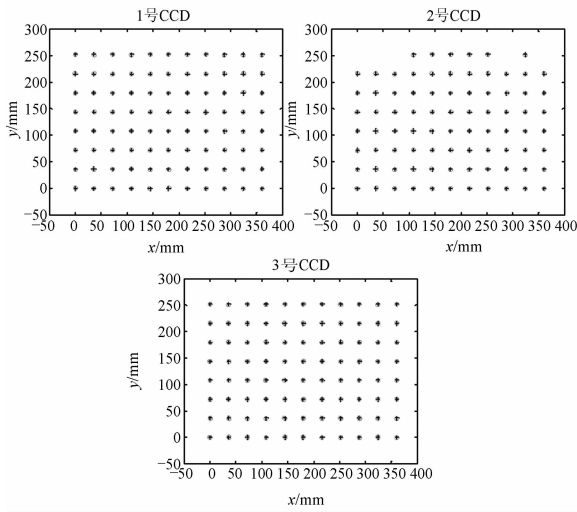


图 5 反求靶标特征点

Fig. 5 Reversed calculation of target characteristic points

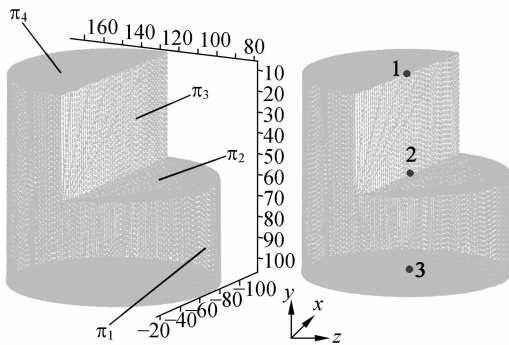


图 6 标准块的特征面和特征点

Fig. 6 Characteristic planes and points of calibrating part

4 个面相交, 交线分别为 l_1, l_2, l_3, l_4 , 如图 7 所示。由标准块的形位性质可知: $l_1 \parallel l_3, l_2 \parallel l_4, l_2 \perp l_1$ 。

求出 l_1, l_2, l_3, l_4 与 x 轴的夹角及 l_1, l_2, l_3, l_4 之间的夹角如表 2 所示。

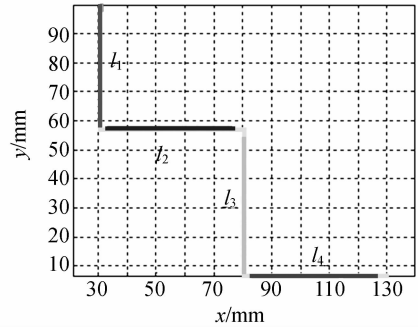


图 7 光平面与标准块的交线

Fig. 7 Intersection of light section and calibrating part

表 2 优化前后标准块的形位参数测量值

Tab. 2 Measurement results of calibrating part before and after optimization

优化前			
直线	与水平轴的夹角	与 l_1 的夹角	l_2 与 l_4 的距离
l_1	0.387°	—	
l_2	89.939°	89.552°	50.438 mm
l_3	0.213°	0.173°	
l_4	-89.908°	90.295°	
优化后			
直线	与 x 轴的夹角	与 l_1 的夹角	l_2 与 l_4 的距离
l_1	0.148°	—	
l_2	89.962°	89.814°	49.999 mm
l_3	-0.042°	0.190°	
l_4	-89.838°	89.986°	

对标准块进行的重复测量证明, 在此条件下, 高度测量的绝对误差 $< \pm 0.5$ mm, 角度测量的绝对误差 $< \pm 0.5^\circ$ 。

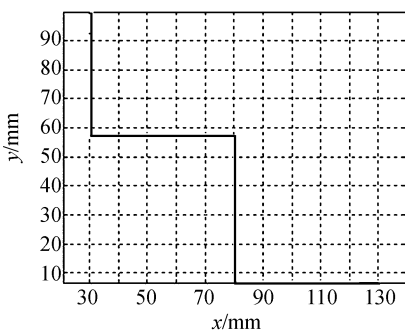
4.2 误差与优化

误差的主要来源是液晶靶标平面与光平面的不完全重合。利用标准块的形位性质对标定系数 a, b 进行优化, 建立基于参数 Δa 和 Δb 的目标优化函数如下:

$$f(\Delta a, \Delta b) = \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_{21}\right) + \alpha_{31} + \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_{41}\right), \quad (5)$$

式中, α_{21}, α_{31} 及 α_{41} 分别表示直线 l_1 与 l_2, l_3 及 l_4 的夹角。采用 derivative-free^[7] 方法对目标函数进行优化, 得到参数 Δa 和 Δb 的优化值。

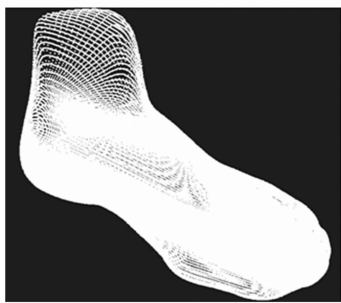
优化前后的标准块的各项形位参数如表 2 所示。优化后, 标准块的各项参数测量都比优化前有了明显改善, 角度的测量的最大误差由原始的 0.448° 减小为 0.190° , 距离的测量误差由原始的



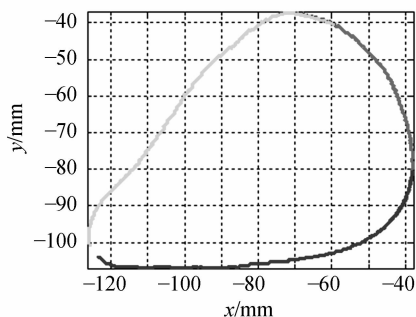
0.425 mm 减小为 0.014 mm。

对各个摄像机进行上述优化,利用优化后的结果 $a = \tilde{a} + \Delta a, b = \tilde{b} + \Delta b$ 分别对自由曲面类物体和标准形状物体进行测量。

对自由曲面物体的测量,以人体足型为例,3 个摄像机的合理利用保证了数据的完整性,在截面上,3 个摄像机的数据拼接情况好,如图 8 所示。



(a) 三维点云数据
(a) Point clouds



(b) 截面的拼接情况
(b) Data splicing in light sectioning plane

图 8 测量点云数据及截面数据拼接

Fig. 8 Point clouds of measurement and data splicing in light sectioning plane

对标准块特征点间的距离测量如表 3 所示。距离测量的 RMS 误差为 0.217 mm。

由于每次靶标上只显示一个特征点,因此标定点的采集时间较长,为 88 s,单路摄像机计算映射系数共需要 3.1 s 的时间,优化求解需要约 5.6 s。

表 3 标准块特征点间距的测量值与真实值的对比

Tab. 3 Comparison between measured values and true values for distances

次数	距离 P_1P_2 /mm	距离 P_1P_3 /mm	距离 P_2P_3 /mm
1	50.197	99.853	50.158
2	49.971	99.896	49.656
3	50.120	100.035	49.910
4	50.204	100.230	50.086
5	49.829	99.787	50.110
6	49.943	99.884	49.637
7	49.649	100.126	49.811
8	49.741	99.669	50.054
9	49.958	99.833	49.749
真实值	49.994	100.013	50.011
RMS 误差	0.187	0.188	0.217

5 结 论

本文提出了一种基于液晶靶标的多摄像机线结构光测量系统的全局标定方法,通过液晶靶标建立了各个摄像机的像平面与靶标平面的关系,通过标准块的形位关系优化求解出像平面与光平面的映射关系。该方法只需一次特征点序列的采集和标准块的测量,即可完成标定过程。利用该方法的标定结果进行物体三维形貌测量,距离测量 RMS 误差为 0.217 mm,角度测量的绝对误差为 $\pm 0.2^\circ$ 。此方法已在多 CCD 线结构光足型扫描仪中得到了实际应用。

参考文献:

[1] ERNEST O D. *Measurement Systems: Application and Design*[M]. Boston: McGraw-Hill, 2004.
 [2] 张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
 ZHANG G J. *Vision Measurement*[M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)

[3] 向长波,尹传历,宋建中. 抗干扰的光刀中心提取方法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(7): 1303-1308.
 XIANG CH B, YIN CH L, SONG J ZH. An anti-disturbing method for extracting light-knife center [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7): 1303-1308. (in Chinese)
 [4] 刘国忠,王伯雄,史辉,等. 足部三维测量系统中

- CCD 传感器的全局标定[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(7):1124-1129.
- LIU G ZH, WANG B X, SHI H, *et al.*. Global calibration of CCD cameras in measurement system for 3-D foot shapes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7):1124-1129. (in Chinese)
- [5] 李喆, 丁振良, 袁峰. 基于共面点的多视觉测量系统的全局标定[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(3): 467-472.
- LI ZH, DING ZH L, YUAN F. Global calibration method for multi-vision measurement system with coplanar targets[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3):467-472. (in Chinese)
- [6] 张广军, 魏振忠. 多视觉检测系统的世界坐标唯一全局标定方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(11):1268-1272.
- ZHANG G J, WEI ZH ZH. Unique world coordinates based global calibration method for multi-vision inspection system[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, 32(11):1268-1272. (in Chinese)
- [7] LAGARIAS J C, REEDS J A, WRIGHT M H, *et al.*. Wright convergence properties of the Neldermead simplex method in low dimensions[J]. *SIAM Journal of Optimization*, 1998, 9(1):112-147.
- [8] CHEN D, ZHANG G. A new sub-pixel detector for X-corners in camera calibration targets[C]. *WSCG SHORT papers proceedings*, 2005:97-100.

作者简介:



贾倩倩(1982—),女,山西大同人,博士研究生,2005年于清华大学获得学士学位,主要从事机器视觉及精密仪器与测试技术等方面的研究。E-mail: gqq@mails. tsinghua. edu. cn



赵博华(1984—),男,黑龙江齐齐哈尔人,博士研究生,2007年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事机器视觉及物体三维形貌测量等方面的研究。E-mail: zbh07@mails. tsinghua. edu. cn



王伯雄(1947—),男,江苏南通人,教授,博士生导师,1970年,1982年于清华大学分别获得学士、硕士学位,主要从事精密仪器与测试技术, MEMS 技术,光学测量技术和生物医学技术方面的研究。E-mail: wangbx@tsinghua. edu. cn



罗秀芝(1968—),女,高级工程师,主要从事机械系统动态测试等方面的研究。E-mail: luoxz@tsinghua. edu. cn