

新型线性定标的物体光刀切口长度测量研究

吴小平 余艳梅* 吴晓红 罗代升

(四川大学电子信息学院图像信息研究所, 四川 成都 610064)

摘要 基于激光三角法原理对三维物体光刀切口长度测量做了深入的研究, 着重研究了测量原理和定标方法。采用坐标变换方法, 分析了三维物体光刀切口长度测量在高度方向和光刀方向上的物像关系, 得出了三维物体光刀切口长度测量的计算公式。基于高度方向和光刀方向的物像关系提出了一种新型线性定标方法。进行了手指长度测量实验, 测量结果精度较高。研究结果表明: 高度方向上物体相对高度的倒数和像相对高度的倒数成线性关系; 光刀方向上物像的长度比和物体的相对高度成线性关系; 新的定标方法精度高, 操作方便; 光刀测量三维物体切口长度精度高、成本低、处理速度快。

关键词 测量; 光刀切口长度测量; 激光三角法; 线性定标; 光刀

中图分类号 TN247 OCIS 120.3940 230.2090 文献标识码 A

Object Cut Length Measurement Using Light-Knife Based on New Linear Calibration

Wu Xiaoping Yu Yanmei Wu Xiaohong Luo Daisheng

(Image and Information Institute, School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract 3D object cut length measurement using light-knife is deeply researched based on laser triangulation, and the measurement principle and calibration method are studied in detail. The object-image relationships in height direction and light-knife direction are analyzed through coordinate transformation method, and the calculation formula of 3D object cut length measurement using light-knife is derived. A new linear calibration method is proposed based on the object-image relationships. An experiment of finger's length measurement has been done and the results are precise. In the height direction the inverse of object's relative height is linear with the that of image's relative height. In the light-knife direction the ratio of object's length to image's length is linear with the object's relative height. The new linear calibration method is very precise and simple. The advantages of 3D object cut length measurement using light-knife are of high accuracy, low cost, and high processing speed.

Key words measurement; light-knife cut length measurement; laser triangulation; linear calibration; light-knife

1 引言

在实际生活生产中常需测量三维物体表面两点之间的长度, 由于表面弯曲等原因, 该距离不能直接测量。一些工程中采用胶带粘贴于物体表面两点之间, 再拉伸利用直尺手工测量, 该方法效率低, 费时费力。现代光电测量技术以其非接触、高效率、高精度等特点, 已成为三维物体测量和三维传感的重要手段^[1,2]。现有的一些三维物体测量方法^[3], 如傅里叶测量法^[4]、时域相位展开测量法^[5]、调制度测量法^[6,7]都是全景

收稿日期: 2009-06-04; 收到修改稿日期: 2009-07-02

作者简介: 吴小平(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事图像处理与模式识别等方面的研究。E-mail: 421367978@qq.com

导师简介: 罗代升(1947—), 男, 博士, 教授, 主要从事图像处理与模式识别等方面的研究。E-mail: dshluo@hotmail.com

*通信联系人。E-mail: yanmei_yu@163.com

测量, 需要投影仪等高成本仪器, 需要设计光栅图案和处理多幅图像, 成本高、运算复杂, 不适宜用于物体表面的长度测量。而光刀法^[8]因其处理速度快、成本低等优点常用于物体表面长度测量或物体高度测量, 但目前在定标时需要使用光学平台、水平导轨、标定板等, 其定标方法较复杂^[9,10]。本文基于激光三角法的反射型直射式^[11]新型线性定标的光刀测量方法测量三维物体表面长度, 使用普通的摄像头采集图像, 该方法具有测量效率高、精度高、成本低、处理速度快、定标简单等优点。

2 三维物体光刀切口长度测量原理

基于激光三角法的三维物体光刀切口长度测量的基本原理是用光刀以某一角度投射在被测物体表面, 然后从另一角度对物体表面进行成像, 分析受到物体形貌调制的光刀图像, 从而计算出物体表面沿着光刀方向的长度信息。实际测量中, 采用光刀垂直投射方式, 投射在工作平台上的光刀平行于摄像头 CCD 的一边。快速采集多幅光刀图像, 运用多幅图平均法去除噪声, 再用自适应光刀中心提取法^[12,13]提取光刀图像中心。把得到的光刀线分为若干小段, 根据高度方向和光刀方向的物像对应关系分别算出每一小段的实际长度, 再由微元法算出物体的实际长度。

2.1 高度方向物像关系

测量原理图如图 1 所示, 其系统简图为图 1(a), 正视图为图 1(b), OO' 为光轴。分别以 O 和 O' 点为原点做坐标轴 H 和 h , 被测物体的高度用 H 坐标轴的坐标 Y 表示, 像的高度用 h 坐标轴的坐标 y 来表示。令 $OC=s$, $CO'=s'$ 。在图 1(b) 中做 $AB \perp OC$, 由 $\triangle ABC \sim \triangle EO'C$ 和 $AB=OA \sin \alpha$, 得

$$\frac{1}{Y} = \frac{1}{y} s' \sin \alpha / s + \cos \alpha / s. \quad (1)$$

令 $k = s' \sin \alpha / s$, $b = \cos \alpha / s$ 。可以得出物和像在垂直方向的对应关系为

$$\frac{1}{Y} = k \frac{1}{y} + b. \quad (2)$$

在一个确定的系统中 k 与 b 是不变的, 所以 $1/Y$ 与 $1/y$ 成线性关系, 基于此线性关系实现高度方向的线性定标。

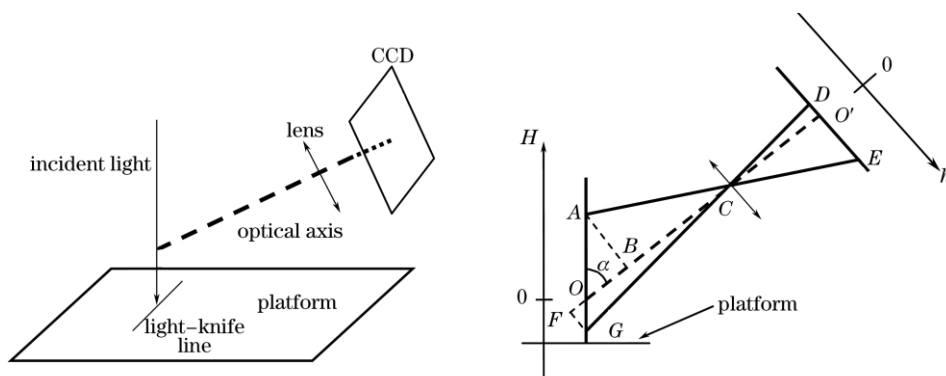


图 1 高度方向测量原理图。(a)系统简图; (b)正视图

Fig.1 Principle of measurement in height direction. (a) diagram of system; (b) front view of system

2.2 光刀方向的物像关系

如图 2 所示, 图中 AB 是光刀方向上的一条线段, $A'B'$ 是 AB 在 CCD 上所成的像, O 和 O' 点分别是光轴在光刀面和 CCD 面上的交点, $OQ=s$, $QO'=s'$ 。在图 2 中做 $EF \perp OO'$ 于点 F , 设 $AB=L$, $A'B'=l$, 由 $\triangle EFQ \sim \triangle E'O'Q$ 和 $AB \parallel A'B'$, 可得 $AB/A'B' = FQ/O'Q$, 又由 $FQ = OQ - OE \cos \alpha$, 可得

$$\frac{L}{l} = -Y \frac{\cos \alpha}{s'} + \frac{s}{s'}. \quad (3)$$

令 $r=L/l$, $c=s/s'$, $d=\cos\alpha/s'$, 可得

$$r = -dY + c. \tag{4}$$

对于一个确定的系统 d 和 c 是定值, 由(4)式可得, 光刀方向上物像比和高度坐标成线性关系, 基于此线性关系实现光刀方向的线性定标。

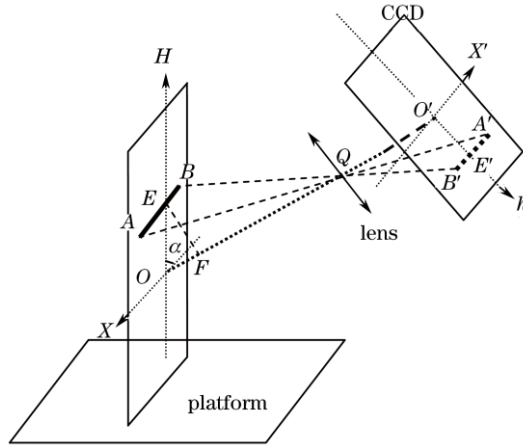


图 2 光刀方向测量原理图
Fig.2 Principle of measurement in light-knife direction

2.3 长度计算

如图 3 所示, X 轴方向为光刀方向, H 轴方向为高度方向。求取图中的曲线 C 的长度, 由弧长的计算公式 $S = \int_C ds$ 和弧长元素 $ds = \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2}$, 得到 $S = \int_C \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2}$, 把曲线 C 划分为若干小段, 根据微元法的原理把求积分近似为求和。在实际测量中, 当划分的每一小段足够短时, 在一定的精度范围内, 求和得到的长度就是实际长度, 所以

$$S = \sum_i \sqrt{\Delta L_i^2 + \Delta Y_i^2}, \quad i = 1, 2, 3 \dots \tag{5}$$

这样问题就转化为求取每一小段光刀方向的长度和高度方向的高度。

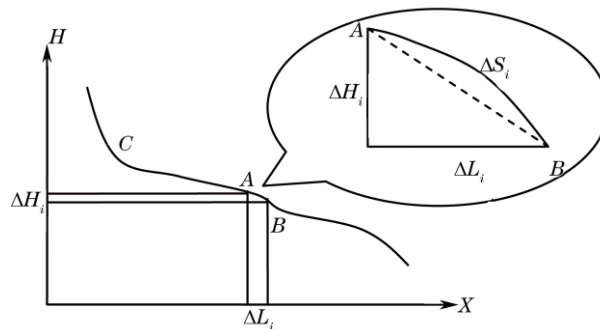


图 3 曲线长度计算
Fig.3 Calculation of curve length

由(2) 式得, $Y_i = \frac{y_i}{k + by_i}$, $Y_{i+1} = \frac{y_{i+1}}{k + by_{i+1}}$, 所以

$$\Delta Y_i^2 = (Y_i - Y_{i+1})^2 = \left(\frac{y_i}{k + by_i} - \frac{y_{i+1}}{k + by_{i+1}} \right)^2. \tag{6}$$

由(4)式得, $\Delta L_i^2 = (-dY + c)^2 \Delta l_i^2$, 式中 Y 取这一小段两端点坐标的平均值, 即 $Y = \frac{Y_i + Y_{i+1}}{2}$, 所以

$$S = \sum_i \sqrt{\left[-d \left(\frac{y_i}{k + by_i} + \frac{y_{i+1}}{k + by_{i+1}} \right) / 2 + c \right]^2 + \Delta l_i^2 + \left(\frac{y_i}{k + by_i} - \frac{y_{i+1}}{k + by_{i+1}} \right)^2}. \quad (7)$$

确定了 k, b, c, d 4 个参数, 就可根据图像由(7)式计算出三维物体表面的长度。由(7)式可看出, 整个公式形式简单, 无复杂运算, 因此运算速度快。

3 三维物体光刀切口长度测量系统的定标

由三维物体光刀切口长度测量原理分析可知, 需要确定参数 k, b, c, d, H 轴原点相对于工作平台的高度 Y_0 和 h 轴原点相对于 CCD 边缘的高度 y_0 。实验中使用刻度尺对系统定标, 竖立刻度尺(0 刻度线在刻度尺的边缘)于光刀平面, 采集刻度尺的图像。刻度尺上每一刻度线代表着一定高度的物体, 则刻度值就是物体相对于参考面的高度(Y_{abs})。普通 CCD 摄像机的光轴都垂直于 CCD 的中心, 所以 y_0 就是 CCD 高度的一半。根据透镜成像知识, Y_0 处的物体成像于 y_0 处, 因此图像上 y_0 处刻度尺的刻度值就是 Y_0 。

测量出不同刻度线在图像上的高度 y_{abs} , 分别算出每一组数据的 Y 和 y , 得到多组 $(1/y, 1/Y)$ 。由(2)式, 根据最小平方误差准则做线性拟合, 得到

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n (1/y_i) \cdot (1/Y_i) - n \cdot \overline{1/y} \cdot \overline{1/Y}}{\sum_{i=1}^n 1/y_i^2 - n \cdot (\overline{1/y})^2}, \quad b = \overline{1/Y} - k \overline{1/y}, \quad (8)$$

把已测得的值 $(1/y, 1/Y)$ 代入(8)式中, 求出 k 和 b 的值。

光刀方向定标时, 为了避免 Y_0 的测量误差带来累计误差, 将(4)式变换成

$$r = -dY_{\text{abs}} + c', \quad (9)$$

式中

$$Y_{\text{abs}} = Y + Y_0, \quad c' = c + dY_0. \quad (10)$$

测量出不同高度处刻度尺的实际宽度和在图像上的宽度, 算出不同高度处的 r , 得出多组 (Y_{abs}, r) 。由(9)式, 根据最小平方误差准则做线性拟合, 得到

$$d = -\frac{\sum_{i=1}^n Y_{\text{abs}i} \cdot r_i - n \cdot \overline{Y_{\text{abs}}} \cdot \overline{r}}{\sum_{i=1}^n Y_{\text{abs}i}^2 - n \cdot \overline{Y_{\text{abs}}}^2}, \quad c' = \overline{r} + d \overline{Y_{\text{abs}}}, \quad (11)$$

把已测得的值 (Y_{abs}, r) 代入(11)式中, 求出 d 和 c' 的值, 再由(10)式求出 c 。

4 实验与结果分析

4.1 实验测量系统

实验装置激光光刀为西安华科生产的, 波长为 635 nm, 光刀主要参数为: 出瞳功率小于等于 2.5 mW; 6 m 处线宽小于等于 1 mm; 6 m 处线长弯曲小于等于 1 mm; 光束发散度为 0.1~1.5 mrad; 发散角为 $10^\circ \sim 110^\circ$ 。CCD 摄像机的型号是 MINTRON MTV-1881EX, 采集卡为天敏 SDK2000。采集图像的像素是 704×576 。系统搭建时在参考平面上贴一张坐标纸, 帮助系统搭建。

4.2 系统定标

4.2.1 高度方向定标

垂直方向定标的的数据如表 1 所示, 表中 Y_0, Y_{abs}, Y 分别为 H 轴坐标原点相对于参考面的高度、刻度尺的刻度值和坐标值。 y_0, y_{abs}, y 分别为 h 轴坐标原点相对于图像的上边缘的像素差、测量点相对于上边

缘的绝对像素差和坐标值。

表 1 高度方向定标数据
Table 1 Calibration data in height direction

Y_{abs}/mm	$Y_0 = 46.2 \text{ mm}$		$y_0 = 288$		
	$Y = Y_{\text{abs}} - Y_0$	$1/Y$	y_{abs}	$y = y_0 - y_{\text{abs}}$	$1/y$
0	-46.2	-0.021645	544	-256	-0.003906
5	-41.2	-0.024718	520	-232	-0.004310
10	-36.2	-0.027624	495	-207	-0.004831
15	-31.2	-0.032051	469	-181	-0.005525
20	-26.2	-0.038168	443	-155	-0.006452
25	-21.2	-0.047170	416	-128	-0.007813
30	-16.2	-0.061728	388	-100	-0.010000
35	-11.2	-0.089286	358	-70	-0.014286
60	13.8	0.072464	196	92	0.010870
65	18.8	0.053191	160	128	0.007813
70	23.8	0.042019	123	165	0.006061
75	28.8	0.034722	85	203	0.004926
80	33.8	0.029586	45	243	0.004115
85	38.8	0.025773	4	284	0.003521

对数据线性拟合得： $k = 6.426760$ ， $b = 0.003084$ 。

4.2.2 光刀方向定标

光刀方向定标数据如表 2 所示， L 表示刻度尺的宽度，由于所用刻度尺是等宽的，故 L 为多次测量的平均值，实验中宽度测量使用的是精度为 0.02 mm 的游标卡尺，测量 4 次，测量数据为表 2 中的 $L_1 \sim L_4$ 。 X_1 和 X_2 是图像上刻度尺边缘距离图像左边缘的像素差， l 为图像上刻度尺的宽度。 Y_{abs} 表示刻度值。

表 2 光刀方向定标数据
Table 2 Calibration data in light-knife direction

$L_1 = 26.70 \text{ mm}$	$L_2 = 26.72 \text{ mm}$	$L_3 = 26.70 \text{ mm}$	$L_4 = 26.72 \text{ mm}$	$L = 26.71 \text{ mm}$
Y_{abs}/mm	X_1	X_2	$l = X_1 - X_2 + 1$	L/l
10	458	257	202	0.1322277
20	462	254	209	0.1277990
30	467	251	217	0.1230876
40	471	248	224	0.1192411
50	476	245	232	0.1151293
60	482	242	241	0.1108299
70	488	239	250	0.1068400
80	493	236	258	0.1035271

对数据线性拟合得： $d = 0.0004126$ ， $c' = 0.1359022$ ，所以 $c = 0.1168400$ 。

4.3 结果及分析

快速采集 5 幅左手中指的图像，应用多幅图平均法去除噪声，降噪后的图如图 4(a)所示。编写软件测量中指的 2, 3 小节，用自适应光刀中心提取法^[10,11]提取光刀图像中心，如图 4(b)所示，光刀中的白色细线为光刀中心。由图 4(b)可得测量结果为 47.4 mm。中指 2, 3 小节的真实长度用胶带和游标卡尺直接测量，先用胶带紧贴中指 2, 3 小节，如图 5(a)所示，再将胶带贴于刻度尺上初测，如图 5(b)，测量的结果为 46.9 mm，再用游标卡尺测量，如图 5(c)，测量结果为 46.92 mm。测量结果取三位有效数字，所以实际测

量结果为 46.9 mm。根据相对误差计算公式 $r = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\%$ (其中 ΔL 为绝对误差, L_0 为标称值), 计算实验的相对误差为: $r=1.1\%$, 测量结果精度较高。

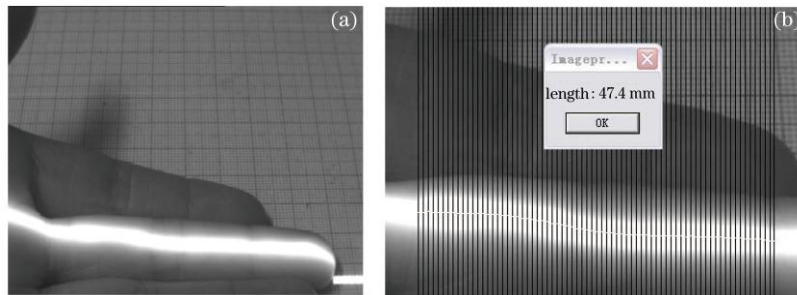


图 4 手指测量图。(a)测量图; (b)光刀中心和测量结果

Fig.4 Images of finger measurement. (a) image of measurement; (b) center of light-knife and result of measurement

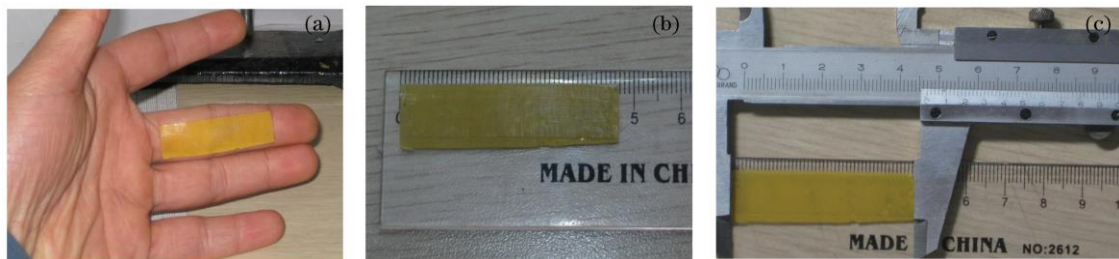


图 5 手工测量手指长度。(a)胶带贴于手指; (b)刻度尺测量胶带长度; (c)游标卡尺测量胶带长度

Fig.5 Images of finger length measurement by hand. (a) tape pasted on the finger; (b) image of tape length measurement using scale;

(c) image of tape length measurement using vernier calipers

4.4 主要影响因素及改进途径

影响测量精度的主要因素有: 1) 光刀的线直度、光束发散度和光束宽度, 这些参数决定了投射到被测物体上的光束质量, 影响后续的图像处理; 2) 直接测量时带来的误差。直接测量是接触式测量, 将一定程度地改变被测物体表面的轮廓, 影响直接测量的精度, 影响相对误差; 3) 摄像头的分辨率。摄像头的分辨率直接影响定标精度及测量结果的相对精度和绝对精度, 这是影响精度的最主要因素。

提高精度的途径: 1) 选用参数更好的光刀, 且在图像处理时作光学补偿; 2) 使用高分辨率摄像头, 提高定标精度和测量结果的精度。为了充分体现光刀测量的优势, 进一步的研究工作为: 1) 提高光刀测量的精度, 使之能更广范地用于现代精加工工艺; 2) 提高光刀测量的速度, 使之能用于多种高速测量中。

5 结 论

文章对三维物体光刀切口长度的测量做了较深入的研究, 分析了基本原理, 提出了定标方法, 并进行了实验。基于激光三角法原理分析了三维物体光刀切口长度测量的原理, 分析表明在高度方向物体相对高度的倒数和像相对高度的倒数成线性关系, 光刀方向物像长度比和物体相对高度成线性关系。基于高度方向和光刀方向的线性关系提出了使用直尺的新型线性定标方法, 该方法简单可靠, 定标精度高, 不需水平导轨等复杂的定标工具。搭建实际系统测量了左手中指 2, 3 小节的长度, 实验结果表明该测量方法精度较高, 实验中相对误差为 1.1%。并且该测量方法测量算法简单, 图像处理简单, 无复杂运算, 测量速度快, 测量效率高。整个系统简单可靠、成本低、运用广泛。

参 考 文 献

- 1 He Min, Hu Yihua, Zhao Nanxiang *et al.*. Application of airborne three-dimensional laser imaging[J]. *Laser & Optoelectronics*

- Progress*, 2008, **45**(4): 43~49
贺敏, 胡以华, 赵楠翔等. 机载激光三维成像技术应用现状[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(4): 43~49
- 2 Chen Bingsheng, Liu Baoying. On line measurement of steer, wire, and deformed steel bar cross section[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(2): 79~83
陈炳生, 刘宝瑛. 棒、线材及螺纹钢截面形状在线测量技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(2): 79~83
- 3 Sun Yuchen, Ge Baozhen, Zhang Yimo. Review for the 3D information measuring technology[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(2): 0248~0254
孙宇臣, 葛宝臻, 张以谟. 物体三维信息测量技术综述[J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(2): 248~254
- 4 Mao Xianfu, Su Xianyu, Chen Wenjing *et al.*. Analysis on measurement method of improved Fourier transforms profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1291~1295
毛先富, 苏显渝, 陈文静等. 改进傅里叶变换轮廓术的测量算法研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1291~1295
- 5 Ouyang Jing, Lü Naiguang, Wu Di. Application of temporal phase unwrapping method in phase measurement profilometry[J]. *J. Beijing Ins. Mach.*, 2007, **22**(1): 0001~0004
欧阳京, 吕乃光, 吴迪. 基于时间相位展开算法的相位测量轮廓术[J]. *北京机械工业学院学报*, 2007, **22**(1): 0001~0004
- 6 Huang Hongyun, Zhang Yafeng. Study on the optical 3D measurement based on modulation[J]. *Opt. Instrum.*, 2008, **30**(3): 0018~0021
黄红云, 张亚锋. 基于调制度的光学三维测量的研究[J]. *光学仪器*, 2008, **30**(3): 0018~0021
- 7 Shao Shuangyun, Su Xiangyu, Wang Hua *et al.*. Calibration of the measurement system based on modulation measurement profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 203~206
邵双运, 苏显渝, 王华等. 调制度测量轮廓术的系统标定[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 203~206
- 8 Wang Xiaojia, Gao Jun, Wang Lei. Survey on the laser triangulation[J]. *Chin. J. Sci. Instrument*, 2004, **25**(suppl.): 601~604
王晓嘉, 高隽, 王磊. 激光三角法综述[J]. *仪器仪表学报*, 2004, **25**(增刊): 601~604
- 9 Yang Zaihua, Li Yuhe, Li Qingxiang *et al.*. Measuring profile system based on optical rriangular method[J]. *Opt. Tech.*, 2005, **31**(4): 0622~0623
杨再华, 李玉和, 李庆祥. 一种基于光学三角法的形貌测量系统[J]. *光学技术*, 2005, **31**(4): 0622~0623
- 10 Zhong Liyun, Yang Qimin, Wang Yi *et al.*. Optical triangle method for real time measuring thickness of metal plate[J]. *Laser Technol.*, 1998, **22**(3): 136~138
钟丽云, 杨齐民, 王翊等. 光学三角法实时测量金属板厚[J]. *激光技术*, 1998, **22**(3): 136~138
- 11 Wan Jin, Huang Yuanqing. Study on laser triangulation method measurement[J]. *J. Sanming University*, 2006, **23**(4): 0361~0364
万瑾, 黄元庆. 激光三角法测量的研究[J]. *三明学院学报*, 2006, **23**(4): 0361~0364
- 12 Wu Jianbo, Cui Zhen, Zhao Hong *et al.*. An adaptive threshold method for light-knife center acquisition[J]. *Semicond. Optoelectronics*, 2001, **22**(1): 0062~0064
吴剑波, 崔振, 赵宏等. 光刀中心自适应阈值提取法[J]. *半导体光电*, 2001, **22**(1): 0062~0064
- 13 Yang Jia, Jia Shuhai. A novel method of three dimensional profile measurement[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6): 0972~0975
杨佳, 贾书海. 一种新的三维轮廓测量方法[J]. *光子学报*, 2007, **36**(6): 0972~0975