

文章编号 1004-924X(2012)06-1357-08

利用轮廓线多边形表示实时提取光带中心线

田庆国*, 葛宝臻, 李云鹏, 侯培

- (1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;
2. 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要:提出了一种亚像素光带中心线实时提取方法。首先,通过跟踪光带轮廓线并进行多边形表示将光带分段;然后,利用轮廓线的逆时针排序特性以及分段光带方向和横截面方向的正交关系,采用序号表示方法计算光带横截面扫描线方向;最后,在扫描线上设计了自适应光带横截面宽度变化的灰度重心法计算亚像素坐标。针对6传感器线激光人脚扫描仪采集的分辨率为640 pixel×480 pixel的典型位置光带位图进行了实验,结果显示,采用本方法提取光带中心线用时不超过3.1 ms,精度达到亚像素级,能够满足多传感器线激光扫描视觉系统对光带中心线提取的实时性和高精度的要求。

关键词:计算机视觉;光带中心线提取;光带轮廓线;多边形表示;自适应重心法

中图分类号:TP391.4;TP242.62 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122006.1357

Real-time extraction of light stripe central line based on contour polygonal representation

TIAN Qing-guo*, GE Bao-zhen, LI Yun-peng, HOU Pei

- (1. College of Precision Instruments and Opto-electronics Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology of the
Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

* Corresponding author, E-mail: tianqingguo@tju.edu.cn

Abstract: A method to extract a light stripe central line with sub-pixel precision in real time was presented. First, the light stripe was segmented by light stripe contour tracking and the contour polygon representation. Then, based on the counter-clockwise sorting characteristics of contour and the orthogonal relationship between cross section direction and corresponding segmented light stripe direction, the scanning line direction of segmented light stripe was calculated by using a serial representation method. Finally, an adaptive barycenter method that can change adaptively the cross section width was designed on the scanning line to calculate the center sub-pixel coordinates. For the 640 pixel×480 pixel light stripe bitmaps captured by a 3D laser foot scanner with 6 CCDs at typical positions, the extraction time for central line is less than 3.1 ms in sub-pixel precision. The algorithm proposed here can satisfy the requirements of multi-sensor line laser scanning vision measurement system for re-

收稿日期:2012-02-16;修订日期:2012-03-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61027012, No. 61177002)

al time, high precision as well as high speeds.

Key words: computer vision; central line extraction; light stripe contour; polygon representation; adaptivebary center method

1 引言

光带中心线提取是基于线结构光扫描和三角测量原理的视觉测量系统^[1]中的关键环节,直接影响从像素坐标获取的三维世界坐标的精度。光带中心线提取通常包括光带横截面定位和横截面上中心坐标计算 2 个步骤。在光带横截面上计算中心坐标的常用方法有:(1)提取横截面的几何中心^[2],如阈值法、梯度中心法;(2)骨架提取法,如二值形态学细化法^[3];(3)提取光带的能量中心^[4-7],如极值法、重心法、拟合法等。为了自适应光带横截面上的灰度信息,先后又提出了自适应阈值重心法^[8]、自适应重心迭代法^[9]、可变形模型法^[10]、自适应窗曲线拟合^[11]和变边界高斯拟合^[12]等方法。由于噪声的存在,阈值法、梯度中心法和极值法等很难达到亚像素精度;骨架提取法只能得到像素级的光带中心,且易出现分叉、毛刺等现象,常常作为后续算法的基础;拟合法很难满足实时性要求;灰度重心法因有多个像素参与加权计算,抗噪能力较强,精度较高,且运行速度快。

如何定位光带横截面的方向是目前该类算法的研究重点,如隋连升等^[6]和吴家勇等^[13]采用固定方向扫描方式,如行扫描或列扫描方式,当光带曲率变化较大时,该类方法提取的光带中心线容易出现数据缺失或计算错误的情况;Steger 等^[14]提出应用 Hessian 矩阵方法计算光带横截面的方向,但计算非常费时;胡坤等^[5]将大模板高斯卷积应用于 Hessian 矩阵计算,加速了光带中心提取速度,但处理一帧位图仍需 200 ms;胡斌等^[15]和吴庆阳等^[16]提出通过定义多个固定大小的可变方向模板计算光带横截面的方向;BAZEN 等^[17]提出应用灰度梯度与主成分分析方法计算光带横截面方向;熊会元等^[18]改进 BAZEN 方法,可提取全分辨率的光带中心线;贾倩倩等^[19]

采用灰度梯度近似法计算光带横截面方向,用时 354 ms 完成一帧图像的光带中心提取。

在分析已有方法的基础上,本文提出一种新的光带中心线提取方法。通过跟踪光带轮廓线并用多边形表示轮廓线将光带分割成若干段;根据光带轮廓线多边形表示快速计算每段光带的方向序号,进而得到该段光带横截面的方向向量;在光带横截面方向上采用自适应扫描灰度重心法计算中心点的亚像素坐标。

2 算法原理描述

2.1 光带轮廓线跟踪

为了实现光带轮廓线跟踪,需对原始光带灰度位图进行二值化。根据视觉测量系统所得光带灰度位图的特征选取合适的灰度阈值 g_{th} ,用式(1)实现灰度位图的二值化。

$$\omega(x, y) = \begin{cases} 0 & f(x, y) < g_{th} \\ 1 & f(x, y) \geq g_{th} \end{cases}, \quad (1)$$

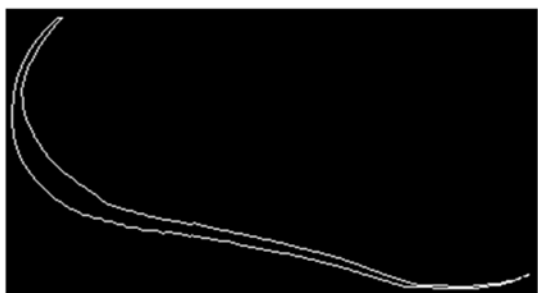
式中 $f(x, y)$ 表示原始位图在像素坐标 (x, y) 处的灰度值; $\omega(x, y) = 0$ 表示背景,简称 0-像素; $\omega(x, y) = 1$ 表示光带,简称 1-像素。

光带轮廓线是指二值图像中 0-像素和 1-像素分界处 1-像素点构成的离散点序列^[20]。本文选用文献[20]的方法快速获得光带轮廓线,且轮廓线上的点按逆时针方向自动排序。图 1(a)是



(a) 原始光带位图

(a) Initial light stripe bitmap



(b)轮廓线提取结果

(b) Contour extracted

图 1 原始光带位图及其轮廓线提取

Fig. 1 Initial light stripe bitmap and contour result

某扫描仪得到的典型光带位图,图 1(b)是选择 $g_{th}=60$ 对图 1(a)二值化后提取出的光带轮廓线结果。

2.2 光带轮廓线多边形表示

轮廓线多边形表示的目的是精简轮廓线上点的个数,将轮廓线分段,便于分段计算光带横截面方向,算法如下:(1)设置距离阈值 d_{th} ; (2)从轮廓线上选择两个距离最远的点,如图 2(a)中的 a 和 b ,生成线段 \overline{ab} (可以看作退化的多边形); (3)在轮廓线上寻找距离当前多边形最远的点,设图 2(b)中的点 c 到线段 \overline{ab} 的欧式距离 $dist = ||co||$ 最大,点 o 是点 c 在线段 \overline{ab} 上的垂足。当 $dist > d_{th}$,用多边形 \overline{abc} 更新线段 \overline{ab} ; (4)迭代地运行步骤 (3),直到即将加入到多边形序列中的点到多边形的距离 $dist \leq d_{th}$ 为止,图 2(c)中包含顶点 a, b, c 的点集即为多边形顶点。

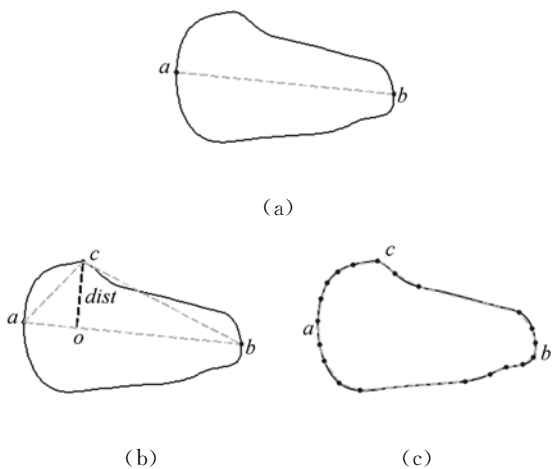


图 2 光带轮廓线多边形表示原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of contour polygon representation

图 3 是当 $d_{th}=2$ 时图 1(b)光带轮廓线的多边形表示结果,星号(*)点是多边形顶点。通过轮廓线多边形表示,将光带分成了若干段,便于分段计算了光带方向和横截面方向。

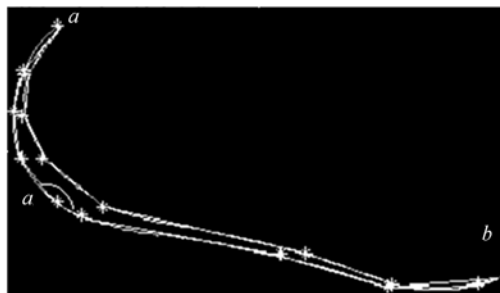


图 3 图 1(b)光带轮廓线的多边形表示

Fig. 3 Contour polygon representation of Fig. 1(b)

2.3 分段计算光带横截面方向

参考图 4,由于光带轮廓线是逆时针连续存储的,设 p_i 和 p_{i+1} 是光带轮廓多边形中任意相邻两点,该段光带的方向向量 $v = (x_{p_{i+1}} - x_{p_i}, y_{p_{i+1}} - y_{p_i})$,而 $[p_i, p_{i+1}]$ 段光带横截面方向,即扫描线向量 n 与 v 的关系为

$$n = -1/v, \tag{2}$$

为了进一步提高方向向量 n 的计算速度,基于分段光带的方向和光带横截面方向的正交特性,采用序号表示方法计算了光带横截面方向。

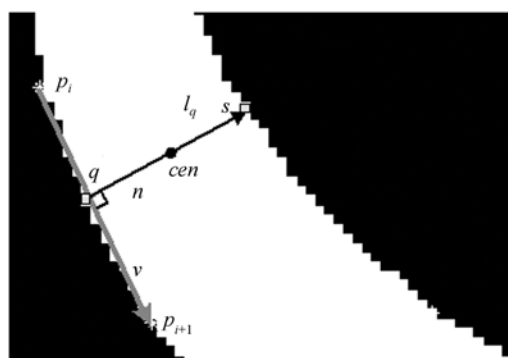


图 4 分段计算光带方向和光带横截面方向

Fig. 4 Schematic diagram for direction calculation of segmented light stripe and its cross section

如图 5,将二维坐标系等分为 8 个区间,序号 0~7 既表示每个区间,也表示该区间的中分线。光带方向 v 的序号和扫描线方向 n 的序号之间关

系为:

$$Index_n = (Index_v + 6) \bmod 8, \quad (3)$$

式中 $index_v$ 是光带方向 v 所在区间的序号, $index_n$ 是对应的扫描线方向序号, 取值为 $0 \sim 7$ 的整数, \bmod 表示取模运算。如光带方向 v 在区间 1 中, 则扫描线方向 n 序号就为 7 (粗实线所示), 对应的扫描线方向向量为 $n = (1, 1)$ 。

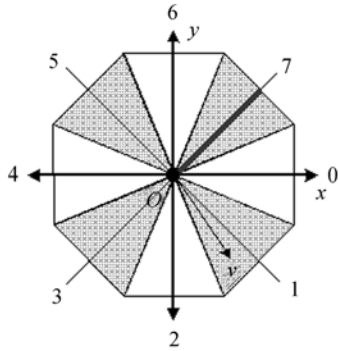


图 5 光带方向和扫描线方向的关系

Fig. 5 Relationship between light stripe direction and scanning line direction

2.4 自适应扫描重心法计算光带横截面中心

在图 4 中点 q 是轮廓线 $[p_i, p_{i+1})$ 上的任一点, 以点 q 为起点, 以 n 为方向向量可确定扫描线 l_q 。在扫描线 l_q 上, 光带中心的亚像素坐标采用自适应重心法求得

$$x_{cen} = \frac{\sum_{q_j \in l_q \& f(q_j) > g_{th}} x_{q_j} \times f(q_j)}{\sum_{q_j \in l_q \& f(q_j) > g_{th}} f(q_j)}, \quad (4)$$

$$y_{cen} = \frac{\sum_{q_j \in l_q \& f(q_j) > g_{th}} y_{q_j} \times f(q_j)}{\sum_{q_j \in l_q \& f(q_j) > g_{th}} f(q_j)}, \quad (5)$$

式中 q_j 是扫描线 l_q 上的像素点, 灰度值大于灰度阈值 g_{th} 。图 4 中的点 cen 即为通过式 (4)~(5) 计算出的一个光带中心点。

实验发现, 在光带的端点处, 轮廓线多边形中两相邻边的内夹角 α 最小 (内夹角定义参见图 3), 据此可进一步提高光带中心线计算速度: (1) 计算轮廓线多边形中每个顶点处的内夹角; (2) 找出内夹角最小的两个顶点, 如图 3 中的 a 和 b ; (3) 按照逆时针方向遍历轮廓线上从 a 到 b 的每个点, 通过式 (3)~(4) 计算光带的亚像素中心坐标。这样可以将运算量减少约 $1/2$ 。

3 实验系统和结果分析

利用实验室开发的线激光人脚扫描仪验证所提算法。系统如图 6, 3 个线激光器 (L1~L3) 和 6 个 CCD 构成传感系统, 线激光器发出的线激光形成一个光平面, 6 个 CCD 的光轴与光平面等角度, 整个传感系统安装在由步进电机驱动的平移台上, 实现对待测人脚表面的快速数字化。CCD 的分辨率为 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$, 帧频为 30 frame/s 。可见, 要实现实时扫描, 光带中心提取速度必须大于 $6 \times 30 = 180 \text{ frame/s}$, 即每帧位图的处理时间应少于 5.5 ms 。

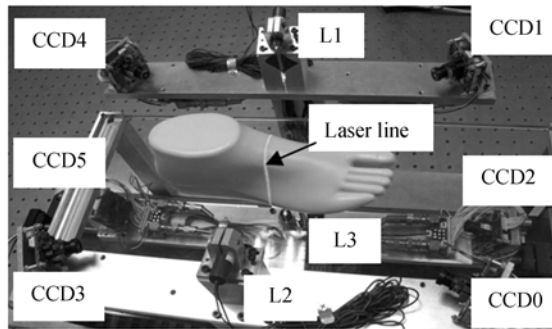
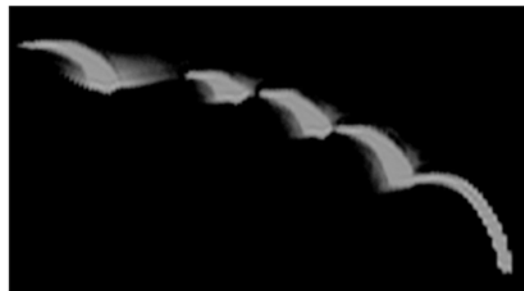


图 6 线激光人脚扫描仪

Fig. 6 Line laser human foot scanner

为了说明本文算法的有效性, 选取 3 个典型位置的光带位图进行中心线提取实验。图 1(a) 是图 6 中激光线处的光带位图, 图 7(a) 是脚趾位置的光带位图, 图 7(b) 是脚后跟位置的光带位图。可以看出光带具有曲率变化大、横截面变化大以及不连续等特征。

在主频 Pentium 2.8G、内存 1 G 的 PC 机上, 利用 VS2005 实现中心线提取算法。图 7(c)、(d) 和 (e) 是图 1(a)、图 7(a)、(b) 光带位图的中心线



(a)



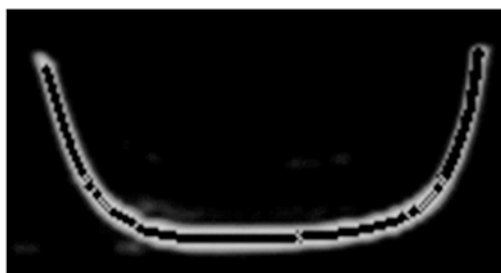
(b)



(c)



(d)



(e)

图 7 典型光带位图及其中心线提取结果

Fig. 7 Typical light stripe bitmaps and central line extraction results

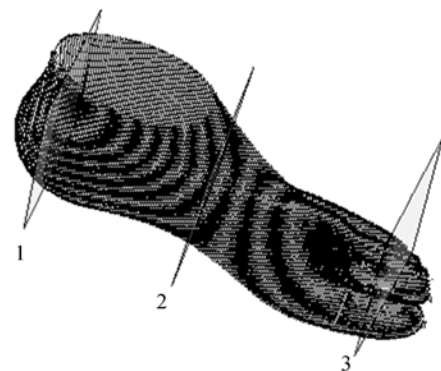
提取结果,光带中的黑线即为光带中心线,可见本文算法能实现对复杂光带位图的中心线高精度提取。表 1 是算法中各步骤用时统计,典型光带中心线提取的用时均不超过 3.1 ms,完全能够满足系统实时性要求。

表 1 本文算法提取图 3(a)光带中心线用时统计

Tab. 1 Statistics for extraction time of typical light stripe centerline using method presented

用时/ms	步骤		
	轮廓线提取	多边形表示	光带中心提取
图 7(c)	1.809	0.158	1.128
图 7(d)	1.832	0.147	1.028
图 7(e)	1.801	0.151	1.056

图 8(a)是应用本文算法提取光带中心,进而获得的人脚模型表面轮廓点云数据,在 12 s 时间间隔内处理有效位图帧数为 $6 \times 230 = 1380$ frame,获得的点云总点数为 136 759 个。在图 8(a)中选择典型截面位置 1、2 和 3 以观察截面上不同传感器所得点云的拼接情况,结果如图 8(b)中的 1、2 和 3 所示,不同传感器得到的数据用不同颜色表示,可见不同传感器得到的点云拼接很好,说明光带中心线提取算法达到精度要求,所得人脚点云模型完全能够满足后续应用的要求。



(a)



(b)

图 8 人脚模型表面轮廓点云图和各截面点云图

Fig. 8 Point cloud of human foot model and 3 cross sections

4 结 论

提出一种实时的亚像素光带中心线提取算法。与已有的光带横截面定位方法不同,通过提取光带轮廓线并进行多边形表示将光带分段;基于分段光带的方向与光带横截面方向的正交特

性,采用序号表示方法快速计算横截面的扫描线方向;在扫描线上,设计了自适应光带横截面宽度变化的灰度重心法计算亚像素中心坐标。通过该方法提取光带中心,对于分辨率为 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ 的位图,用时不超过 3.1 ms ,完全能够满足多传感器线激光扫描视觉系统的实时性、高精度要求。

参考文献:

- [1] 葛宝臻,孙明睿,吕且妮,等. 光带法激光三维人体扫描系统研究[J]. 光电子激光, 2003,14(7): 733-736.
GE B ZH, SUN M R, LU Q N, *et al.*. Research of a laser 3D body scanning system by light stripe method [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2003,14(7):733-736. (in Chinese)
- [2] RIOUX M, BIRD T. White laser, synced scan [J]. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 1993,13(13):15-17.
- [3] 刘枝梅,邓文怡,娄小平. 结构光测量系统中光条中心的提取算法[J]. 北京机械工业学院学报, 2009,24(1):42-45.
LIU ZH M, DENG W Y, LOU X P. Extraction algorithm of light stripes center in the measurement system of structured light[J]. *Journal of Beijing Institute of Machinery*, 2009, 24(1): 42-45. (in chinese)
- [4] 李中伟,王从军,史玉升. 一种结合梯度锐化和重心法的光条中心提取算法[J]. 中国图象图形学报, 2008,13(1):64-68.
LI ZH W, WANG C J, SHI Y SH. An algorithm for detecting center of structured light stripe combining gradient sharpening with barycenter method [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(1):64-68. (in Chinese)
- [5] 胡坤,周富强,张广军. 一种快速结构光条纹中心亚像素精度提取方法[J]. 仪器仪表学报, 2006,27(10):1326-1329.
HU K, ZHOU F Q, ZHANG G J. Fast extrication method for sub-pixel center of structured light stripe [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006,27(10):1326-1329. (in Chinese)
- [6] 隋连升,李兵,蒋庄德. 基于 NURBS 曲线插值的激
光刀图像中心提取方法的研究[J]. 中国激光, 2003,30(10):933-937.
SUI L SH, LI B, JIANG ZH D. Research on method of laser-knife center position extracting based on NURBS interpolation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003,30(10):933-937. (in Chinese)
- [7] 解则晓,张成国,张国雄. 基于 B 样条迭代法的激光光条噪声去除技术研究[J]. 光学技术, 2005, 31(3):430-433.
XIE Z X, ZHANG CH G, ZHANG G X. Research on removing the noise on the laser stripe based on the iterative fitting of B-spline [J]. *Optical Technique*, 2005,31(3):430-433. (in Chinese)
- [8] 吴剑波,崔振,赵宏. 光刀中心自适应阈值提取法[J]. 半导体光电, 2001,22(1):62-64.
WU J B, CUI ZH, ZHAO H. An Adaptive Threshold method for light-knife center acquisition [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2001,22(1): 62-64. (in Chinese)
- [9] 崔希君,杨川,刘保华,等. 线性结构光心的自适应迭代提取法[J]. 西安交通大学学报, 2007,41(1): 73-76.
CUI X J, YANG CH, LIU B H, *et al.*. Self-adaptive iterative method of extracting center of linear-structured light stripe [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2007,41(1):73-76. (in Chinese)
- [10] 杨雪荣,张湘伟,成思源,等. 基于可变形模型的光条纹中心提取方法研究[J]. 中国机械工程, 2009,20(3):334-337.
YANG X R, ZHANG X W, CHENG S Y, *et al.*. Research on the method for extracting the centre of light stripe based on deformable Model[J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, 20(3): 334-337. (in Chinese)
- [11] 刘涛,王宗义,于秀辉. 基于自适应窗曲线拟合的结构光条纹中心提取[J]. 半导体光电, 2010,31

- (1):151-154.
- LIU T, WANG Z Y, YU X H. Curve fitting method based on adaptive window for center extracting of structured light stripe [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2010, 31(1):151-154. (in Chinese)
- [12] 高世一, 杨凯珍. 变边界高斯拟合提取激光条纹中心线方法的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(5):1132-1137.
- GAO SH Y, YANG K ZH. Research on central position extraction of laser strip based on varied-boundary Gaussian fitting [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(5):1132-1137. (in Chinese)
- [13] 吴家勇, 王平江, 陈吉红, 等. 基于梯度重心法的线结构光中心亚像素提取方法[J]. *中国图象图形学报*, 2009, 14(7):1354-1360.
- WU J Y, WANG P J, CHEN J H, *et al.*. Method of linear structured light sub-pixel center position extracting based on gradient barycenter [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2009, 14(7):1354-1360. (in Chinese)
- [14] STEGER C. An unbiased detector of curvilinear structures [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(2):113-125.
- [15] 胡斌, 李德华, 金刚. 基于方向模板的结构光条纹中心检测方法[J]. *计算机工程与应用*, 2002, 11:59-60.
- HU B, LI D H, JIN G. New method for obtaining the center of structured light stripe by direction template [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2002, 11:59-60. (in Chinese)
- [16] 吴庆阳, 苏显渝, 李景镇, 等. 一种新的线结构光光带中心提取算法[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2006, 38(5):148-151.
- WU Q Y, SU X Y, LI J ZH, *et al.*. A new method for extracting the centre-line of line structure light-stripe [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2006, 38(5):148-151. (in Chinese)
- [17] BAZEN A M, GEREZ S H. Systematic methods for the computation of the directional fields and singular points of fingerprints [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(7):905-918.
- [18] 熊会元, 宗志坚, 陈承鹤. 线结构光条纹中心的全分辨率精确提取[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(5):1057-1062.
- XIONG H Y, ZONG Z J, CHEN CH H. Accurately extracting full resolution centers of structured light stripe [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5):1057-1062. (in Chinese)
- [19] 贾倩倩, 王伯雄, 罗秀芝. 光切法形貌测量中光条中心的亚像素提取[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(2):390-396.
- JIA Q Q, WANG B X, LUO X ZH. Extraction of central positions of light stripe in sub-pixel in 3D surface measurement based on light sectioning method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2):390-396. (in Chinese)
- [20] HAIG T D, ATTIKIOUZEL Y. Border following: new definition gives improved borders [J]. *IEEE Proceedings-I*, 1992, 139(2):206-211.

作者简介:



田庆国(1973—),男,河北丰南人,博士,讲师,2004年于燕山大学获得硕士学位,2007年于天津大学获得博士学位,主要从事机器视觉及图像处理方面的研究。E-mail: tianqingguo@tju.edu.cn



葛宝臻(1964—),男,内蒙古卓资人,教授,博士生导师,1987年、1990年、1993年于天津大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事激光三维彩色数字化理论与技术、粒子场测量理论与技术和数字全息理论与应用等方面的研究。E-mail: gebz@tju.edu.cn



李云鹏(1987—),男,天津人,硕士研究生,2010年于南开大学获得学士学位,主要从事激光三维数字化技术方面的研究。E-mail: liyunpengtj@139.com



侯培(1987—),女,河北人,硕士研究生,2010年于合肥工业大学获得学士学位,主要从事三维空间数据场建模方面的研究。E-mail: houpei2006@163.com

● 下期预告

微装配正交精确对准系统的设计

唐永龙,张之敬*,张晓峰,孙媛

(北京理工大学机械与车辆学院,北京 100081)

为实现人机协同的微装配系统对微小型平板类结构件的高精度装配,针对目前在平板类零件微装配系统设计过程中面临的问题,提出采用正交光学对准机构,并对高精度对准机构模块误差的产生进行了分析计算。建立了基于显微机器视觉及正交光学对准的微装配系统平台,对本文提出的方法进行了微装配实验。本装配系统在装配的一致性与装配效率方面有较大的改善与提高。提出的光学对准方法可有效地用于平板结构的硅微 MEMS 器件和非硅 MEMS 器件等集成的复杂微小型异构机电系统的装配。该平台具有很好的开放性和可移植性。棱镜正交对准机构产生 0.001° 的角度误差时对准理论偏差小于 $0.98 \mu\text{m}$,实际实验微装配平台系统装配精度小于 $5 \mu\text{m}$ 。该精度满足平板类微小型结构件装配的一般精度需求。