

基于改进灰度重心法的光带中心提取算法

张小艳¹, 王晓强², 白福忠¹, 田朝平¹, 梅秀庄¹

(1. 内蒙古工业大学机械学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古工业大学信息工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010080)

摘 要:在线结构光三维测量中, 由于线结构光光源质量、物体表面反射率非均匀性以及表面粗糙性等因素的影响, 激光光带经常会出现宽度不均匀, 光带亮度不集中、离散性较大的现象。本文提出一种改进灰度重心法提取激光光带中心线, 该算法基于自适应二值化处理得到光带各列法向宽度值以及光带的准确边界。然后, 利用光带边界与灰度数据进行灰度重心计算确定出光带的中心位置。结果证实, 改进算法中灰度重心的计算范围与光带宽度相一致, 因而具有较高的提取精度和良好的适应性。

关键词:三维测量; 线结构光; 三角测量法; 光带中心; 改进灰度重心法

中图分类号:TP391.41 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.05.022

Improved gray centroid method for extracting the centre-line of light-stripe

ZHANG Xiao-yan¹, WANG Xiao-qiang², BAI Fu-zhong¹, TIAN Chao-ping¹, MEI Xiu-zhuang¹

(1. College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of technology, Hohhot 010051, China;

2. College of Information Engineering, Inner Mongolia University of technology, Hohhot 010080, China)

Abstract: In three-dimensional testing systems based on line structured-light, due to the effect of the line structured-light quality and the nonuniform of object surface reflectivity as well as the surface roughness, the laser stripe often appears some problems such as the uneven width, non-concentrated brightness and larger discreteness. An improved gray centroid method to extract the center line of laser stripe was proposed. Based on the adaptive binarization processing, the normal widths of each column and accurate edge of the light stripe were obtained. Then, according to light stripe's edge and gray data, the center of light stripe was calculated by the gray centroid method. The results prove that the calculated range of centroid in the improved method is consistent with light stripe width, so it has high extraction accuracy and good adaptability.

Key words: 3D measurement; line-structured light; triangulation method; light stripe center; improved barycenter algorithm

1 引言

线结构光测量系统主要基于光学三角测量原理, 由激光发生器和 CCD 传感器共同作为结构光

图像传感器组成视觉测量系统。激光器发射出的带状光束投射到被测物体表面上被调制成包含特定信息的激光光带, CCD 拍摄被调制后的激光光

基金项目:内蒙古自治区自然科学基金项目(No. 2015MS0616)资助。

作者简介:张小艳(1990-), 女, 硕士研究生, 主要从事机器视觉方面的研究。E-mail: zhangxy_endeavor@163.com

通讯作者:白福忠(1979-), 男, 博士, 教授, 主要从事光学测试方面的研究。E-mail: fzbaiim@163.com

收稿日期:2015-09-01

带图像,然后进行图像处理分析获取所需的三维信息^[1-4]。

线结构光测量中的图像处理,其关键技术步骤是提取激光光带中心线,其提取精度直接影响测量系统精度^[5-6]。国内外学者提出了许多种光带中心线提取方法,目前常见的方法主要有极值法、阈值法、灰度重心法和 Steger 法^[7-9]。极值法原理简单,运算速度较快,但是当光带光强存在多个极大值时,定位精度降低。阈值法没有考虑光带的方向,在光带曲率变化较大处易出现误判。基于 Hessian 矩阵的 Steger 法精度较高,但是运算量大,不易实现光带法线方向上数据的平滑,提取速度较慢^[10]。灰度重心法通过确定光带中心的粗略位置,然后在该位置附近一定宽度范围内计算灰度重心;仅适用于光带强度分布较为集中,分散性较小,宽度一致性较好的场合^[11]。

然而,在工程应用中,由于高质量的激光器价位偏高,而经常使用普通的激光器产生线结构光,它投射产生的光带质量均匀性较差,通常其强度沿光带延伸方向表现为中间亮,两端偏暗的近似高斯分布。此外,还有一些工程应用场合,被测物体其表面反射率不均匀,局部存在腐蚀或污染等;或者是测量表面粗糙性物体,这时,被调制后的激光光带离散性较大,光带亮度不集中。针对上述两种应用背景,本文提出了一种改进灰度重心法,可消除因光带离散性大,粗细不均匀而引起的数据不当选择,因此具有更高的提取精度。

2 灰度重心法分析

2.1 激光光带特性

由线状激光束投射到被测物体表面所形成的激光光带,在理想情况下,其截面上的光强能量呈对称的高斯分布,如图 1 所示。但是,由于被测物体本身的材质均匀性、透光性、颜色、形状和表面粗糙度等的影响,工件上各处的光强反射率并不相同,在相机观测方向上从被测物体表面反射的光带截面光强的分布发生变化,图像上光带截面的灰度呈不对称的近似高斯分布,即非正态分布。

图 1(b)中的曲线是激光光带在法线方向某一截面上的灰度值分布图,由图可知,在远离光带中心处灰度值很小,进入光带范围内,光带灰度值迅速增大,光带中心附近的像素存在多个极大值,光强分布

近似服从高斯分布。

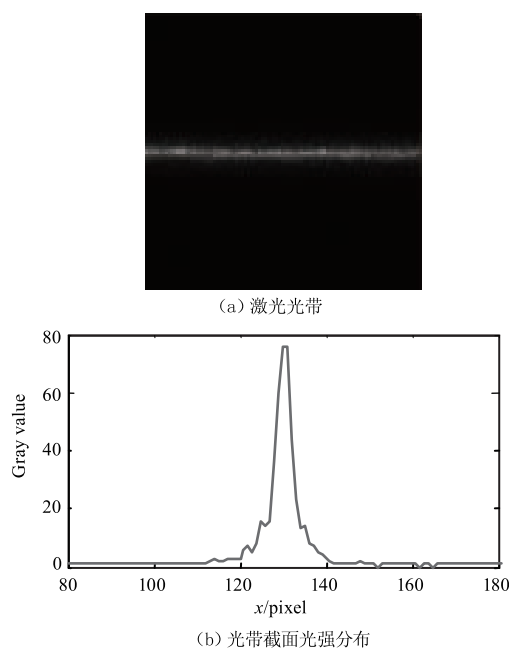


图 1 激光光带及其截面光强图示

Fig. 1 Laser light stripe and cross - section of its intensity

2.2 灰度重心法

灰度重心法是一种光带中心提取算法,其原理是对光带逐列进行计算,把每一列计算出的光带灰度重心的纵坐标作为其中心坐标。沿垂直于光带方向,将光带截面第 k 列坐标位置假设为 (x_k, y_i) , 该列坐标对应的灰度值为 $f(x_k, y_i)$, 其中变量 $i = 1, \dots, M$, M 表示该列光带截面宽度,一般取为奇数。计算公式表示如下:

$$y_k = \frac{\sum_{i=1}^M f(x_k, y_i) \cdot y_i}{\sum_{i=1}^M f(x_k, y_i)} \quad (1)$$

式中, k 表示光带的长度变量,变化范围依据图像尺寸确定。进一步通过去除伪极大值,消除阶跃点,连接断点,以使中心线更为平滑连续。

由灰度重心法的计算公式可知,其原理上与加权算法平均值相同,因此灰度重心法计算结果的稳定性优于极值法。但是,该方法存在一定局限,在实际应用中光带宽度一般根据实际情况确定其大小^[12],从而导致以下两方面问题:

1) 普通线结构光激光器质量一般,在物体表面上形成激光光带沿长度方向强度呈非均匀分布;通常表现为中间较亮,两侧偏暗。另外,当激光光带照射在反射率不一致的物体表面上时,例如物体表面

局部污染,于是光带也将被物体表面调制变得亮暗起伏。此时,恒定不变的 M 值将不再适合,因为此时激光光带的宽窄是不一致的。

2) 当应用于粗糙表面测量时,激光光带由于受到被测表面颗粒度的影响,光带亮度不集中,离散性较大,光带截面强度不再呈现图 1(b) 所示的高斯分布。而灰度重心法是利用光带上有较高灰度值的一部分像素来计算光带中心,其准确性受激光光带能量分布集中性的影响,因而采用灰度重心法时 M 值更加不容易确定。

综上所述,如何合理地、自适应地选择光带截面宽度是激光光带中心提取中达到精确性与实用性的关键技术。

3 改进的灰度重心算法

改进的灰度重心算法是通过对光带图像进行自适应二值化处理,从而确定出光带每一列截面宽度;然后再结合灰度重心公式计算出光带中心位置。本节对该算法的具体原理进行论述。

3.1 光带图像二值化

对于普通线结构光激光器来讲,其光强分布沿图像 x 方向(即光带延伸方向)也近似呈高斯分布,当照射均匀反射率表面上时,一般表现为中间亮、两端偏暗的现象。因此对于光带图像也应该使用高斯分布的动态阈值进行自适应二值化处理,于是,阈值函数的数学模型选择为:

$$T(x) = ae^{(T_n - b)^2/c^2} \quad (2)$$

式中, a 、 b 和 c 为常数,且 $a > 0$ 。在计算得到一些离散的阈值 T_n 后通过高斯拟合确定出函数模型,进而得到每一列的二值化阈值。

确定 T_n 时,以一定的间隔等间距选取 n 列,采用大津法来计算每一列的阈值。论文中最大光带宽度约 15 像素,于是,利用极值法得到光带中心的粗略位置后,在位置上下各增加 20 像素由此保证将光带全部包含在该区域内。同时,再向左右分别扩展 5 列,由此得到 11 像素 $\times$ 41 像素的矩形区域。这样处理的目的是,可以使矩形区域一直遵循光带的轨迹,同时,矩形区域中光带与黑色背景之间的比例不至于相差很大,从而保证大津法的有效性。与准确性。

利用离散阈值根据公式(2)进行高斯拟合,得到如图 2 所示的阈值函数 $T(x)$ 后,对原始光带图

像图 3(a) 按列进行自适应二值化处理,得到如图 3(b) 所示的光带图像二值化结果。

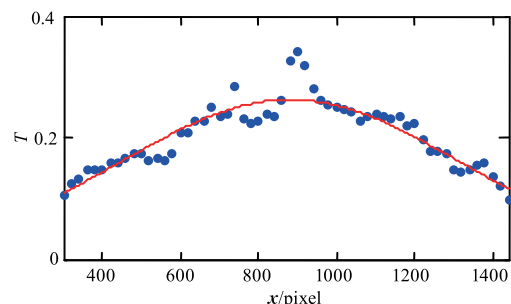
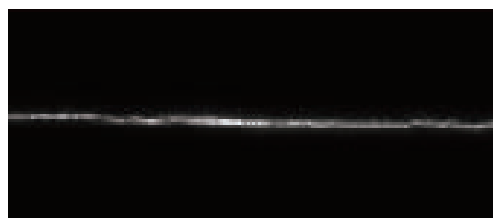


图 2 阈值拟合结果

Fig. 2 Threshold fitting result



(a) 原始图像



(b) 二值化结果

图 3 光带图像二值化

Fig. 3 Binarization result of light stripe

3.2 光带中心提取

根据光带图像二值化结果可以确定出各列光带的宽度 $M(x)$ 与边界像素。并且,由图 3(b) 可见,光带宽度是变化的,其变化规律基本与图 3(a) 相一致;图 3(a) 中光带亮的地方,由图 3(b) 的二值化结果也可反映出该区域光带较宽;相反,图 3(a) 中光带暗的地方,对应于图 3(b) 中二值化结果该区域光带也较窄,例如右端部分。

然后,按照灰度重心公式(1),逐列计算光带中心的纵坐标 y_k 。当 x 方向全部执行完毕后,即可得到光带的中心线提取结果。

4 实验及结果分析

为了研究和验证改进灰度重心算法的性能,特别选择了两种不同反射率的平面物体作为测量对象。采用线结构光三维测量系统,线结构光以一定角度投射在物体表面,然后通过 CCD 采集被调制的激光光带图像。实验拍摄的光带图像如图 4 所示,

图4(a)所示图像表示平面表面光滑、反射率均匀,因而光带亮度较均匀,宽度基本一致。图4(b)所示图像表示平面表面光滑,但反射率不均匀,因而光带在不同位置处宽度不尽相同而且亮度不集中,灰度离散性较大。图4(c)是图4(b)中的一部分。

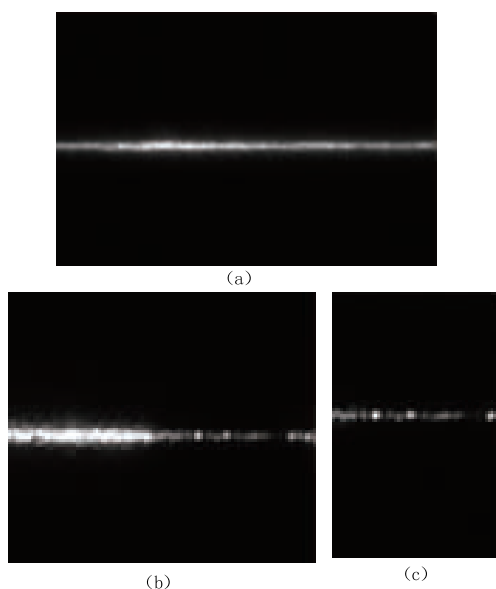


图4 平面物体实验图像

Fig. 4 Experimental image of flat object

然后分别运用灰度重心法和改进灰度重心法对图4所示图像进行中心线提取。实验中测量对象为平面物体,因此分别对测得数据进行直线拟合,然后计算所有测量点到拟合直线的均方差。在相同测量条件下,若各测量点到拟合直线距离的均方差较大,则表明测量结果的精度较低,说明光带中心提取相对不准确;相反,如果均方差较小,则说明光带中心提取相对准确^[13]。表1为运用上述两种方法对图4所对应的平面多次测量后测量点到拟合直线的距离均方差的平均值。

表1 两种算法分别对图4所示目标
提取中心线所求出的均方差

Tab. 1 The MSE of extracting the centre-line
of Fig. 4 object with two methods

	$\sigma_{(a)}$	$\sigma_{(b)}$	$\sigma_{(c)}$
灰度重心法	0.1889	0.2032	0.3242
改进的灰度重心法	0.1884	0.1912	0.2380

从表1可看出,对于宽度基本一致,亮度较均匀的光带,两种算法得到的均方差均较小且差异不大,例如图4(a)的计算结果;而对于宽度不一致,灰度

离散性较大的光带,改进灰度重心法的均方差要小于灰度重心法,这可从后两组计算结果明显看出。

为了进一步验证该算法的适应性,将其应用到粗糙性表面物体。图5(a)为采集到的光带图像,被物体表面调制后的光带起伏程度反映了表面粗糙程度。另外,由于,表面颗粒对激光散射造成光带亮度不集中,光带截面不再呈高斯分布,离散性较大。这种情况下传统极值法以及灰度重心法已不再适用。图5(b)表示利用改进灰度重心法提取出的光带中心线,由图可见,该结果与图5(a)具有很好的一致性。

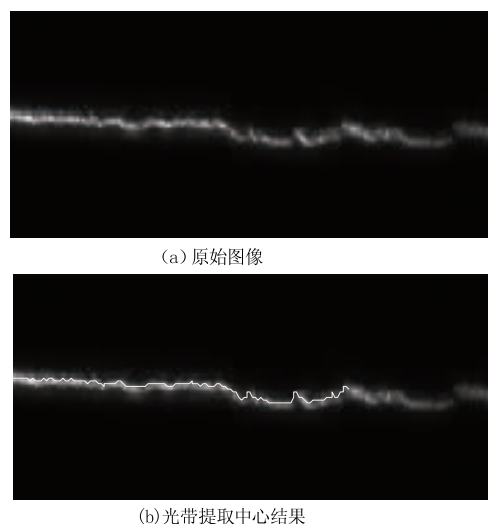


图5 粗糙表面光带图像中心提取

Fig. 5 Extracting the center - line of light stripe for rough surface

5 结 论

光学三角测量系统中激光光带中心线精确提取是影响测量精度的一个重要因素。本文提出了一种改进的灰度重心算法,该算法基于自适应二值化法精确确定激光光带边界,利用变宽度的灰度重心法确定激光光带中心。实验结果表明,改进灰度重心算法在提取宽度不均匀光带的中心线时,具有较高的提取精度。另外,该算法也可应用于离散性较大的线结构光光带中心提取,这在今后粗糙表面微观形貌测量中具有一定的应用价值。

参考文献:

- [1] HU Kun, ZHOU Fuqiang, ZHANG Guangjun. Fast extraction method for sub-pixel center of structured light stripe [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27 (10): 1326 - 1327. (in Chinese)
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 - 1327.

- [2] WANG Weihua, SUN Junhua, LIU Zhen, et al. Stripe center extrication algorithm for structured-light in rail wear dynamic measurement [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(1): 88–89. (in Chinese)
王伟华, 孙军华, 刘震, 等. 钢轨磨耗动态测量结构光条纹中心提取算法[J]. *激光与红外*, 2010, 40(1): 88–89.
- [3] LIU Xiwen, HONG Bo, DAI Tiefeng. Image processing and groove recognition in weld seam tracking based on laser vision[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(7): 805–806. (in Chinese)
刘习文, 洪波, 戴铁峰. 激光视觉焊缝跟踪图像处理与坡口识别[J]. *激光与红外*, 2011, 41(7): 805–806.
- [4] WU Qingyang, SU Xianyu, LI Jingzhen, et al. A new method for extracting the centre-line of line structure light-stripe[J]. *Journal of Sichuan University*, 2007, 39(4): 151–155. (in Chinese)
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*, 2007, 39(4): 151–155.
- [5] Izquierdo M A G, Sanchez M T, Ibanez A, et al. Sub-pixel measurement of 3D surfaces by laser scanning[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1999, 76(1–3): 128.
- [6] HE Junji, ZHANG Guangjun. Study on method for processing image of strip in structured-light 3D vision measuring technique[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2003, 29(7): 593–597. (in Chinese)
贺俊吉, 张广军. 结构光三维视觉检测中光条图像处理研究方法研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 2003, 29(7): 593–597.
- [7] Parka J Y, Kimb C, Nac J, et al. Using structured light for efficient depth edge detection[J]. *Image and vision Computing*, 2008, 26(11): 1449–1465.
- [8] Valkenburg R J, McIvor A M. Accurate 3D measurement using a structured light[J]. *Image and Vision Computing*, 1998, 16(2): 99–110.
- [9] GAO Shiyi, YANG Kaizhen. Research on central position extraction of laser strip based on varied-boundary Gaussian fitting[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(5): 1133–1134. (in Chinese)
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): 1133–1134.
- [10] Stegr C. An unbiased defector of curvilinear structures[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and machine Intelligence*, 1998, 20(2): 113–125.
- [11] GUO Yubo, YAO Yu, DI Xiaoguang. Improved sub-pixel algorithm [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(10): 137–138. (in Chinese)
郭玉波, 姚郁, 迪晓光. 一种改进的亚像素算法[J]. *光电工程*, 2006, 33(10): 137–138.
- [12] YANG Xuejiao, CHI Haihong. An improved method of Extracting structured light strip center[J]. *Applied Science and Technology*, 2009, 36(12): 41–42. (in Chinese)
杨雪娇, 池海红. 一种改进的光条中心提取方法[J]. *应用科技*, 2009, 36(12): 41–42.
- [13] WU Jiayong, WANG Pingjiang, CHEN Jihong, et al. Method of linear structured light sub-pixel center position extracting based on gradient barycenter[J]. 2009, 14(7): 1355–1357. (in Chinese)
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): 1355–1357.