

复杂背景下蓝色线结构光中心提取方法^①

郭 奎, 熊显名

(桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 桂林 541004)

摘 要: 针对复杂背景环境下蓝色线结构光测量系统中如何准确快速地提取出光带中心的问题, 根据线结构光中像素的蓝色分量在 *RGB* 三基色中的比重以及光带中心两边灰度分布特性, 提出了一种基于区域重心法的线结构光中心快速亚像素提取算法. 该算法运用自适应阈值法确定光带边界阈值, 采用平滑处理降低光带非正态分布对光带中心提取的影响, 应用区域重心法进行光带中心的亚像素提取, 最后采用连通区域法剔除错误的光带中心. 实验结果表明, 该算法具有较高的稳定性、良好的抗噪性、较强的鲁棒性.

关键词: 线结构光; 区域重心法; 亚像素; 连通区域法

Method for Extracting the Center Position of Blue Linear Structured Light in the Complex Background

GUO Kui, XIONG Xian-Ming

(Guilin University of Electronic Technology, Institute of Electronic Engineering and Automation, Guilin 541004, China)

Abstract: Aiming at extracting the center position of light stripe accurately and efficiently in blue linear structured light measurement system in the complex background, a method which extracts sub-pixel center position of light stripe was proposed. According to the proportion of blue component in *RGB* and the property of the light stripes' intensity gradient. The method uses adaptive threshold method to obtain the light stripe's gray edge, it applies filter to decrease the error caused by non-normal distribution of strip intensity, and extracts the sub-pixel center position of light stripe by region barycenter, then rejects the error center position of light strip by connected region method. The experiment results proved that the algorithm has higher precision and stability, good noise immunity, robustness.

Keyword: linear structured light; region barycenter method; sub-pixel; connected region method

0 引 言

在冶金、钢铁及许多制造领域, 需要对小尺寸物件进行在线断面高精度测量, 以起到控制精度、节约能耗及稳定生产工艺的作用. 线结构光测量系统以光源激光器产生线结构光, 用 *CCD* 相机等光电传感器摄取待测物件表面所调制的结构光光带图像^[1], 将双目视觉与结构光结合, 用于小尺寸物件断面测量.

图 1 展示了结构光视觉检测的基本原理. 图中, 由蓝色激光器投射一光平面到被测物件的表面, 在被测物件表面形成结构光光条, 并由彩色 *CCD* 工业相机

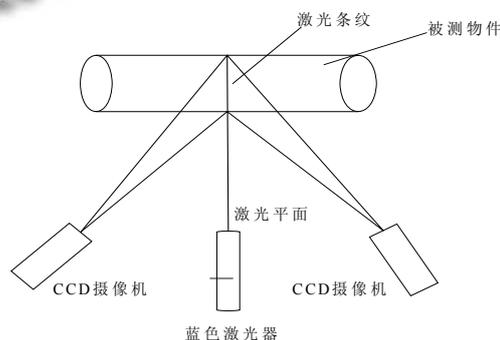


图 1 线结构光测量系统

①基金项目: 桂林市科学研究与技术开发课题(20130122-2)

收稿时间: 2013-11-2; 收到修改稿时间: 2013-11-18

获取光条的二维图像. 三个如图 1 所示的最小系统在空间圆内相隔大致相同的角度平行放置(并使得三个激光面标定到同一平面内)组成六相机系统, 即可获得完整的断面图像.

光带中心线上的点是测量断面面积真正需要的最直接的信息, 因此如何准确快速的提取结构光光带中心是影响结构光视觉测量精度、速度、稳定度的关键问题, 国内外学者提出了各种光带中心提取算法.

目前, 线结构光光带中心提取算法主要有: 曲线插值法^[2]、自适应重心迭代法^[3]、灰度重心法^[4]、自适应阈值重心法^[5]、基于 *Hessian* 矩阵的 *Steger* 法^[6]、梯度重心法^[7]等. 上述算法基本可以分为两类, 第一类是基于光带区域或光带区域灰度拟合曲线的灰度重心法, 第二类是基于光带区域或光带灰度极大值附近区域灰度拟合曲线的极大值位置法. 总体来说这些算法都是在灰度图像的基础上提出的. 如果把复杂背景环境下的光带图像转换到灰度图像来处理, 丢失大量的颜色信息, 转换后的灰度图像中背景很多区域和光带具有相同的灰度特性, 造成结构光光带难以分割, 从而影响光带中心的提取.

针对背景复杂的灰度图像难提取光带中心这一情况, 在 *RGB* 颜色空间内, 本文提出了基于颜色分量比重的区域重心法, 该方法充分利用蓝色分量只有在 *RGB* 中占有较大比重时才会被人眼中呈现蓝色效应和蓝色光带高斯分布特性, 通过光带中心初步确定、光带中心亚像素精确定、错误光带中心剔除三个步骤最终确定了光带中心.

1 问题提出

如图 2 是用普通的黑白相机所拍摄的光带灰度图像, 在图像中存在包含结构光在内的很多高亮区域, 如果用固定阈值来分割结构光光条, 阈值将很难确定. 如果用自适应阈值来分割结构光光条, 算法的时间会很长, 很难满足工业现场的实时性要求. 图 3 为分辨率为 1280×1024 彩色 *CCD* 相机所拍摄的光带图像, 图中蓝色光带特征明显, 在 *RGB* 颜色空间内进行分割效果显著.

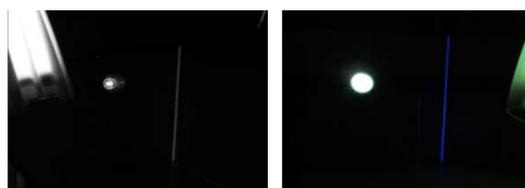


图 2 黑白相机

图 3 彩色相机

2 蓝色线结构光光带特点分析

线结构光是由线状激光束照射在被测物表面形成的光条. 在理想的线状激光束截面上, 其光强能量呈对称的高斯分布. 但是, 由于被测物本身的材质均匀性、透光性、颜色、形状和表面粗糙度等不同的影响, 被测物件各处的光强反射率并不相同, 在相机观测方向上从被测物表面反射的光带截面光强分布发生变化, 图像上的光带截面灰度分布呈不对称的近似高斯分布, 即非正态分布. 此外, 由于 *CCD* 的量化误差及内部的电噪声、热噪声等影响, 光带的图像上存在大量的图像噪声^[7]. 光带图像上的噪声干扰和光带灰度的不对称非正太分布, 给光带中心的准确提取带来了较大的困难.

在 *RGB* 颜色空间内, 由 *RGB* 色彩原理知, 光带呈现蓝色的必要条件是光带中的蓝色分量 *B* 在 *RGB* 中占有较大比重, 即 $B-R \gg 0$ 且 $B-G \gg 0$. 若呈现其他颜色, 则 $B-R$ 和 $B-G$ 通常小于等于零.

通常在光带边界, 蓝色分量比重会发生较大变化, 即 $B-G$ 和 $B-R$ 会发生符号变化, 因此, 检查 $B-G$ 和 $B-R$ 的符号变化, 可以确定光带的实际边界.

线激光器距被测物件一定距离时, 宽度会稳定在一个大致的范围, 但由于被测物件材质、反光特性、以及环境光照的影响, 光带的宽度会在该范围内波动, 求出每行光带的具体宽度范围并在该区域内对光带进行处理可以降低非光带区域像素对光带中心提取的影响.

对于当前图像的第 *i* 行第 *j* 列, 设 $B-R$ 与 $B-G$ 为最大值时的像素位置分别为 $X(i, j_1)$ 、 $X(i, j_2)$ (j_1, j_2 代表像素的列坐表). 对于服从高斯分布特性的光带, j_1 等于 j_2 , $X(i, j_1)$ 处于光带的中心位置. 但由于被测物件表面的反射率及材料透光性的不同以及背景中蓝色干扰的存在, j_1 通常不等于 j_2 , $X(i, j_1)$ 与 $X(i, j_2)$ 可能出现在光带上, 可能出现在背景中的蓝色区域上, 如图 4 为 $X(i, j_1)$ 和 $X(i, j_2)$ 在图像上的四种情况.

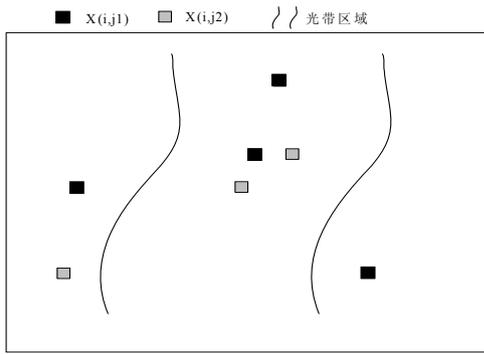


图 4 $X(i,j1)$ 和 $X(i,j2)$ 位置处的像素

图 5(a)为非正态分布的光带图像,其真实的光带中心在垂直方向的直线上,但 $X(i,j1)$ 与 $X(i,j2)$ 明显偏离光带真实中心位置并在真实中心位置两边波动.图 5(b)为正态分布的光带图像,其灰度分布关于光带中心基本对称.对于不均称的非正态分布的光带图像,如果光带中心提取算法仅利用光带上 B 分量有较大灰度值的部分像素来计算光带中心,势必使计算出的光带中心位置跟真实的光带中心位置有较大偏差.因此,要提高光带中心位置的提取精度,必须对光带区域进行平滑处理,以降低非正太分布对光带真实中心位置的影响.

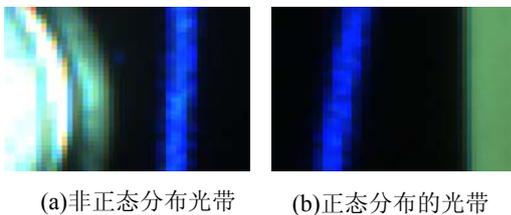


图 5 不同灰度分布的光带

3 算法描述

根据蓝色线结构光在图像中的分布特点,设计了如下光带中心提取算法:

(1)寻找光带中心的粗略位置.寻找光带中心的粗略位置可以快速定位光带,提高算法的快速性.

本文三维测量系统距被测物件 100cm 左右,线激光投射到不同被测物件表面,光带的宽度在 5~20 个像素之间.设图像行上光带的粗略宽度范围为 20,第 i 行第 j 列像素的蓝色分量 B 与红色分量 R 的差为 $(B-R)(i, j)$,蓝色分量与绿色分量的差为 $(B-G)(i, j)$.对于当前图像的第 i 行,分别寻找 $(B-R)(i, j)$ 与 $(B-G)(i, j)$

为最大值时的像素位置,最大位置处的像素应满足(1)式条件

$$\begin{cases} (B-R)(i,j1)\text{最大且}(B-R)(i,j1)>0,(B-G)(i,j1)>0 \\ (B-G)(i,j2)\text{最大且}(B-G)(i,j2)>0,(B-R)(i,j2)>0 \end{cases} \quad (1)$$

为了尽可能的保证 $X(i,j1)$ 和 $X(i,j2)$ 处的像素位于光带上,在当前行分别以 $X(i,j1)$ 和 $X(i,j2)$ 为起点往左右两边搜索,直到 $(B-R)$ 或者 $(B-G)$ 小于等于零时,停止搜索,设以 $X(i,j1)$ 、 $X(i,j2)$ 为起点的搜索停止时的坐标分别为 $C1(i,j1-m1)$ 、 $C2(i,j1+m2)$ 和 $C1(i,j2-n1)$ 、 $C2(i,j2+n2)$ ($m1$ 、 $m2$ 、 $n1$ 、 $n2$ 大于等于零),若 $(m1+m2)$ 与 $(n1+n2)$ 在 5-20 之间,就认为 $X(i,j1)$ 和 $X(i,j2)$ 位于光带上,否则剔除该区域并重新在该行重复(1)步骤,若再次搜索没有找到满足条件的 $X(i,j1)$ 和 $X(i,j2)$,则认为该行没有光带.经过以上过程,光带中心的粗略位置为: $Mid(i, (j1+j2)/2)$.

(2)确定每行光带具体范围并对该区域平滑处理,最后求出光带中心的亚像素位置.在当前行,以 $Mid(i, (j1+j2)/2)$ 为起点往左右两边搜索,直到遇到像素中 $(B-G)$ 或者 $(B-R)$ 出现负值或全为零时停止搜索,设停止搜索时的像素位置为 $X(i,k1)$ 和 $X(i,k2)$ (其中 $k2 \geq k1$),则该行光带的宽度为 $|k1-k2|$.

对光带区域进行了平滑处理,使 3×3 的滑动窗口中心落在该行光带区域并在该区域内滑动,计算窗口中心的 8 领域像素蓝色分量的均值,把该均值作为窗口中心像素蓝色分量的值,设求出的第 i 行第 p 列像素蓝色分量的值为 $Blue(i,p)$ (其中 $k1 \leq p \leq k2$),计算该行光带中心的亚像素位置列坐标为:

$$MID_{sub-pix} = \frac{\sum_{p=k1}^{p=k2} Blue(i, p) \times p}{\sum_{p=k1}^{p=k2} Blue(i, p)} \quad (2)$$

(3)剔除错误光带中心.对于连续且理想的光带,在每个光带中心的 3×3 领域内一定存在另一个光带中心,但由于噪声、遮挡、被测物件的不规则、背景中存在蓝色区域和被测物件的反光特性等,经(1)(2)求出的光带中心线会出现断续现象,因此本文使用连通区域法检测连通的光带中心点个数,以剔除错误的光带中心.但为了避免剔除正确的光带中心以及保持光带中心线的连续性,本文选择在每个光带中心的 3×4 领域内搜索新的光带中心,然后对新搜索到的光带中心按照该方法重新进行搜索,直到搜索不到为止,则这些点的集合就是连通点,如果连通点的个数太少,就认为是错误光带中心,然后删除这些连通点.按照上

面方法对提取出的每个光带中心进行搜索,直到剔除所有的错误光带中心.

该算法在 VS2008 平台下,借助于 *OpenCV2.3.1*^[8] 库编程实现,运行时间优于 75ms.

4 实验分析与验证

在实验过程中,对于反射率及材料透光性不同的物件在同一位置下,采用不同的光照条件和不同的背景环境拍摄光带图像,为了使得拍摄的蓝色光带效果较好,本系统所使用的相机曝光时间应尽量短.如图 6 所示,曝光时间过长使得蓝色光带中心近似成白色,蓝色信息丢失很多,违背了本系统使用蓝色线激光的初衷.如图 7 所示,由于相机曝光时间较短,使得蓝色光带特征明显,并且减少了被测物件反光对光带提取的影响,易于提取光带中心.因为在拍摄光条图像时,只是光照条件和背景环境不同,尤其是在黑暗的背景下,光带的干扰最小,因此可以利用光带中心提取像素坐标的重复性来验证光带中心提取算法的准确性^[9].



图 6 曝光时间长 图 7 曝光时间短

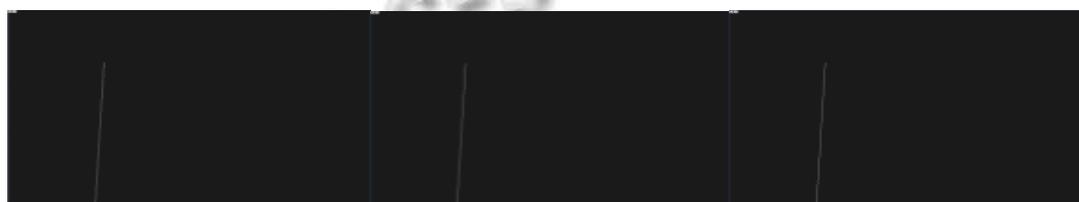
4.1 漫反射表面

对于漫反射表面的物件,结构光光带图像质量较好,光带灰度信息特征在图像中表现的比较明显,而且背景照明光在被测物件表面的反光效果对提取的精度影响也较小^[9].如图 8 为漫反射白色纸盒表面的图像,从图 8(a)到图 8(c)背景光的强度以及复杂程度逐渐减弱.其中图 8(a)背景光较强,背景环境较复杂,图 8(c)为背景光关闭的情况.对这 3 幅图用区域重心法进行光带中心提取,提取结果如图 9 所示.



(a)复杂背景 (b)简单背景 (c)暗背景

图 8 不同背景下漫反射纸盒表面光带图像



(a)复杂背景 (b)简单背景 (c)暗背景

图 9 区域重心法光带中心提取结果

以暗背景下光带中心提取结果为基准, 分别计算图 9(a)和 9(b)中每一行光带中心提取结果与它的误差, 如表 1 所示为误差的一部分, 其中 pixel 为像素单位, $x1$ 、 $x2$ 、 $x3$ 分别表示图 9(a)、9(b)、9(c)中光带中心的列坐标, $x4$ 表示图 9(a)与 9(c)光带中心列坐标之差, $x5$ 表示图 9(b)与图 9(c)光带中心列坐标之差.

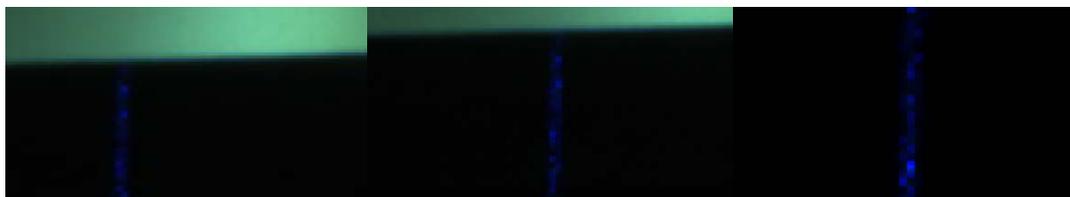
表 1 部分光带中心误差

$x1$	$x2$	$x3$	$x4$	$x5$
(pixel)	(pixel)	(pixel)	(pixel)	(pixel)
312.734	312.654	312.879	-0.145	-0.225
312.400	312.397	312.546	-0.146	-0.149
312.370	312.358	311.963	0.407	0.395
311.792	311.805	311.531	0.261	0.274
310.667	310.687	310.831	-0.164	-0.144
310.783	310.798	311.070	-0.287	-0.272
309.851	309.806	310.019	-0.168	-0.213
308.798	308.857	309.401	-0.603	-0.544
308.764	308.678	308.736	0.028	-0.058
308.687	308.386	308.644	0.043	-0.258

其中图 9(a)与图 9(c)光带中心提取结果的平均误差为: 0.283pixel; 图 9(b)与图 9(c)光带中心提取结果的平均误差为: 0.229pixel. 可见对于漫反射表面的物件, 本文提出的算法在不同的背景下, 提取结果的重复性误差优于 0.5pixel, 说明本算法对于漫反射表面的物件在不同的背景环境中光带中心的提取整体比较稳定. 在误差比较过程中光带的某行会出现大的起伏, 这是由于光源不稳定、物件表面材质曲率、以及经过平滑后光带某行仍然不均匀所致.

4.2 黑色吸光表面

黑色吸光表面对线结构光反射很弱, 线结构光中灰度信息相对于其他物件表面会有所减少^[9]. 如图 10 为黑色吸光纸盒的图像, 从图 10(a)到图 10(c)背景亮度以及复杂程度逐渐减弱. 其中图 10(a)背景光较强, 背景环境较复杂, 图 10(c)为背景光关闭的情况. 对这 3 幅图用区域重心法分别进行光带中心提取, 提取结果如图 11 所示.



(a)复杂背景

(b)简单背景

(c)暗背景

图 10 不同背景下黑色纸盒表面光带图像



(a)复杂背景

(b)简单背景

(c)暗背景

图 11 区域重心法光带中心提取结果

以图 11(c)为基准,分别计算图 11(a)和图 11(b)中每一行光带中心提取结果与它的误差,其中图 11(a)与图 11(c)光带中心提取结果的平均误差为: 0.215pixel ,图 11(b)与图 11(c)光带中心提取结果的平均误差为: 0.204pixel ,从误差比较结果可以看出,随着背景复杂程度的增加,光带中心提取的误差也会增加,但总体的重复性误差仍在 0.5pixel 之内,说明区域重心法对于黑色吸光物件在不同背景环境下光带中心提取整体比较稳定.

4.3 光滑塑料反光表面

光滑塑料因其表面光滑,对照射在上面的线结构光有反射作用,在线结构光周围会出现散乱点,由于本文中相机的曝光时间短,这些散乱点的蓝色分量比重不高,对光带中心提取不会造成太大影响.如图 12 为魔方的白色反光面的图像,从图 12(a)到图 12(c)背景亮度以及复杂程度逐减弱,其中图 12(a)为背景较复杂的情况,图 12(c)为背景关闭的情况.对这 3 副图像采用区域重心法分别进行光带中心提取,提取结果如图 13 所示.

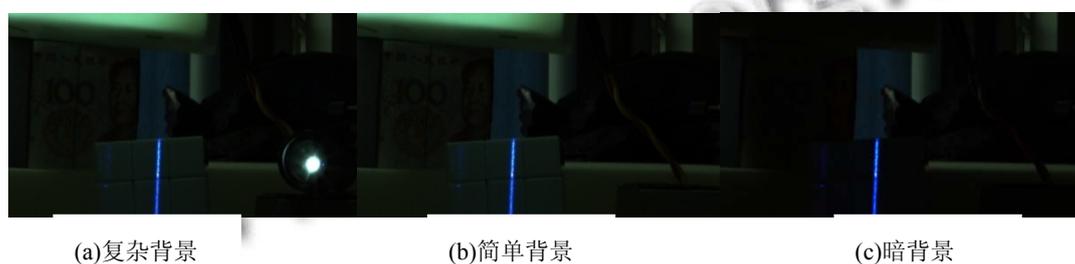


图 12 不同背景下魔方白色反光表面背景图



图 13 区域重心法光带中心提取结果

以图 13(c)为基准,分别计算图 13(a)和图 13(b)中每一行光带中心提取结果与它的误差,其中图 13(a)与图 13(c)光带中心提取结果的平均误差为: 0.240pixel ,图 13(b)与图 13(c)光带中心提取结果的平均误差为: 0.210pixel ,从误差比较结果可以看出,随着背景复杂程度的增加,总体重复性误差仍在 0.5pixel 之内,说明区域重心法对于反光物件在不同背景环境下光带中心提取整体比较稳定.

由于背景环境以及物件的种类繁多,本文不再罗列.

5 结论

由以上实验结果可知,在不同复杂程度的环境中,对于不同材质的物件,基于颜色分量比重的区域重心法提取出的光带中心的重复性误差优于 0.5 个像素,从而体现了其较高的稳定性、良好的抗噪性和较强的鲁棒性.其运行时间优于 75ms ,满足复杂环境中工业视觉检测在线测量的实时性要求.

参考文献

- 1 魏振忠,张广军.结构光直光条中心线的鲁棒性自动提取方法.仪器仪表报,2004,25(2):1-4.
- 2 隋连生,李兵,蒋庄德.基于 NURBS 曲线插值激光光刀图

- 像提取方法的研究.中国激光,2003,30(10):933-937.
- 3 崔希君,杨川,刘保华等.线性结构光心的自适应迭代提取法.西安交通大学报,2007,41(1):73-76.
 - 4 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.四川大学学报,2007,39(4):151-155.
 - 5 吴剑波,崔振,赵宏等.光刀中心自适应阈值提取法.半导体光电,2001,22(1):62-64.
 - 6 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.仪器仪表学报,2006,27(10):1326-13291.
 - 7 吴家勇,王平江,陈吉红,巫孟良.基于梯度重心法的线结构光中心亚像素提取方法.中国图像图形学报,2009,14(7):2-6.
 - 8 Bradski G, Kaebler A.于仕琪,刘瑞祯译.Learning OpenCV.北京:清华大学出版社,2009:37-161.
 - 9 王鹏.线结构光三维自动扫描系统关键技术的研究[学位论文].天津:天津大学,2008:66-78.

www.c-s-a.org.cn

www.c-s-a.org.cn