

基于梯度重心法的线结构光中心亚像素提取方法

吴家勇¹⁾ 王平江¹⁾ 陈吉红¹⁾ 巫孟良²⁾

¹⁾ (华中科技大学国家数控系统工程技术研究中心, 武汉 430074) ²⁾ (万濠精密仪器有限公司, 东莞 523877)

摘 要 针对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, 根据线结构光图像上光带中心两边的灰度梯度特性及光带灰度的非正态分布特点, 提出了一种基于梯度重心法的线结构光光带中心快速亚像素提取算法。该算法采用低通平滑滤波和幂次变换降低图像噪声和光带灰度非正态分布对光带中心提取的影响, 运用自适应阈值法确定光带的边界阈值, 应用梯度重心法进行光带中心的亚像素提取。实验结果表明, 基于梯度重心法的光带中心提取算法具有较高的提取精度, 并且有良好的抗噪性和鲁棒性。应用了此方法的 3 维测量系统的精度也得到了显著提高。

关键词 3 维测量 线结构光 光带中心 梯度重心法 亚像素

中图法分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2009)07-1354-07

Method of Linear Structured Light Sub-pixel Center Position Extracting Based on Gradient Barycenter

WU Jia-yong¹⁾, WANG Ping-jiang¹⁾, CHEN Ji-hong¹⁾, WU Meng-liang²⁾

¹⁾ (National Numerical Control System Engineering Research Center, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074) ²⁾ (Rational Precision Instrument CO., LTD, Dongguan 523877)

Abstract Aiming at extracting the center position of light stripe accurately and efficiently in linear structured light measurement system, a method which extracts sub-pixel center position of light stripe was proposed according to the property of the light stripes' intensity gradient and non-normal distribution. The method applies low pass filter and power transformation to decrease the error caused by image noise and non-normal distribution of stripe intensity. It uses adaptive threshold method to obtain the light stripe's gray edge and extracts the sub-pixel center position of light stripe by gradient barycenter. Our experiment results proved that gradient barycenter method not only extracts the stripe center accurately but also has good anti-noise and robust performance. The method improved the measurement precision of the 3D measurement system remarkably.

Key words 3D measurement, linear structured light, light stripe center, gradient barycenter method, sub-pixel

1 引言

线结构光测量系统以线光源激光器产生线结构光, 用 CCD 相机等光电传感器摄取被测工件表面所调制的结构光光带图像, 根据图像上光带中心的偏移量进行物体截面轮廓的计算。将线结构光测量

系统安装在三坐标测量机的 Z 轴上, 三坐标测量机的 Z 轴带动线结构光传感器扫描移动并在各位置处测量工件截面轮廓, 即可实现工件的 3 维轮廓测量。线结构光 3 维测量在制造领域得到了越来越广泛的应用。

如何准确快速地提取线结构光光带中心, 是影响线结构光 3 维测量系统测量精度和速度的关键问

收稿日期: 2007-12-31; 改回日期: 2008-04-07

第一作者简介: 吴家勇 (1981~), 男, 华中科技大学国家数控系统工程技术研究中心博士研究生, 主要研究方向为机器视觉、精密测量。E-mail: jia-yong_81@163.com

©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

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: 多项式拟合法^[1]、NURBS (NonUniform Rational B-Splines) 曲线插值法^[1]、自适应重心迭代法^[2]、灰度重心法^[3]、抛物线拟合法 (高斯曲线拟合法)^[4]、自适应阈值重心法^[5]、灰度阈值法^[6]、方向模板法^[3-6-7]、基于 Hessian 矩阵的 Stege 法^[8-9]等。上述算法基本上可以分为两类, 第 1 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, 第 2 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。

灰度极大值法、抛物线拟合法和基于 Hessian 矩阵的 Stege 法等属于第 1 类极大值位置法。抛物线拟合法用光带灰度极大值附近像素拟合的抛物线的极大值位置作为光带中心^[4], 由于只是利用光带灰度极大值处的少量数据进行曲线拟合, 算法易受噪声干扰和光带灰度分布不匀称的影响而导致光带中心提取精度不高。基于 Hessian 矩阵的 Stege 法利用 Hessian 矩阵获得光条纹各点的法线方向, 利用法线方向上的极值点得到条纹中心的亚像素位置^[9]。Stege 方法精度较高, 但由于需要计算光带法线方向, 运算量大, 不易实现光带法线方向上数据的平滑滤波, 很难实现光带中心的快速提取。

自适应阈值重心法、自适应重心迭代法、多项式拟合法、NURBS 曲线插值法、方向模板法都属于第 2 类灰度重心法。自适应阈值法是根据图像上某行像素的灰度极大值自适应确定该行的光带边界阈值, 并在该光带区域内进行灰度重心位置的计算^[5]; 多项式拟合法、NURBS 曲线插值法是对光带中心附近区域的像素进行多项式拟合或 NURBS 曲线拟合, 对拟合出的多项式或 NURBS 曲线插值后进行灰度重心法的光带中心位置计算^[1]; 方向模板法是用方向模板来确定光带的法线方向, 然后在法线方向上进行灰度重心法的计算^[3-6-7]; 自适应重心迭代法是对灰度强度进行幂次变换减小后进行灰度重心法的光带中心位置计算^[2], 幂次变换起到了一定的滤波平滑作用。

基于灰度重心法求得的光带中心位置主要取决于光带中部分灰度值较大的像素的位置, 其准确性受图像上光带灰度的不匀称非正态分布的影响较大; 而基于灰度极大值位置的光带中心提取法易受高频噪声干扰和灰度非正态分布影响而降低精度, 抗噪性差。

2 线结构光光带特点分析

线结构光光带是由线状激光束照射在被测物表面形成的光条。在线状激光束截面上, 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, 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^[1-5]。光带图像上的噪声干扰和光带灰度的不对称非正态分布^[2-5], 给光带中心的准确提取带来了较大的困难。

图 1 (a) 为灰度分布较不匀称的光带图像, 其真实光带中心在竖直方向的直线上, 但光带截面上灰度较大值位置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 1 (b) 为灰度分布较为匀称的光带图像, 其灰度分布关于光带中心基本对称。对于不匀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光带中心位置有较大偏差。

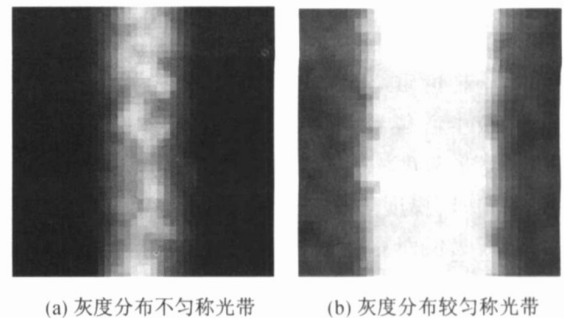


图 1 光带局部 10 倍放大图像

Fig 1 10 times magnified image of the local stripe

在数字图像中, 某一位置处的梯度值表征图像中该点处的边缘特性。梯度值越大, 则该点处的边缘特性越明显。设图像的大小为 $M \times N$ 行索引 $i = 0, 1, \dots, N-1$ 列索引 $j = 0, 1, \dots, M-1$ 。数字图像中某一点 (i, j) 处的梯度 $G(i, j)$ 分解为 X 方向的梯度分量 $G_x(i, j)$ 和 Y 方向的梯度分量 $G_y(i, j)$ 来分别计算。梯度分量 $G_x(i, j)$ 或 $G_y(i, j)$ 的计算通常用

相邻像素的灰度差分来代替微分。线结构光光带中心位置的提取是在图像上逐行计算各行上的光带中心位置,因此,本文中的灰度梯度是指在图像行方向上的相邻像素灰度值差分结果的绝对值。

设定光带边界的灰度阈值后,图像行上光带附近灰度值大于边界阈值的像素范围为光带区域,光带区域的亚像素边界可通过相邻像素灰度线性插值计算而得到。光带区域上的灰度梯度具有如下特性:光带上灰度极大值两边像素的梯度和相等,都等于灰度极大值与光带边界阈值的差;光带中心位置两边的梯度矩近似相等。光带上灰度极大值位置与光带中心位置具有内在的一致性。当光带灰度分布不匀称时,光带灰度极大值位置与真实光带中心会出现偏离。

要提高光带中心位置的提取精度,必须对光带区域的图像数据进行平滑滤波处理,降低噪声的影响;同时针对光带灰度的不匀称非正态分布,采用合适算法降低其对光带中心位置计算的影响。

本文提出了一种基于梯度重心法的光带中心快速亚像素提取方法。该方法自适应确定光带的边界灰度阈值,利用光带边界内的大量像素的灰度信息,根据光带上像素灰度的梯度分布特征来进行光带中心位置的亚像素计算。

3 梯度重心法光带中心位置提取

基于梯度重心法的光带中心提取算法,使计算出的光带中心位置两边的光带区域内的梯度矩相等。当光带灰度极大值位置与真实光带中心位置有较大偏差时,梯度重心法计算出的光带中心能够偏离光带极大值而靠近真实光带中心,减小光带中心位置提取的误差。

基于梯度重心法的光带中心提取算法步骤如下:

(1) 首先用 1×3 的滑动窗口在图像行上滑动,根据阈值及约束条件,计算滑动窗口下灰度分布满足条件的 3 个像素的灰度和。滑动窗口下面 3 个像素的灰度和取最大值时的窗口中心位置,即为该行上光带中心的粗略位置。

(2) 在粗略中心位置的左右,根据光带的宽度范围,取一定宽度的像素区域,作为该行上光带的粗略宽度范围,并对该范围内的像素灰度值进行低通平滑滤波和幂次变换,降低灰度的不匀称非正态分

布和低频噪声对光带中心位置提取影响的影响。

(3) 根据低通滤波和幂次变换后的光带粗略范围内的灰度值,用自适应阈值法确定光带边界处的灰度阈值,得到光带的准确边界。

(4) 对光带边界内的像素进行梯度重心计算,即可得到该行上的光带中心点亚像素位置。对图像上每一行执行以上步骤即可计算出每一行上的光带中心点位置,从而得到图像的光带中心线。

3.1 寻找当前行光带中心的粗略位置

设第 i 行第 j 列的像素灰度值为 $I(i, j)$, 第 i 行上的光带中心粗略位置为 C_i 列, 第 i 行的光带中心的精确位置为 C_i^* 。光带中心的精确位置 C_i^* 为亚像素级精度。

对于当前图像的第 i 行,若第 $i-1$ 行上的光带中心粗略位置 C_{i-1} 不存在,则 1×3 滑动窗口的中间窗口在第 i 行上从 $j=1$ 列滑动到 $j=M-2$ 列,同时计算滑动窗口下的 3 个像素的灰度和。为避免白噪声和较强亮度光斑的干扰同时减少运算计算量,仅当灰度阈值和灰度分布特点同时满足式 (1) 条件时,才进行灰度和 $S(i, j)$ 的计算:

$$\begin{aligned} S(i, j) &= I(i, j-1) + I(i, j) + I(i, j+1), \\ \text{当 } I(i, j) > I_{\text{low}} \text{ 且 } |I(i, j) - I(i, j-1)| < I_{\text{th}}, \\ &|I(i, j) - I(i, j+1)| < I_{\text{th}} \end{aligned} \quad (1)$$

I_{low} 为其值小于光带区域灰度最小值且大于光带区域外背景灰度值的阈值,根据相机光圈大小及曝光时间的不同,可参考发黑处理金属工件的光带灰度值确定,实验中 I_{low} 取 20。 I_{th} 为相邻两像素灰度差的最大阈值,实验中取为 150。因为激光条纹的光强较环境光要强得多,图像上光带区域的灰度值比图像背景灰度值大,设定 I_{low} 条件可以减少算法在图像背景区域的计算,主要在灰度值较高的光带区域进行灰度和的计算。光带有一定的像素宽度,且光带截面上的灰度呈近似的高斯分布,光带区域特别是光带中心位置附近相邻像素间的灰度值不会剧变,设定 I_{th} 则可以防止非光带区域上的单个或连续两个高灰度值的高频噪声点位置被错误计算为光带中心的粗略位置。上述两条件提高了光带中心粗略位置提取时的计算效率和鲁棒性。

第 i 行上 $S(i, j)$ 最大值所在的位置即为该行光带中心粗略位置 C_i 。若当前行不存在满足条件的 $S(i, j)$ 最大值,则认为该行不存在光带中心。

当被测表面是一个光滑连续的曲面时,图像上的光带是一条连续的光带;当被测表面存在阶跃变

化的边缘时,则图像上的光带可能由多条不连续的光带组成。在图像相邻行之间光带中心粗略位置采用“承上启下”的启发式搜索,以缩小光带中心粗略位置的搜索计算范围。图 2 所示为不连续光带的粗略中心位置搜索示意图。若图像第 $i-1$ 行上存在光带中心粗略位置 C_{i-1} ,则第 i 行的光带中心粗略位置 C_i 可限定在第 $i-1$ 行光带中心粗略位置 C_{i-1} 列的左右各 7 个像素区域内,在上述局部区域内运用公式 (1) 进行灰度和 $S(i, j)$ 最大值的计算。 $S(i, j)$ 最大值所在的位置 即为该行光带中心粗略位置 C_i 。若第 i 行上 C_{i-1} 列附近的局部区域内不存在满足条件的灰度和 $S(i, j)$ 可认为该行不存在光带中心或者再从当前行的行首搜索到行尾计算 $S(i, j)$ 后再判断。在光带的不连续位置处,在图像行的局部范围里找不到光带粗略中心时,图 2 中放弃该行的整行重新搜索,认为该行不存在光带中心,下一行时则在整行范围里搜索光带粗略中心。

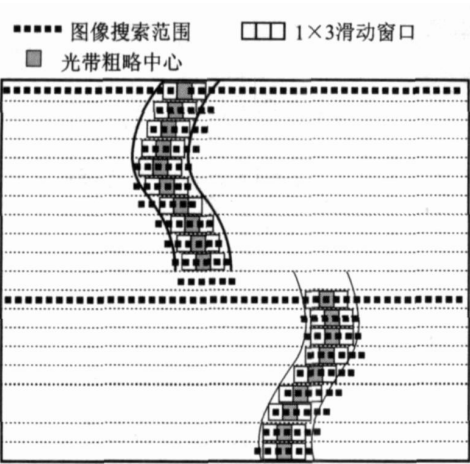


图 2 不连续光带的粗略中心位置搜索示意图
Fig 2 Sketch of searching the approximate center position in discontinuous stripe

3.2 确定光带粗略范围并对该区域图像低通滤波和幂次变换

线光源激光器距被测物表面距离的不同、被测物表面的反射率及材料透光性能的不同,都会引起图像上激光光带宽度的变化。本文 3 维测量系统中被测物距相机 170mm 左右,线激光束投射到不同被测物表面上时,图像上光带的宽度在 8~20 像素之间。设图像行上光带的粗略宽度范围为 2 倍 n_w ,根据上述光带宽度范围可取 n_w 为 15。在得到光带中心粗略位置 C_i 后,取 C_i 左右各 n_w 个像素之间的

区域作为该行上光带的粗略范围,可确保该行上光带全部包含在该范围内。

对光带粗略范围内的图像数据进行低通滤波,以降低高频噪声对光带中心精确位置计算的影响。低通滤波器的归一化截止频率为 0.15 滤波器长度为 5 阶次为 3 阶。滤波器系数与原始图像数据做卷积,得到滤波后的图像数据。设 $I(i, j)$ 为低通滤波后的图像数据,则

$$\begin{aligned} I(i, j) = & k_1 \times I(i, j) + k_2 \times [I(i, j-1) + I(i, j+1)] + \\ & k_3 \times [I(i, j-2) + I(i, j+2)], \quad j = C_i - n_w \dots C_i + n_w \end{aligned} \tag{2}$$

滤波器系数分别为: $k_1=0.370\ 286$ $k_2=0.271\ 843$ $k_3=0.095\ 016$ 图 3 为低通滤波器的理想幅频曲线图和实际滤波器系数的幅频曲线图。滤波后,信号噪声特别是高频噪声的幅值得到很大的削减,灰度曲线将变得平滑。

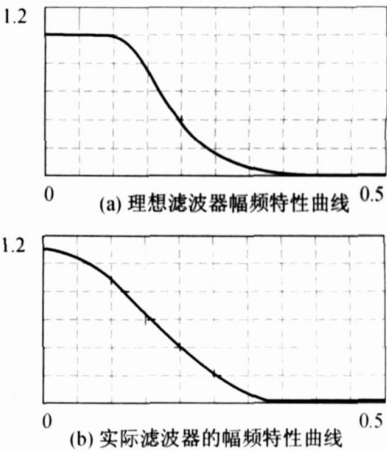


图 3 低通滤波器的幅频特性
Fig 3 Amplitude frequency characteristics of low pass filter

对低通滤波后的数据 $I(i, j)$ 进行幂次变换, $\hat{I}(i, j)$ 为幂次变换后的图像数据,

$$\hat{I}(i, j) = [I(i, j)]^{0.25} \tag{3}$$

图 4 为幂次变换的函数曲线示意图,从图中可看出,原始灰度值 I 越大,幂次变换时就会有更大的压缩,从而使 \hat{I} 曲线更加平滑,降低了图像上光带区域的噪声和灰度非正态分布对光带中心位置提取的影响。

3.3 自适应阈值法确定光带边界的灰度阈值

光带中心粗略位置 C_i 左右各 n_w 个像素之间的范围宽度大于光带的宽度。因此,在确定的光带范

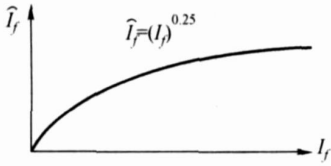


图 4 幂次变换函数曲线

Fig 4 Curve of power transformation function

围内,还必须再精确地确定光带的边界,以提高后续梯度重心法计算光带中心位置的准确度。对幂次变换后的图像数据用自适应阈值法来确定光带边界的灰度阈值。具体算法如下:首先计算出图像第 i 行上 $C_i - n_w$ 列至 $C_i + n_w$ 列范围内灰度值 $\hat{I}_f(i, j)$ 的平均值 I_M 。设光带边界的灰度阈值为 I_{th} , I_{th} 为光带上 $C_i - n_w$ 列至 $C_i + n_w$ 列范围内灰度值 $\hat{I}_f(i, j)$ 小于 I_{th} 的像素的灰度平均值。 I_{th} 略大于该行光带区域图像背景的平均灰度,作为光带边界的灰度阈值可以自适应地将光带区域与背景分割开来。图 5 为自适应阈值法计算光带边界阈值的示意图。

3.4 基于梯度重心法的光带中心位置亚像素精度计算

本文中的梯度概念是指在图像行方向上的相邻像素差分结果的绝对值。梯度 $G(i, j)$ 表示第 i 列与第 $j+1$ 列中间位置处的梯度值。计算公式如下:

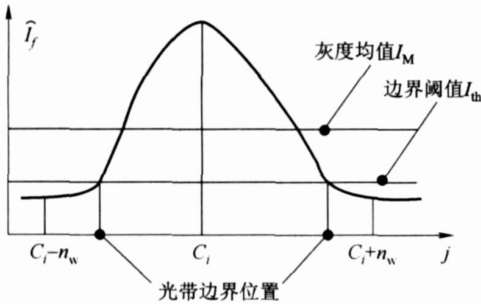


图 5 自适应阈值法计算光带边界阈值示意图

Fig 5 Sketch of computing the boundary threshold by Adaptive threshold method

$$G(i, j) = \begin{cases} |\hat{I}_f(i, j) - \hat{I}_f(i, j+1)| & \text{当 } \hat{I}_f(i, j) \geq I_{th} \text{ 且 } \hat{I}_f(i, j+1) \geq I_{th} \\ |\hat{I}_f(i, j+1) - I_{th}| & \text{当 } \hat{I}_f(i, j) \leq I_{th} \text{ 且 } \hat{I}_f(i, j+1) \geq I_{th} \\ |\hat{I}_f(i, j) - I_{th}| & \text{当 } \hat{I}_f(i, j) \geq I_{th} \text{ 且 } \hat{I}_f(i, j+1) \leq I_{th} \\ 0 & \text{当 } \hat{I}_f(i, j) \leq I_{th} \text{ 且 } \hat{I}_f(i, j+1) \leq I_{th} \end{cases} \quad (4)$$

对于光带边界处梯度值的对应位置需要根据 $\hat{I}_f(i, j)$ 与 $\hat{I}_f(i, j+1)$ 进行线性插值计算而得到。梯度值对应的梯度位置 $P(i, j)$ 由下式计算:

$$P(i, j) = \begin{cases} j+0.5 & \text{当 } \hat{I}_f(i, j) \geq I_{th} \text{ 且 } \hat{I}_f(i, j+1) \geq I_{th} \\ j+1 - \frac{|\hat{I}_f(i, j+1) - I_{th}|}{2|\hat{I}_f(i, j) - \hat{I}_f(i, j+1)|} & \text{当 } \hat{I}_f(i, j) \leq I_{th} \text{ 且 } \hat{I}_f(i, j+1) \geq I_{th} \\ j + \frac{|\hat{I}_f(i, j) - I_{th}|}{2|\hat{I}_f(i, j) - \hat{I}_f(i, j+1)|} & \text{当 } \hat{I}_f(i, j) \geq I_{th} \text{ 且 } \hat{I}_f(i, j+1) \leq I_{th} \end{cases} \quad (5)$$

基于梯度重心法的光带中心提取方法,就是以梯度值 $G(i, j)$ 为权重,以 $P(i, j)$ 作为梯度 $G(i, j)$ 的对应位置,用梯度重心来进行光带中心计算的方法。光带中心精确位置 \hat{C}_i 的计算公式为:

$$\hat{C}_i = \frac{\sum_{j=C_i-n_w}^{C_i+n_w} [G(i, j) \times P(i, j)]}{\sum_{j=C_i-n_w}^{C_i+n_w} G(i, j)} \quad (6)$$

对图像中每一行进行如上 4 步处理计算即可得到每行上的光带中心精确位置,从而形成一条亚像素精度的光带中心线。

4 实验与分析

对光带中心 \hat{C}_i 计算公式 (6) 进行变形得

$$\sum_{j=C_i-n_w}^{C_i+n_w} G(i, j) \times [P(i, j) - \hat{C}_i] = 0 \quad (7)$$

由公式 (7) 可以看出,此方法使中心位置 \hat{C}_i 两边的梯度矩相等。图 6 为梯度重心法光带中心提取原理示意图,梯度重心法光带中心提取使中心位置 \hat{C}_i 两边相邻灰度值连线所包围的直角梯形或三角形的面积和相等。当光带灰度极大值位置与真实光带中心有较大偏离时,梯度重心法求出的 \hat{C}_i 能够偏离灰度极大值位置而靠近真实光带中心。此时 \hat{C}_i 与灰度极大值之间有一部分不属于光带灰度值连线范围内的梯度矩,被包含进灰度极大值所在区域的梯度矩里,自动缩小 \hat{C}_i 与灰度极大值位置之间的偏差,防止 \hat{C}_i 与灰度极大值位置之间产生太大的偏离。

基于梯度重心法的光带中心提取算法对图像光

系统左右相机拍摄的待测工件光带图像。

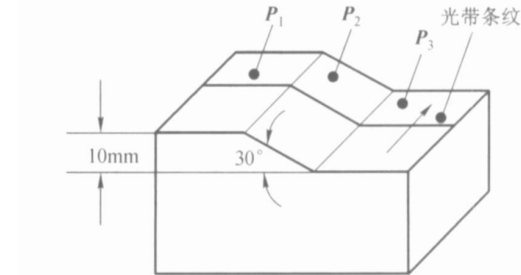


图 7 待测工件示意图

Fig. 7 Workpiece to be measured

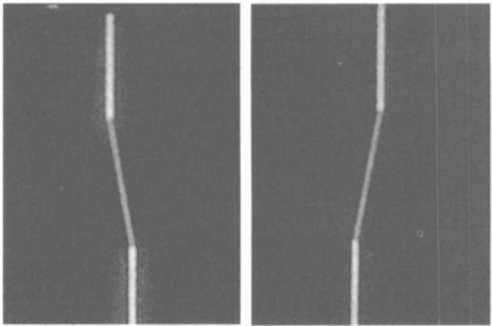


图 8 左右相机拍摄的待测工件的光带图像

Fig. 8 Image of workpiece with light stripe in left and right cameras respectively

带数据进行了低通滤波和幂次变换。图像光带灰度数据的低通滤波和幂次变换,减少了光带中的噪声和灰度的非正态分布对光带中心提取的影响。自适应阈值法计算出的光带边界包含了光带中心和边缘处的较多像素。基于梯度重心法的光带中心提取算法,以梯度值为权重,利用了光带边界内的较多像素的灰度信息,根据光带中心两边梯度矩的近似对称性进行光带中心位置的计算。光带边缘处的低灰度值像素因其与相邻像素的梯度值较大而被赋予较大的权重,相对其他算法而言,增加了光带边缘处低灰度值像素在光带中心位置计算中的权重。由于算法对图像中光带数据进行了低通滤波和幂次变换平滑,利用光带边界内的大量像素数据参与计算,以及梯度重心法本身的特性,使得算法具有较高的精度和良好的抗噪性。

对于图像上连续的光带,利用构成光带中心线的各行光带中心点的邻接性,通过采用“承上启下”的启发式搜索,将当前行光带中心粗略位置 C_i 限定在 C_{i-1} 附近的局部区域内,使当前行光带中心粗略位置 C_i 的搜索范围从 1 278 个像素缩小到 15 像素 (测量系统相机分辨率为 1 280×1 024),这样大大减小了在图像上逐行计算光带中心粗略位置 C_i 的计算量和计算时间,防止图像背景中的较亮光斑和高灰度的噪声点被误计算为光带中心,提高了光带粗略中心提取的准确性。

在三坐标测量机上装配双目视觉测头,组成结构光扫描测量系统,对发黑处理的金属工件的台阶表面进行测量,以验证光带中心提取算法的精度。台阶表面由高度差为 10mm 的两平行平面和与平行平面成 30° 角的斜面组成,如图 7 所示。图 8 为测量

采用相同的光带滤波数据处理及自适应边界阈值方法,分别用梯度重心法和灰度重心法提取光带中心,对图 7 所示工件进行 3 维测量。分别对测得的各个平面的点云数据进行平面拟合,并计算各测量点到拟合平面距离的均方差。在相同的测量条件下,若各测量点到拟合平面的距离的均方差较大,表明 3 维测量的精度较低,说明光带中心提取相对不准确;反之,拟合平面的点到拟合平面的距离的均方差较小,则说明光带中心提取相对较准确。表 1 为运用上述两种方法对 3 个平面多次测量后测量点到拟合平面的距离均方差的平均值。

表 1 两种算法测量结果拟合平面的均方差比较
Tab 1 MSE error comparison of measuring result with two methods

| 均方差 (nm) | $\sigma(P_1)$ | $\sigma(P_2)$ | $\sigma(P_3)$ |
|----------|---------------|---------------|---------------|
| 梯度重心法 | 0.018 | 0.021 | 0.022 |
| 灰度重心法 | 0.017 | 0.032 | 0.019 |

平行平面 P_1 和 P_3 上的光带的灰度分布较匀称,两种光带中心提取算法测量结果拟合平面的点

面距离均方差均较小。斜面 P_2 上的光带图像, 其灰度值较低, 且灰度分布不匀称, 运用灰度重心法时点云到拟合平面距离的均方差较大达到 0.032 mm , 运用梯度重心法时点云到拟合平面距离的均方差为 0.021 mm 。对于斜面上灰度分布不匀称的光带, 本算法也能比较准确地提取出光带中心位置, 具有较高的光带中心提取精度和良好的鲁棒性。

运用本算法提取光带中心的 3 维测量系统, 对半径为 30 mm 半径误差为 0.002 mm 的发黑处理钢球的球冠进行测量, 以检验算法精度。图 9 所示为球冠的 3 维测量点云数据。对去除粗大误差后的点云数据进行球面拟合, 拟合得到的球体半径与半径 30 mm 相比, 误差绝对值小于 0.008 mm 。去除粗大误差后的测量点云数据到拟合球面的距离均方差约为 0.025 mm 。

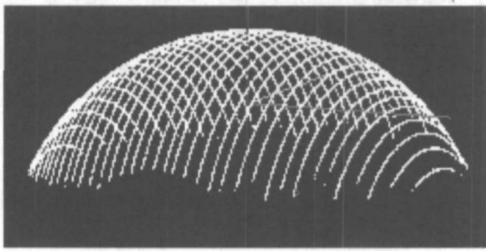


图 9 半径为 30 mm 的球面测量点云数据
Fig 9 Measured point cloud data of a sphere surface with Radius 30 mm

5 结 论

本文根据线结构光图像上光带灰度的梯度特性和非正态分布特点, 提出了一种基于梯度重心法的光带中心亚像素提取算法。算法应用低通滤波和幂次变换对光带图像数据进行平滑滤波, 运用自适应阈值法确定光带的边界阈值, 运用梯度重心法进行光带中心位置的提取计算。实验结果表明, 本算法具有较高的光带中心提取精度, 同时具有良好的抗噪性和鲁棒性, 在光带灰度分布较不匀称和有较大噪声时也能比较准确地提取出光带中心位置。

参考文献 (References)

- 1 Sui Lian-sheng, Li Bing, Jiang Zhuang-de. Research on method of laser knife center position extracting based on NURBS Interpolation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(10): 933-937. [隋连生, 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.]
- 2 Cui Xi-jun, Yang Chuan, Liu Bao-hua, et al. Self-adaptive iterative method of extracting center of linear structured light stripe [J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2007, 41(1): 73-76. [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]. 西安大学学报, 2007, 41(1): 73-76.]
- 3 Wu Qing-yang, Su xian-yu, Li Jing-zhen, et al. A new method for extracting the center line of line structure light stripe [J]. Journal of Sichuan University, 2007, 39(4): 151-155. [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.]
- 4 He Jun-ji, Zhang Guang-jun. Study on method for processing image of stripe in structured-light 3D vision measuring technique [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(7): 593-597. [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 [J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(7): 593-597.]
- 5 Wu Jian-bo, Cui Zhen, Zhao Hong, et al. An adaptive threshold method for light knife center acquisition [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2001, 22(1): 62-64. [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): 62-64.]
- 6 Lei Hai-jun, Li De-hua, Wan Jian-yong, et al. A method for fast detecting the center of structured light stripe [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2003, 31(1): 74-76. [雷海军, 李德华, 王建永等. 一种结构光条纹中心快速检测方法 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2003, 31(1): 74-76.]
- 7 Hu Bin, Li De-hua, Jin Gang, et al. New method for obtaining the center of structured light stripe by direction template [J]. Computer Engineering and Application, 2002, 38(11): 59-60. [胡斌, 李德华, 金刚等. 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, 38(11): 59-60.]
- 8 Hu Kun, Zhou Fu-qiang, Zhang Guang-jun. Fast extraction method for sub-pixel center of structured light stripe [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(10): 1326-1329. [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.]
- 9 Steger C. An unbiased detector of curvilinear structures [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(2): 113-125.