

基于动态梯度的激光光斑中心定位算法^{*}

蓝章礼^{1,2} 闫果¹ 杨小帆² 周建廷³

(重庆交通大学计算机与信息学院 重庆 400074)¹ (重庆大学计算机学院 重庆 400044)²

(重庆交通大学土木工程学院 重庆 400074)³

摘要 为提高激光光斑中心检测的长期稳定性、抗干扰性能和定位精度,在对相关圆心定位算法进行研究的基础上,通过理论分析与实验测试,提出一种基于动态梯度的激光光斑中心定位算法。该算法根据激光光斑特点,利用图像梯度对光斑进行标识与定位。实验结果表明,该算法定位精度高,有效提高了激光光斑中心检测的抗干扰性能和长期稳定性,适合对测量精度要求高的长期在线测量。这种新方法已被成功用于自动激光挠度测量系统中。

关键词 定位算法,激光光斑,中心,动态梯度

Location Algorithm of the Laser Spot Center Based on Dynamic Gradient

LAN Zhang-li^{1,2} YAN Guo¹ YANG Xiao-fan² ZHOU Jian-ting³

(School of Computer and Information Science, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)¹

(College of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China)²

(School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)³

Abstract To improve the long-term stability, anti-interference performance and location precision of the laser spot center detection, a dynamic gradient based location algorithm of laser spot center is given after theoretical analysis and experiment based on researching of some location algorithms of the centre of a circle. According to the character of the laser spot, the algorithm identifies and locates the spot by using gradient. Experiment results demonstrate the high precision of the algorithm, and the long-term stability and anti-interference performance of the detection of the laser spot center are improved efficiently. It is suitable for long-term online measurement. The new algorithm has been used in a laser deflection measurement system successfully.

Keywords Location algorithm, Laser spot, Center, Dynamic gradient

1 引言

激光光斑中心检测是激光挠度/位移测量法、激光扫描三角法、激光准直仪和激光光斑分析仪等光电测量手段中的关键技术^[1-3]。光斑中心的定位精度、长期稳定性和抗干扰性能不仅直接影响测量结果,稳定性差的算法在长期使用的监测环境下甚至出现找不到激光光斑或测量结果错误的现象。为此,探索性能更好的光斑中心定位方法的研究始终在进行。其中,杨耀权、施仁、于希宁等提出用 Hough 变换提高激光光斑中心定位精度的算法^[2], Thomas 和 Chan 提出基于圆拟合的激光光斑中心检测算法^[4], Lyvers, Mitchell, Akey 提出利用空间矩进行激光光斑的亚像素定位^[5], 也有研究者用对称与拟合的方法定位光斑中心, 还有应用较多的重心算法等。这些研究都提高了检测激光光斑中心的精度。然而在实际的激光光斑中心定位中, 由于激光存在散射、衍射、随机噪声和干扰光线, 被测物面反射特性不均匀等因素, 导致光斑信号强度分布不均匀, 采用上述算法的精度或速度仍然不够, 抗干扰性能较差。特别是当激光器长期工作在无人值守且有较强光线干扰的环境下时, 随着激光强度的减弱, 上述算法在一些情况下甚至完全无法正常使用。

在开发自动在线激光挠度/位移测量系统时, 为得到一种精度高、速度快、抗干扰能力强且长期稳定性好的激光光斑中心定位算法, 对相关的算法进行了研究、比较和改进, 实验、运

用和改进了多种算法, 找到了性能更优的基于动态梯度的激光光斑中心定位算法, 该算法通过了长时间的实验验证并运用于实际工作中。本文针对激光光斑检测的实际工作环境特点, 阐述基于动态梯度的激光光斑中心定位算法的思想, 描述了算法的主要流程和梯度算子的设计, 列举了几个典型实验进行算法的性能验证。

2 现有光斑中心定位算法分析

常用光斑中心算法有 Hough 变换法、重心法、对称法、圆拟合法和空间矩定位法等, 简单介绍如下。

Hough 变换法^[2,6]: 按就近原则进行投票, 根据得票多少检测激光光斑的中心。它需对参数空间离散化, 限制了检测精度, 参数空间得票最多的点可能不唯一, 选择不同的点得到的图像空间曲线差异比较大。圆的 Hough 变换对每一个边界点都需要在三维参数空间内逐点投票并进行记录, 时间复杂度为 $O(n^4)$, 因此在实用中受到了限制, 基本不可能用于高精度实时检测系统。

重心算法: 将激光图像处理为灰度图像, 然后求出激光光斑重心。它要求光斑图像分布比较均匀, 图像对称性好, 否则会产生较大误差, 而且抗干扰能力弱, 有光线干扰特别是存在一定强度且从侧面射入的干扰光线时, 测量结果经常不可用。

圆拟合法^[4]: 根据最小二乘原理用圆来逼近激光光斑轮廓。优点是算法速度快, 时间复杂度为 $O(n)$, 能够多次迭

^{*} 本文受国家自然科学基金(50608072)、863 科技计划项目(2006AA04Z433)、重庆市教委项目(KJ070420)和重庆市科技攻关项目资助。
蓝章礼 博士研究生, 主要研究方向为计算机算法设计研究、数字图像处理、桥梁健康监测。

代,运算精度较高;但抗干扰性能差,当存在随机噪声时中心运算精度会明显降低,当干扰强度较大时所得圆心可能明显错误。

空间矩定位法^[5]:使用 LOG 算子把光斑边缘定位到单像素精度,然后使用二阶空间矩算子进一步细分,使边缘定位达到亚像素精度,再通过拟合计算得到光斑中心坐标。它要求光斑边缘为理想二级边缘,而实际上从背景到边缘存在过渡,不可能是两个简单的二级边缘,所以要得到更高的定位精度,需要通过建立误差查找表进行校正,或者使用三级模型来描述边缘等,这在实际光线复杂变化的情况下使用往往难以实现。

对称方法:利用激光光斑的对称性找对称中心,以对称中心作为激光光斑的中心。它要求光斑的对称性良好,否则误差较大。

3 基于动态梯度的光斑中心定位

在以激光光斑定位为基础的监测系统中,往往需要长期在线对激光光斑中心进行实时精确定位,并且要求在较强光线干扰时定位精度基本不降低。然而对于投射距离较远的激光,其光斑由于受到散射、衍射、随机噪声和干扰光线的影响,加之光斑投影面反射特性不均匀等因素,最终形成的光斑往往很不规则,亮度从中心到边缘逐渐减弱,散射光线、衍射条纹、随机噪声和干扰光线非常明显,如图 1 所示。

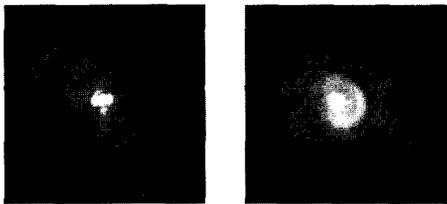


图 1 两种典型激光光斑图像

当激光器工作一段时间后,激光强度会减弱,光斑亮度会降低,在其它环境因素不变的情况下,光斑图像对比度降低,图像质量逐渐下降。直接采用以上几种算法不能同时满足在精确度、抗干扰和稳定性上的实际应用,为此需要研究一种能在实际使用中快速、精确、稳定、抗干扰的光斑中心定位方法。

3.1 算法总体描述

本文提出的基于动态梯度的激光光斑中心定位算法的流程如图 2 所示。

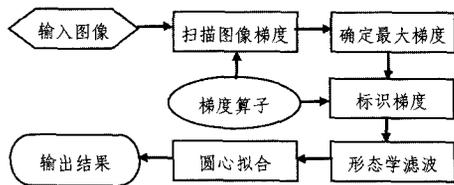


图 2 算法的基本流程

其中在输入图像前往往还需要采用图像增强的方法提高输入图像的质量。扫描图像梯度是指按预定的梯度算子对图像的梯度分布情况进行度量和评估,然后根据度量的结果确定光斑图像中梯度的具体分布及最大梯度的数值。而标识梯度则是根据梯度的具体分布确定哪些梯度应该保留并进行标识,通过标识将原始图像转化为以梯度为基准的二值图像,然后对标识出的二值梯度图像进行形态学滤波,去除干扰,最后根据光斑的二值梯度图像进行圆心的拟合运算。

以 650nm 红色激光为例,将各环节阐述如下。

3.2 梯度算子设计

对于图像函数 $f(x, y)$,它在点 (x, y) 处的梯度是一个矢量,定义为

$$G[f(x, y)] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (1)$$

梯度的方向在函数 $f(x, y)$ 最大变化率的方向上,梯度的幅度 $G[f(x, y)]$ 由下式算出:

$$G[f(x, y)] = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

对于数字图像而言,其梯度使用差分的方法进行运算,这就涉及到运算梯度的各种算子,如常用的水平垂直算子、Robert 梯度算子、Sobel 算子、Prewitt 算子和二阶微分的 Laplacian 算子等。

在本文的研究中,梯度运算是用于标识激光光斑的正确位置,不同于图像锐化,因此梯度算子的设计至关重要,且不同于锐化时的算子。设图像上各像素位置如下所示:

$$\begin{matrix} f(x, y) & & f(x+1, y) \\ \bullet & & \bullet \\ \bullet & & \bullet \\ f(x, y+1) & & f(x+1, y+1) \end{matrix}$$

考虑激光光斑基本呈圆形,沿 $f(x, y)$ 与 $f(x+1, y+1)$ 及 $f(x+1, y)$ 与 $f(x, y+1)$ 方向图像梯度最大,而干扰光线规律性不强。经分析与多次实际测试比较后,得到以下梯度算子:

$$G[f(x, y)] = \left| \sqrt{2} f(x, y) - f(x+1, y+1) \right| + \left| \sqrt{2} f(x+1, y) - f(x, y+1) \right| \quad (3)$$

式(3)是一个经验公式, $\sqrt{2}$ 是一个经验值,可根据具体环境适当调整。利用式(3)作为梯度算子对图像的梯度进行标识时,光斑中心附近的梯度标识形状与原图像稳合,干扰噪声点少,抗干扰能力强,激光光斑位置准确。

3.3 梯度的扫描、确认与标识

对图像梯度的扫描、确认与标识分以下几步:

(1) 扫描整个图像,以每个像素的 R 值进行梯度运算,找到图像中的最大 R 值梯度数值。

(2) 设定标识阈值。可以用最大梯度值的 1/2, 1/3 等作为阈值。实验表明,利用式(3)作为梯度算子时,标识阈值在 1/1.5~1/5 之间均能取得良好效果。

(3) 再次扫描图像,对于 R 梯度值大于标识阈值的,将其置为“1”,标识为白点,否则置为“0”,标识为黑点,输出图像转化为与原图像对应的二值图像。

当标识阈值较大时,输出图像噪声点少,但光斑中心可能出现空洞(黑点)。当标识阈值较小时,光斑还原效果好,但输出图像噪声点较多。

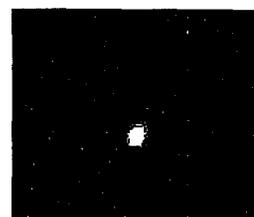


图 3 经梯度确认与标识后输出的二值图像

根据梯度算子的设计和上述标识算法,在实验室中利用 CCD 摄像机和视频采集卡对真实激光光斑进行采集并利用本文算法获得了输出图像。图 3 是将标识阈值设为 1/2.7,经梯度确认与标识的二值梯度图像。

3.4 形态学滤波

在如图 3 所示的输出图片中,除了能够标识出光斑的位置外,还存在着部分盐性噪声和少量胡椒噪声。当标识阈值较大时,光斑中心出现的胡椒噪声会更明显。为消除椒盐噪声的干扰,应采取适当的滤波方式进行图像的增强,从而提高中心定位的精度。

采用 Opening 算法消除外部盐性噪声点(包括一次 Erosion 操作和一次 Dilation 操作),然后再进行一次 Closing 操作去除光斑中的暗点(包括一次 Dilation 操作和一次 Erosion 操作)。在具体的操作中,选用 3×3 的白色方块结构元 S (Structuring element S)作为遮罩(Mask),而图像本身作为一个二值图像 B(Binary image B)进行一次 Opening 运算和一次 Closing 运算。即。

$$B \circ S = (((B \ominus S) \oplus S) \oplus S) \ominus S \quad (4)$$

按(4)式进行处理后,光斑外的噪声点、光斑中的小暗点和边缘不平滑处被消除。结果如图 4 所示。

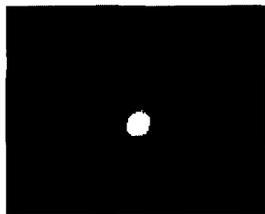


图 4 完成 Opening+Closing 运算后的图像

3.5 圆心拟合

在经过图像预处理、采用恰当的梯度算子进行梯度的扫描、确认、标识、图像转换和滤波后,采集时的抗干扰能力明显增强,信号光斑形状比较规则,对称性较好,光斑边缘比较光滑而清晰,有利于光斑中心的准确运算和稳定。

本文采用以下公式进行圆心的拟合运算^[4]:

$$a = \frac{(\overline{x^2 \bar{x}} + \overline{\bar{x} y^2} - \overline{x^3} - \overline{x y^2})(\overline{y^2} - \overline{y^2}) - (\overline{x^2 \bar{y}} + \overline{\bar{y} y^2} - \overline{y^3} - \overline{x^2 y})(\overline{xy} - \overline{xy})}{2(\overline{x^2} - \overline{x^2})(\overline{y^2} - \overline{y^2}) - 2(\overline{xy} - \overline{xy})^2} \quad (5)$$

$$b = \frac{(\overline{x^2 \bar{y}} + \overline{\bar{y} y^2} - \overline{y^3} - \overline{x^2 y})(\overline{x^2} - \overline{x^2}) - (\overline{x^2 \bar{x}} + \overline{\bar{x} y^2} - \overline{x^3} - \overline{x y^2})(\overline{xy} - \overline{xy})}{2(\overline{x^2} - \overline{x^2})(\overline{y^2} - \overline{y^2}) - 2(\overline{xy} - \overline{xy})^2} \quad (6)$$

对于形状对称性较好的光斑,从理论上分析可知用迭代的方法拟合圆心时第一次即能较好地找准圆心位置。在实验中我们也发现,对经过上述步骤处理的激光光斑中心进行运算时,第一次的运算结果与第二次迭代结果非常接近,两次结果相差不超过 0.2 像素,第二次以后的多次迭代结果几乎完全重合。因此,没有必要进行 3 次以上的迭代,从而缩短运算时间。而对于没有改进的圆心拟合算法,一般情况下至少要进行 3 次以上的迭代运算才能使结果比较稳定。

4 实验及分析

为验证改进的效果,分别对抗干扰性能、激光强度变化和

中心运算精度进行实验。实验时按图 5 连接设备。

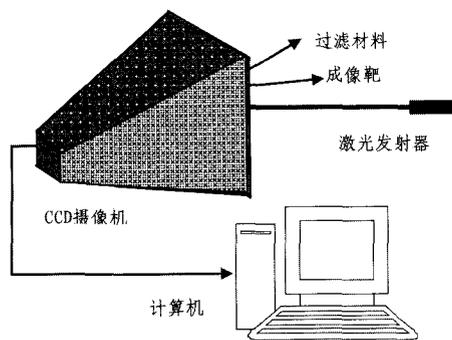


图 5 实验系统连接示意图

其中光线过滤材料为蓝绿色半透明材料,其作用在于减弱通过的自然白光强度且使其呈蓝绿色,而 650nm 的红色激光由于穿透性很强,所以透过滤材料后仍然呈鲜红色。在进行梯度运算时,仅提取每个像素的 R 值进行梯度运算,由于自然白光通过过滤材料后已呈蓝绿色,其红色成分少,R 值小,R 值的变化不大。由于以 R 值作为梯度运算的基础,因此干扰光线基本被滤除。

4.1 抗干扰实验

将一个激光发射器和成像靶固定,确保激光光斑不发生改变。实验过程中不定时的将室内灯光打开和关闭,偶尔用二极管手电筒和强光手电筒直射激光光斑或将强度较大的太阳光通过反射装置直接投射到成像靶。结果表明,在使用前文所述的常用方法时,测量数据极不稳定,特别是用手电筒和太阳光直接照射时,中心定位完全不正确。

而在采用基于动态梯度的激光光斑中心定位方法进行的实验中,当用各种光线进行干扰时,由于干扰光线在成像靶上形成的光线图像整体明暗比较一致,不管干扰光线的强度如何,其图像梯度完全无法与激光光斑图像的梯度比较,因此经梯度运算后几乎完全被滤除,运算的光斑中心位置结果基本不变,测量数据保持稳定。

4.2 激光强度变化实验

对于长期在线工作的激光器,其激光强度将随着时间的推移而逐渐降低,采用传统的方法在激光强度逐渐减弱后确认光斑的位置的难度增加,甚至找不到光斑。本文所设计的算法通过检测最大梯度来标识光斑位置和范围,在很大程度上不会受光斑强弱的干扰。

实验时逐次降低激光器的供电电压,从而减弱激光光斑的亮度,模拟长期工作后激光强度的变化。实验结果表明,该算法对光线强度不敏感,特别是当激光光线很弱时,其它算法在不进行阈值调整时均难以正确判断激光光斑的位置,而本算法在成像靶上投射的光斑通过 CCD 摄像机形成的图像在人眼几乎不可见时仍能正确标识光斑的位置且运算的光斑中心保持稳定。

实验中我们也试图通过找最大亮度的方法确认激光光斑的位置,从而可以直接利用其它算法进行定位,但在使用最大亮度的方法进行运算时的抗干扰性能差,特别是激光光斑本身的亮度不够时,稍有干扰就不能得到正确结果。

4.3 中心运算精度实验

中心运算精度是各种光斑中心算法性能的关键评价因素,为此,我们分别对对称性较好、对称性较差的真实激光斑和模拟激光光斑进行了实验,实验用的图像为摄取或制作

的静态图像。由于激光光斑边缘非常模糊且对称性不好,用空间矩算法很困难,Hough 变换法的运算复杂度高且性能较差,因此只采用重心法、圆拟合算法与本文算法进行了比较。在实验过程中,圆拟合算法迭代次数为 3,本文算法迭代次数为 2。

4.3.1 对称性较好的激光光斑中心运算

图 6 为一真实的对称性较好的激光光斑图像,由于不知道其真实中心所在位置,只能进行估计,大约为(156, 118)。各算法的运算结果为:重心算法,(151.53, 118.70);圆拟合算法,(150.65, 118.39);本文算法,(156.13, 118.30)。由于图像对称性较好,因此重心法与圆拟合法结果比较接近。各运算结果在激光光斑图像中的位置如图 6 所示。

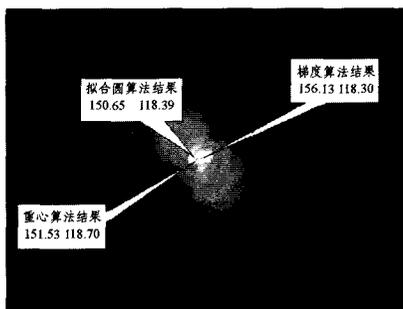


图 6 对称性好的激光光斑中心定位结果

4.3.2 对称性较差的激光光斑中心运算

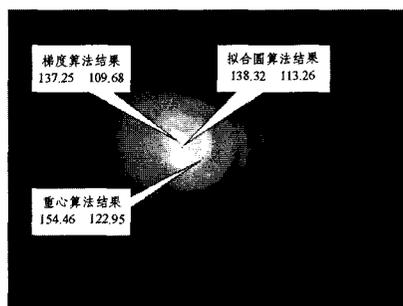


图 7 对称性差的激光光斑中心定位结果

图 7 为一真实的对称性较差的激光光斑图像,其真实中心所在位置估计约为(137, 109)。各算法的运算结果为:重心算法,(154.46, 122.95);圆拟合算法,(138.32, 113.26);本文算法,(137.25, 109.68)。由于激光光斑的图像对称性差,重心算法明显不正确,肉眼已可确定其远离了真实中心。各运算结果在激光光斑图像中的位置如图 7 所示。

4.3.3 模拟光斑中心运算

由于真实的激光光斑图像的实际中心无法无误差的获取,为此我们制作了一个中心坐标为(152.5, 121)的理想圆形

图像,并模拟激光光斑特点在该圆的图像上加入了一些干扰噪声、散射及衍射条纹,如图 8 所示。

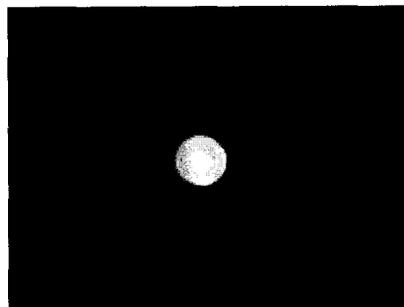


图 8 模拟激光光斑

运算结果为:重心算法,(141.65, 130.54);圆拟合算法,(147.68, 121.88);本文算法,(152.59, 120.86)。根据图像特点可分析运算结果的合理性,由于该图像对称性较差,因此重心法运算误差较大;选择合适的阈值后,圆拟合法与本文算法结果误差都比较小。

结束语 本文通过对激光光斑特点及其工作模式进行分析,提出了基于动态梯度的激光光斑中心定位算法。该算法提高了激光光斑中心算法的抗干扰性能和长期稳定性,测量精度较高,减少了迭代次数,其优越性在实验中已得到充分体现。目前,该方法已成功应用于激光挠度/位移监测系统并投入到渝黔高速公路太平庄大桥和安稳大桥的在线应用,已稳定运行超过 5000h,为桥梁健康监测提供了大量真实有效的数据。

参考文献

- [1] 张奔牛,蓝章礼,周志祥. 位移/挠度检测和监测装置及方法[P]. 中国. 发明专利申请公开说明书. 200510057473.6
- [2] 杨耀权,施仁,于希宁,等. 用 Hough 变换提高激光光斑中心定位精度的算法[J]. 光学学报,1999,19(12):1655-1660
- [3] Paul J, Frederick W, David L. Nova laser alignment control system [A]. SPIE[C], 1984, 483: 54-64
- [4] Thomas S M, Chan Y T. A simple approach for the estimation of circular arc centre and its radius[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 45(3): 362-370
- [5] Lyvers E P, Mitchell O R, Akey M L, et al. Subpixel measurements using a moment-based edge operator[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(12): 1293-1309
- [6] Caslteman K R. Digital image processing [M]. Beijing: Tshua University Publishing Company, 1998

(上接第 219 页)

续光滑。

结束语 本文通过分析手指静脉图像的结构及特点,提出了基于降维思想的手指静脉特征提取方法,即把二维的图像分解成一维的曲线进行处理,从而达到简化算法以及特征提取的目的。实验表明:该方法思想独特,算法简单易行,适用于那些信噪比较低、光照不均以及具有手指静脉类似特征的图像的特征提取。该算法对手指静脉的提取达到满意的效果。

参考文献

- [1] 孙东梅,裴正定. 生物特征识别技术综述[J]. 电子学报, 2001,

29(12A):1744-1746

- [2] 包桂秋,林喜荣,苏晓生. 基于人体生物特征的身份鉴别技术发展概况[J]. 清华大学学报(自然科学版)2001,41(4):72-76
- [3] Zanan H D, Lovhoiden G, Deshmukh H. Design of a clinical vein contrast enhancing profector[J]. SPIE, 2001, 4254: 204-215
- [4] Lovhoiden G, Deshmukh H, Zanan H D. Clinical evaluation of vein contrast enhancement[J]. SPIE, 2002, 4615: 61-70
- [5] 冈萨雷斯. 数字图像处理[M]. 北京:电子工业出版社, 2005
- [6] 马殿炜. 基于距离变换的嵌入式马尔科夫模型在手指静脉识别中的应用[D]. 博士论文. 吉林大学, 2005
- [7] 葛哲学,陈仲生. Matlab 时频分析技术及其应用[M]. 北京:人民邮电出版社, 2006