

管道三维检测仪的激光光斑位敏探测技术

刘滔滔,汪贵华,张锦涛,张天宇,杨 栩,辛 嘉
(南京理工大学电子工程与光电技术学院,江苏 南京 210094)

摘 要:通过摄像机采集激光光斑在成像屏上的图像并计算光斑坐标变化的方法,来检测地下管线的位置分布以及弯曲变化,具有精度高、响应灵敏等优点。在投影屏边缘处设计了五个固定孔作为尺度定标点,采集激光光斑在管道中移动的投影图像,采用多种数字图像处理方法,获得了五个固定孔投影椭圆的位置以及光斑的位置。此方法比以前检测光斑位置的方法,数据稳定可靠,有助于地下管道的三维分布测试的精度提高。

关键词:管道三维检测;激光光斑;位敏探测;数字图像处理

中图分类号:TN29 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2019.11.008

The detecting technology of the laser spot position in the underground pipeline detection instrument

LIU Tao-tao, WANG Gui-hua, ZHANG Jin-tao, ZHANG Tian-yu, YANG Xu, XIN Jia

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To detect the three-dimensional distribution of underground pipeline, the laser spot variation on imaging screen is collected by camera. The method is of higher precision and more sensitive response. Five fixed points at the edge of the imaging screen are designed as the key points of scale calibration. The position of the five projected light ellipse and the laser light spot is obtained by collecting the images of the laser projection screen and the image process method. The data is more stable and reliable, compared with the previous method which detects the position of the laser spot related to the entire image. The technology improves the detecting accuracy of the three-dimensional detective instrument of the underground pipeline.

Keywords: three-dimensional pipeline detecting; laser spot position; position sensitive detecting; digital image processing

1 引 言

随着城市的发展,地下管道的数量越来越多,分布也越来越复杂,管道三维空间分布的非开挖检测十分必要。使用管线外探测方法会受到管道周围电磁场的影响,甚至可能会得到完全错误的结果^[1]。在用位敏探测器(PSD)检测激光光点位置等管线内探测技术,不受地质条件、埋管深度、电磁环境限制

的优势^[2-3]。而 PSD 中心以及边缘的电压-位置灵敏度的非线性严重,严重影响测试数据的可靠性。为了解决非线性的问题,提高数据的准确性,本实验室提出了内置激光投影屏,通过 CMOS 摄像机来探测激光光斑的移动位置,检测激光光斑在整个图像视场中像素坐标的方法^[4]。由于探测仪运动时,摄像机相对投影屏有抖动,视场将发生变化,坐标的准

精度受到较大的影响。本文在投影屏边缘设计了五个固定点作为尺度定标的关键点,确定光斑在五个固定点所标定的坐标系 C 中的坐标,以消除视场变化带来的误差,改进了图像处理的算法,能够实时地输出每张图像光斑在坐标系 C 中的坐标,数据更可靠,获得了较好的光斑移动的坐标结果。此方法具有结构简单、实用、成本低的优点,数据可靠性和测量精度获得了大的提高。

2 激光的位敏探测的测试试验

管道三维检测仪的激光位敏探测技术原理图如图 1 所示。该设备包括了半导体激光器、玻璃投影屏、CMOS 摄像机、电路板、万向节、定中器等部件。

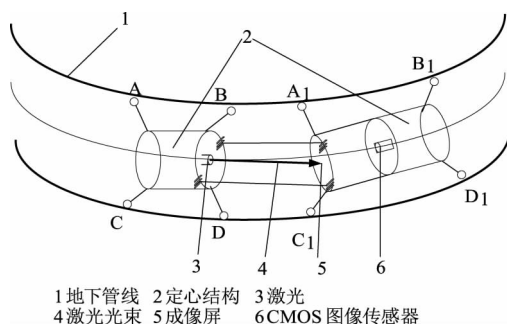


图 1 管道三维检测仪测量原理图

Fig. 1 Measuring principle illustration

探测仪在管道中移动时,等长度间隔采集光斑图像,通过图像处理提取出光斑中心的位置坐标,并转换成坐标系 C 下的坐标,得到一系列离散的光斑坐标信息,采用曲线拟合递推法^[3],便可得到管线的三维分布。系统软件环境主要包括嵌入式 Linux 系统、OpenCV 计算机视觉库。嵌入式 Linux 系统给软件运行提供了环境,OpenCV 计算机视觉库给光斑图像处理提供了处理方法。

实际采集模块采集到的图像如图 2(a) 所示,其中外圆为机械结构内壁,内圆为成像屏,成像屏上的大椭圆为激光打在成像屏上的光斑,光斑随着管道的弯曲会在成像屏上移动,外圆和内圆之间的五个小椭圆是五个被镂空的小孔,五个投影小椭圆质心在机械件的同一个圆上,圆的直径 φ 已知,作为绝对定标的尺寸的参考,用来确定给定的直角坐标系,该圆叫做定标圆。五个小椭圆中,有四个两两相对,将中心相互连接起来,夹角为 90° ,两条直线构成一个直角坐标系,剩余一个小椭圆所在象限定义为第一象限。

3 图像处理方法

整个图像处理过程主要分为摄像机标定、图像预处理、五个小椭圆位置提取和坐标系固定、光斑中心位置提取、图像像素坐标系与给定坐标系坐标之间的转换共五大步骤。摄像机标定采用张氏标定,通过采集单平面标定板图像并处理该图像得到摄像机内参数和畸变参数的摄像机标定方法^[4]。图像预处理是将彩色图像变换为灰度图像、并采用自适应中值滤波算法对图像滤波处理,并将滤波后的图像进行膨胀处理。这样预处理后的效果图如图 2(b)。

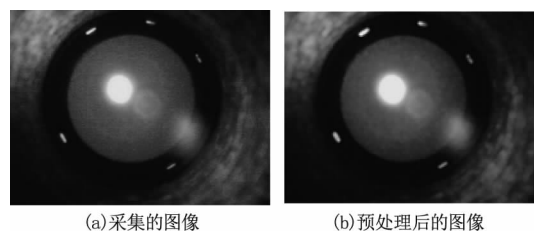


图 2 原始及预处理后的图像

Fig. 2 Original and preprocessed images

为了得到五个小椭圆所确定的直角坐标系,需要提取各自坐标值。而由于激光打在成像屏上有光的反射,如图 2(a) 所示,会存在小椭圆被遮挡的现象,被遮挡的小椭圆与周围像素值非常接近,同时随着光斑的移动,遮挡位置不确定,给处理带来了很大的麻烦。所以必须要设计特定的算法处理小椭圆被遮挡的现象。

为了将五个小椭圆中心坐标提取出来,首先需要将其从图像中分离出来,本文采用阈值分割,将小椭圆和背景分割开,也将光斑点去掉(后来单独提取)。将预处理后的图像通过最大类间方差法,确定最佳的分割阈值。阈值分割后的图像如图 3(a) 所示,但是周围存在成像屏等其它无关区域,需要后续操作分离。

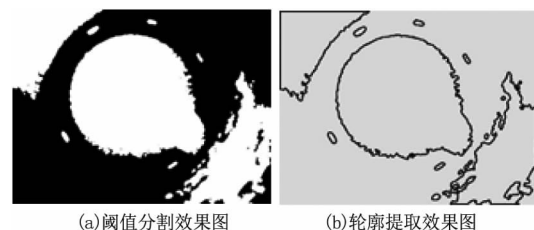


图 3 阈值分割及轮廓提取效果图

Fig. 3 Threshold segmentation and contour extraction of images

经过阈值分割得到二值化图像后,为了提取小

椭圆的中心并去除成像屏等无关区域,本文轮廓提取方法采用的是一种图像轮廓跟踪算法^[5]。该算法针对数字化二值图像的扑拓结构进行边界跟踪,寻找图像中的外轮廓和孔轮廓,并提取出所有轮廓的坐标点,轮廓提取效果图如图3(b)所示。

假设图像中只有一个连通区域,待处理二值化图像如图4(a)所示,将该图像连通区域每个像素点用方格标出,用数字对边界像素点顺时针编号,如图4(b)所示。

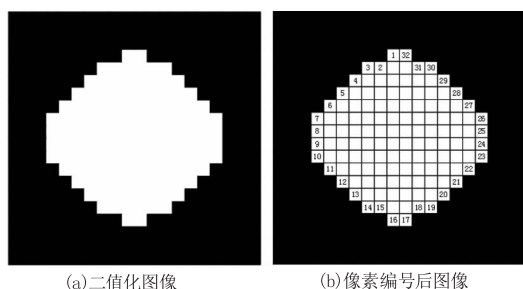


图4 二值化及像素编号后的图像

Fig. 4 Binarized and numbered pixel images

该算法从左上角开始逐行扫描,将编码后的图像取左上角放大,如图5所示,假设 $f(x,y)$ 表示图像像素值。每次行扫描时,当 $f(x,y-1)=0, f(x,y)=1$ 时,表明 $f(x,y)$ 为外边界的起始点位置,因此找出图中1号像素点为轮廓起始点。然后以1号像素点为中心,在相邻8个像素点中,从1号左边相邻像素点开始,顺时针找到轮廓终止像素点为32号,逆时针找到轮廓第二个像素点为2号,同理以2号像素点为中心,相邻8个像素点找到3号像素点,以此类推便可找到一个个相邻的轮廓像素点,当找到最后一个像素点与轮廓终止像素点重合时,表明找到了一个闭合的轮廓,保存该轮廓上所有像素点信息,并记下像素点数目为 C 。同理对于存在多个轮廓的图像,按照相同的方法,每找到一个轮廓便保存,然后继续寻找下一个轮廓,标识符NBD的最大值减1表示轮廓的个数。

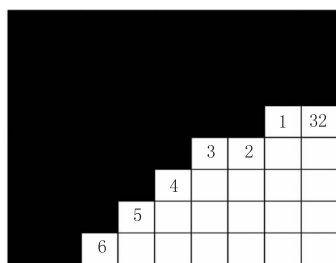


图5 二值化左上角编码放大图像

Fig. 5 Details of the top left corner

将阈值分割后的图像按照上面的算法进行轮廓提取,如图3(b)所示,五个小椭圆的轮廓全被提取出来,但是成像屏等无关区域的轮廓也被提取出来。

由于阈值分割后的图像混杂着成像屏等区域,轮廓提取后的图像上有一个特别大的成像屏轮廓和很多大小不一、形状不规则的图像边缘小轮廓。所以需要对这些轮廓进行筛选,留下五个小椭圆轮廓。本课题采用两次筛选,两次筛选选用不同的标准。

第一次筛选根据这些封闭轮廓的周长,即轮廓上的像素点数目 C 。假设 C_i 表示第 i 个轮廓的周长, m 表示图像上轮廓总数。由于五个小椭圆形状和大小相近,提取出来的小椭圆轮廓周长相差不大。设置周长的最大值阈值 $C_{\max}$ 、最小值阈值 $C_{\min}$,使小椭圆轮廓周长在阈值范围内。当满足 $C_{\min} < C_i < C_{\max}$,表明该轮廓周长在范围内,这样初步筛选出小椭圆和部分无关的轮廓,排除成像屏等大轮廓。本课题通过处理多幅采集的图像,确定大致的小椭圆周长范围,选择的最佳的 $C_{\max}$ 为150, $C_{\min}$ 为20。

将轮廓提取后的图像进行第一次轮廓过滤,如图6(a)所示,与过滤前相比,第一次过滤后的无关轮廓明显减少,但仍然有轮廓周长在筛选范围内的小轮廓没有被滤除。

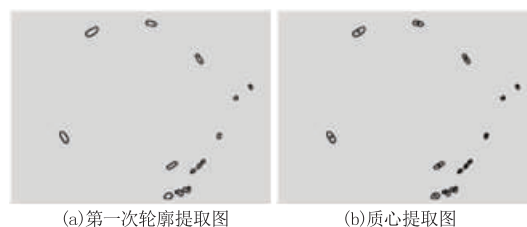


图6 第一次轮廓提取及质心提取图

Fig. 6 Frist time contour extraction and centroid extraction images

为了得到小椭圆的位置,本课题选择将小椭圆的质心作为位置的参考点,即用五个小椭圆的质心来确定给定的坐标系。基于最小二乘法的灰度重心法椭圆拟合法等^[6-8]。图像质心的求法要用到图像的不变矩。

假设一幅 $M \times N$ 大小灰度图像,它的灰度分布密度为 $f(x,y)$,则其 $p+q$ 阶原点矩定义为:

$$m_{pq} = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N x^p y^q f(x,y) \quad (1)$$

根据质心原理, $(\bar{x}, \bar{y})$ 可表示质心坐标。根据式(1),可得:

$$\bar{x} = \frac{m_{10}}{m_{00}} = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N x^1 y^0 f(x, y)}{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N x^0 y^0 f(x, y)} = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N x f(x, y)}{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x, y)} \quad (2)$$

$$\bar{y} = \frac{m_{01}}{m_{00}} = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N x^0 y^1 f(x, y)}{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N x^0 y^0 f(x, y)} = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N y f(x, y)}{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x, y)} \quad (3)$$

分别将第一次筛选后的轮廓上的像素点代入式(2)、式(3)进行计算,即可得出每个轮廓的质心坐标 $(\bar{x}, \bar{y})$,将第一次筛选后的图像进行质心提取并标记每个轮廓质心,得到质心提取图如图6(b)所示,每个轮廓的质心都用黑色圆点标记。由于第一次筛选后,留下的轮廓中会有周长与小椭圆相近的无关轮廓,因此还需要进行第二次的筛选。第二次轮廓筛选的标准是轮廓质心到成像屏圆心的距离。五个小椭圆在检测前已经固定好位置,并且在同一个圆上,且外部大圆和成像屏小圆之间是黑色区域,没有无关轮廓。每次选取三个点作为一组,计算其所在圆的直径 D ,当直径满足: $\phi - \Delta < D < \phi + \Delta$ 时,认为该组合处在定标圆上。其中 Δ 设为一个小的量值。遍历其它的点,若仍然满足上述条件,认为该点也在定标圆上,直到找到这样的两点,循环停止。所有无关的轮廓都被去除,只剩下五个小椭圆轮廓。图7(a)二次过滤后的轮廓质心图,图7(b)为坐标显示图。图7(b)中的640,480是整个图像的像素数。由于激光打在成像屏上的光斑是最亮的一块区域,与成像屏周围区域有着明显的灰度值差异,因此可以通过图像的灰度直方图选择合适的阈值将光斑与背景分割开来^[4]。

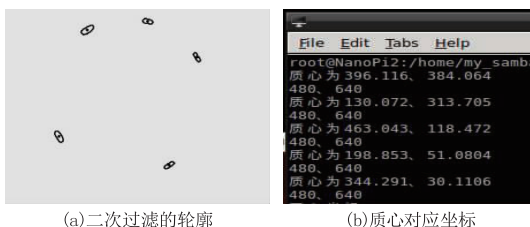


图7 第二次过滤的轮廓及质心对应坐标

Fig.7 Centroid from twice filtereal contour and the corresponding coordinates

将采集到的所有光斑坐标和小椭圆坐标、原点坐标共同绘制到散点图中,如图8所示。比较多幅

处理后的图像,五个小椭圆基本重合,提取出的质心坐标基本相近,认为提取正确。由于系统万向节另一端顺时针运动,因此光斑位置理论上是围绕着成像屏中心分布,从图8中可以看出,光斑分布与理论相符,围绕原点离散分布。此方法检测激光光斑的位点坐标,比以前采用的检测光斑在整个图像中的坐标方法,取得了一大进步。由于五个小椭圆是机械开的小环孔,不管图像视场如何改变,环孔位置都不会改变,因此可作为绝对尺寸进行定标,将小椭圆所确定圆的直径带入,便可完成由像素尺寸向以毫米为单位的绝对尺寸的转换。这些工作为管线的三维分布的计算提供了精确的测量数据。

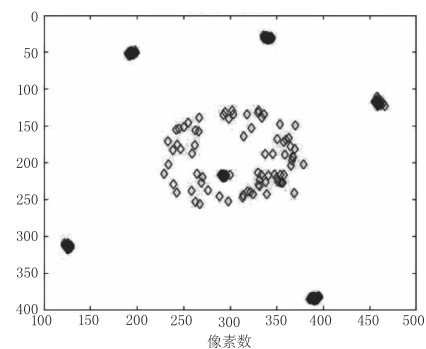


图8 运动状态下光斑、小椭圆和原点散点图

Fig.8 Scatter plot of spots, ellipse and origin in discrete time

4 结 论

激光光斑投影到屏上,用摄像机来探测随管道弯曲的激光光斑移动位置的变化,是很好的检测方法。与其它的激光探测方法相比,有着精度高,位置检测响应灵敏,不存在位置有关的非线性等问题,有着很好的应用前景。本文采用的边缘的五个小椭圆作为检测点,确定其位置,以及光斑的位置,比以前采用的检测光斑在整个图像中的坐标方法,取得了一大进步。本文采用了预处理,最大类间方差法,轮廓提取,轮廓筛选等多次处理,获得了五个定位椭圆的位置。在动态测试中,获得了激光光斑以及五个定位椭圆的位置。鉴于五个定位小椭圆在机械设计中是固定的,可以计算出激光移动光斑的二维坐标,有助于地下管线的三维分布的测试。

参考文献:

- [1] LI Xuejun, HONG Libo. Detection and surveyand management techniques[J]. Urban Geotechnical Investigation &

- Surveying, 2010(4): 5 - 11. (in Chinese)
- 李学军, 洪立波. 城市地下管线探测与管理技术的发展及应用[J]. 城市勘测, 2010(4): 5 - 11.
- [2] SHEN Linyong, LI Yamin, ZHANG Yanan, et al. Design and analysis of underground pipeline detecting system based on PSD [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(8): 1429 - 1435. (in Chinese)
- 沈林勇, 李亚旻, 章亚男, 等. 基于 PSD 的地下管线探测装置设计与分析[J]. 光学精密工程, 2008, 16(8): 1429 - 1435.
- [3] SHEN Linyong. On new detecting method of 3D curve of trenchless information pipelines [D]. Shanghai: Shanghai University, 2011. (in Chinese)
- 沈林勇. 非开挖信息管线的三维曲线探测新技术研究 [D]. 上海: 上海大学, 2011.
- [4] WANG Ke, WANG Guihua, XU Yuan, et al. Research on underground pipeline detection technology based on ARM and CMOS image processing [J]. Electronic Design Engineering, 2018, 26(9): 158 - 162. (in Chinese)
- 王柯, 汪贵华, 徐元, 等. 基于 ARM 和 CMOS 图像处理的地下管线检测技术研究[J]. 电子设计工程, 2018, 26(9): 158 - 162.
- [5] WANG Zhengzhou, XU Ruihua, HU Bingliang. Laser spot center detection based on improved circle fitting algorithm [J]. Laser & Infrared, 2013, 43(6): 708 - 711. (in Chinese)
- 王拯洲, 许瑞华, 胡炳樑. 基于改进圆拟合的非完整圆激光光斑中心检测算法[J]. 激光与红外, 2013, 43(6): 708 - 711.
- [6] CAO Yuanjia, WEI Guangjun, LI Xianlong. Image processing and improvement of edge detection of laser spot [J]. Laser & Infrared, 2016, 46(9): 1160 - 1164. (in Chinese)
- 曹远佳, 尉广军, 李先龙. 激光光斑的图像处理及边缘检测的改进[J]. 激光与红外, 2016, 46(9): 1160 - 1164.
- [7] ZHANG Bengniu, WAN Hongming, MAO Chenglin. Study on displacement sensor based on difference operation spot center location algorithm [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011, 24(2): 215 - 219. (in Chinese)
- 张奔牛, 万红明, 毛成林. 基于差分光斑中心定位算法的位移, 传感技术研究[J]. 传感技术学报, 2011, 24(2): 215 - 219.
- [8] LI Tie, FU Yuanyuan, ZHANG Chi. Research on grayscale face image matching algorithm based on invariant moment theory [J]. Computer Knowledge and Technology, 2018, 14(28): 189 - 190. (in Chinese)
- 李铁, 付媛媛, 张弛. 基于不变矩理论的灰度人脸图像匹配算法研究[J]. 电脑知识与技术, 2018, 14(28): 189 - 190.