

# 基于激光点云的高精度井盖提取和沉降病害检测方法研究

许梦兵<sup>1,2</sup>, 韩友美<sup>1\*</sup>, 王留召<sup>2</sup>, 张攀科<sup>2</sup>, 刘东明<sup>1</sup>, 杨敬华<sup>1</sup>

<sup>1</sup>江苏海洋大学海洋技术与测绘学院, 江苏 连云港 222000;

<sup>2</sup>北京四维远见信息技术有限公司, 北京 100070

**摘要** 针对传统的道路测量方法存在效率低、安全性差,且无法快速直接地获取井盖病害信息的问题,提出了一种结合三维激光点云的井盖病害检测方法。通过分析点云数据中路面井盖的空间分布特征和强度反射特性,首先设计了梯度和布料模拟滤波(CSF)组合算法提取地面点后生成强度图像,然后通过自适应阈值对强度图像进行二值化,在此基础上用限制参数的 Hough 圆检测方法定位井盖位置,实现了路面井盖的精准提取;最后通过计算井盖中心和邻域点云高差均值,实现了井盖的沉降病害检测。对北京三环道路的实地数据进行实验,结果显示,该方法能直接准确地获取路面井盖位置和病害等信息,井盖提取准确率达到 84%,精准率达到 98%。与传统测量方式相比,该方法可有效提高井盖提取效率和作业安全性,有助于后期公路路面井盖的检测和维护工作。

**关键词** 测量; 车载移动测量系统; 三维激光点云; 强度投影; 边缘曲率; 井盖病害; 自动提取

中图分类号 TP75

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1604001

## 1 引言

道路检测是现代测绘任务中一项极为关键的内容,路面井盖的安全性在城市发展中也起着重要的作用,及时准确的井盖病害检测可以节约维修成本、减少路面隐患,为行车安全提供保障<sup>[1]</sup>。而传统的井盖测绘方式主要采用人工测量,作业效率低,不利于数据的快速更新。因此,研究新的高效和自动化的井盖测量和病害检测方法是道路安全检测技术的发展趋势。

车载移动测量系统作为当今测绘界最为前沿的科技之一,具有主动、实时、测量精度高等特点,其高精度激光点云数据在欧美等发达国家的应急指挥、城市管理<sup>[2-4]</sup>等行业得到了广泛的应用。车载移动测量系统将传感器搭载在车辆上进行道路数据采集,因此,在获取路面井盖数据方面有其得天独厚的优势。目前,在井盖提取和病害检测方面的研究主

要包括微分极值法、基于椭圆特征的拟合算法和图像特征检测方法等。微分极值法<sup>[5-6]</sup>通过不断逼近点云邻域曲面的法矢量或者高阶导数不连续性确定井盖位置,该方法每次计算井盖区域的曲率就必须逼近一次,这就造成了巨大的计算量,从而导致效率低且微分对曲率变化不明显的平面有一定局限性。基于椭圆特征的拟合算法<sup>[7-9]</sup>主要依赖于车载移动测量系统获取的图像信息并结合井盖所具有的椭圆特性,将图像从空间域转换到参数域,用参数域中采样点峰值所对应的参数来表示图像中的曲线,只要已知曲线的方程形式,就可以进行一般的井盖检测。针对图像特征的检测方法<sup>[10]</sup>主要依据改装的车载移动测量系统获取的对地拍摄的井盖影像数据中所呈现的几何特征和空间位置等信息,结合相关检测算法提取井盖属性和语义信息。基于井盖图像的特征检测具有对噪声不敏感的优点,但需进行一到多运算,存在计算量较大的缺点,易受参数域量化精度

收稿日期: 2020-09-29; 修回日期: 2020-11-26; 录用日期: 2021-01-27

基金项目: 测绘工程国家一流专业建设项目(5509007202003)、江苏省六大人才高峰项目(KTHY-045)、城市空间信息工程北京市重点实验室基金(2018213)

通信作者: \*hanyoumei@126.com

的限制。除此之外,这些算法鲁棒性低,针对图像直接检测的方法受影像质量、光照、阴影等影响较大,难以获取井盖下沉、井盖凸起等病害信息。本文以 SSW 车载激光建模系统为例,研究将车载移动测量系统所获取的高精度激光点云数据应用于道路井盖病害检测的方法。

## 2 车载系统与井盖病害简介

### 2.1 SSW 车载激光建模系统

SSW 车载激光建模系统是我国自主研发的多传感器车载移动测量系统,其以各种工具车为载体,集成激光扫描仪、定位定姿系统(POS)、面阵相机、里程计(DMI)等多种传感器,由控制设备、数据采集单元和数据处理软件构成的快速数据获取及处理的高科技测量设备,其整个系统构成如图 1 所示。高精度的激光扫描仪能够瞬时获取被测地物的角度和距离信息<sup>[11]</sup>;全球导航卫星系统(GNSS)记录了系统的瞬时位置,惯性传感器(IMU)实时记录了系统的瞬时姿态;里程计保证设备在信号失锁的状态下保持较高的测量精度;全景影像采集设备由搭载的高分辨率相机及控制线等部件组成,能等时/等距获取全景数据。系统各个传感器通过机械结构集成,经过标定建立严格的几何关系,构建了各传感器局部坐标系和 WGS-84 坐标系之间的固定转换参数。通常,激光点云坐标系以沿路方向为 Y 轴(纵轴),以垂直于路方向为 X 轴(横轴),X 轴与 Y 轴所确定的坐标面称为 XOY 面,以垂直于 XOY 面向上表示 Z 轴(竖轴),三轴构成一个空间直角坐标系;系统以全球定位系统(GPS)时间为统一时间,实现了高精度时空同步,最终提供目标几何形状信息和数字影像信息。



图 1 SSW 车载激光建模系统整体构成

Fig. 1 Overall structure of SSW vehicle-borne laser modeling system

### 2.2 道路井盖病害类型

井盖作为城市地下管线布设和维护不可或缺的组成部分,对于道路路面系统的平稳安全运行极为重要。路面井盖病害主要是指对路面行车造成一定安全隐患的井盖沉降、凸起和道路不平整现象。由于当前城市交通网的迅猛发展,常用道路车流量较大,其中车辆长时间、高频率地对井盖进行碾压以及人为偷盗、损坏等原因,导致井盖周围的路面出现裂痕、凹凸变形<sup>[12]</sup>甚至井盖丢失的情况,对行车安全造成危害。常见的井盖病害问题主要有井盖下沉和井盖凸起。

#### 1) 井盖下沉

如图 2(a)所示,井盖下沉一方面是由于井圈与井座连接不稳固,结合部位的混凝土质量问题和井身砌体有通缝等,再加上雨水通过路面裂缝渗透作用,导致井底地基强度降低,车辆荷载的冲击力引发的井盖受迫振动也加剧了井盖相对于路面下沉<sup>[13]</sup>。

#### 2) 井盖凸起

如图 2(b)所示,井盖凸起一方面是由于井周路面未充分压实,压实度小于远离井口的路面压实度<sup>[14]</sup>,在行车荷载冲击作用下,井周路面下沉程度明显大于井盖而造成。除此之外,常年的气候温度差异也会导致井盖的相对凸起,造成路面不平整现象。

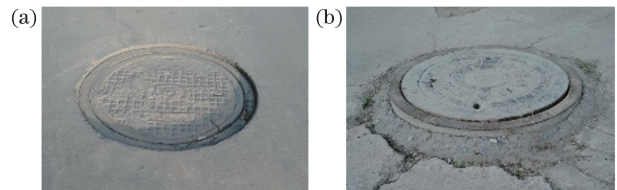


图 2 常见的井盖病害问题。(a)井盖下沉;(b)井盖凸起

Fig. 2 Common manhole cover disease problems.

(a) Manhole cover sinking; (b) manhole cover raised

## 3 井盖定位和病害检测方法

### 3.1 总体技术方案

基于路面井盖的位置和形状特性,依托 SSW 车载移动测量系统所获取的激光点云数据,井盖病害的检测主要分为路面井盖位置的自动定位提取和井盖病害类型的统计识别。结合道路激光点云测量运用于井盖病害检测的特点,设计了整体的处理方案。井盖形状特征明显,半径基本固定,其反射强度和周边路面不同,在点云中可以明显被识别<sup>[15]</sup>。首先,以激光点云为源数据,结合梯度和布料模拟滤波(CSF)算法进行地面滤波处理,以获取近地面点云

数据。基于地面点云的空间范围和反射强度设置网格,并依据灰度数值生成强度图像。随后借助图像特征识别方法,运用自适应阈值的强度图像二值化方法和 Hough 圆检测算法提取点云图像中的井盖,

并依据点云和生成图像的坐标转换关系,反算得出圆形井盖在点云中的三维坐标,进而实现定位和沉降计算,以获取井盖的病害信息。井盖快速识别定位和沉降病害检测技术路线如图 3 所示。

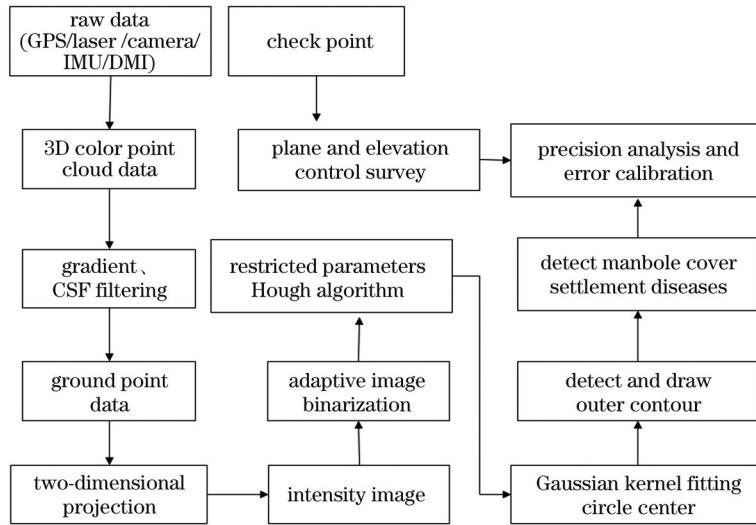


图 3 井盖快速识别定位和病害检测技术流程图

Fig. 3 Flow chart of rapid identification and location of manhole cover and disease detection technology

### 3.2 井盖的定位与病害检测

#### 3.2.1 地面点提取

车载移动测量系统原始数据解算出的彩色点云包含道路路面和各类地物信息,真实直观地展现了所测地物的原貌<sup>[16]</sup>。基于井盖位置的地面属性,为了排除无关地物对于井盖提取的影响,故需要先对非地面点进行剔除。

梯度算法<sup>[17]</sup>可以依据地形起伏表面相邻扫描点坐标之间的欧氏距离来计算倾斜度,通过所设置的合适的倾斜阈值可以有效地区分地面和非地面地物类型。如图 4 所示,假设现有原始数据点集中一点  $p(x_p, y_p, z_p)$ ,以  $p$  点为基准点建立空间球体圆域,并在其一定半径范围内寻找邻近点。以  $p$  点所搜索到的一个邻近点  $q(x_q, y_q, z_q)$  为例,梯度算法以  $Z$  坐标值作为标量, $p$  和  $q$  两点之间的倾斜度为

$$T_g = \tan \alpha_{p,q} = \frac{|Z_q - Z_p|}{\sqrt{(x_q - x_p)^2 + (y_q - y_p)^2}} \quad (1)$$

当所查询的点半径范围内存在多个邻近点时,统计计算各个邻近点的倾斜度均值并赋予给基准点,以此来判别点  $p$  是否属于地面点,即

$$T_{grad} = \frac{1}{N_{num}} \sum_{i=1}^{N_{num}} T_i, \quad (2)$$

式中: $T_{grad}$  为基准点的梯度值; $N_{num}$  为落在半径范

围内的邻近点总数; $T_i$  为基准点与各个邻近点的倾斜度。

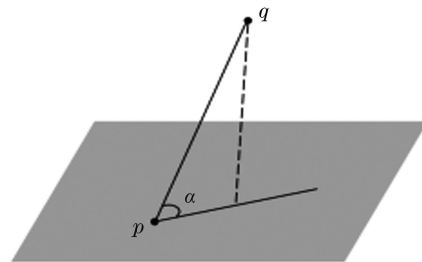


图 4 两点倾斜度示意图

Fig. 4 Schematic diagram of two-point tilt diagram

设置地面点最大梯度阈值为  $T_{max}$ ,将  $T_{grad}$  与阈值  $T_{max}$  进行比较;如果  $T_{grad}$  小于等于  $T_{max}$ ,表示  $p$  点与周围邻近点之间没有较大突变,将点  $p$  归为地面点集;反之,则认为  $p$  点周围梯度变化较大,作为非地面点进行剔除。算法通过连续迭代运算对地物点进行判别,直至遍历所有点云数据,并生成对应的地面点集。该方法较为实用,但是如果以  $Z$  值作为条件基准,会导致仍然有一部分的残余点云漂浮在地面之上。

如图 5 所示,CSF 算法<sup>[18]</sup>原理是将获取的激光点云进行翻转,随后用一种刚性布料覆盖倒置后的点云。通过分析布料节点和对应激光点之间的相互关系,确定布料节点的位置以生成近似的地表形状。



布料模拟粒子位置主要受外部和内部因素驱动,其算法的基本原理为

$$m \frac{\partial X(t)}{\partial t^2} = F_{\text{ext}}(X, t) + F_{\text{int}}(X, t), \quad (3)$$

式中:  $m$  为粒子质量;  $X$  为“布料”中的粒子在  $t$  时刻的位置;  $F_{\text{ext}}(X, t)$  为外部驱动因素(重力, 碰撞等);  $F_{\text{int}}(X, t)$  为内部驱动因素(粒子间的内部联系)。

外部因素的位移量计算公式可用于计算下一次迭代粒子所在新位置, 即

$$X(t + \Delta t) = 2X(t) - X(t - \Delta t) + \frac{G}{m} \Delta t^2, \quad (4)$$

式中:  $\Delta t$  为时间步长;  $G$  为一个常数。

内部因素的位移量计算公式为

$$\mathbf{d} = \frac{1}{2} b (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_0) \cdot \mathbf{n}, \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{d}$  为粒子的位移量; 当粒子可移动时,  $b=1$ , 不可移动时  $b=0$ ;  $\mathbf{p}_i$  为  $\mathbf{p}_0$  的相邻粒子;  $\mathbf{n}$  为把点进行标准化到垂直方向上的单位向量  $(0, 0, 1)^T$ 。

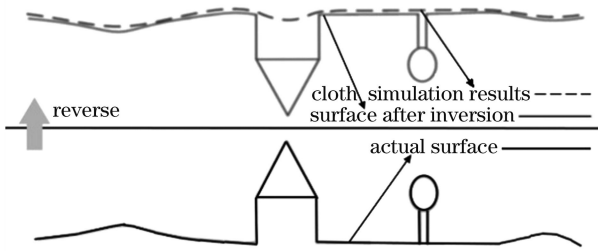


图 5 CSF 算法原理图

Fig. 5 Principle diagram of CSF algorithm

CSF 算法对近地面地物的根部去除效果并不理想, 但是可以滤除浮于地面之上的无规则点云, 处理结果精度较高。

依据以上两个滤波算法的特性, 本研究将梯度和 CSF 算法相结合。梯度算法可以获取精准的贴近地面的点云数据, 而 CSF 算法可以有效地剔除梯度滤波所遗留的空中残余点云的问题, 两者优势互补。本文先用梯度算法进行第一次过滤, 再使用 CSF 滤波方法进行第二次过滤, 处理结果中仅留下路面点云数据, 受到遮挡的位置显示空白。两者结合处理, 可有效提高地面点云滤波的效果。

### 3.2.2 地面点云生成强度图像

经过处理后的地面点云, 在无其他地物遮挡的情况下, 依据强度信息和点云数据生成强度图像, 其中的井盖可以较为明显地被区分出来。点云的强度图像基于测定目标点对激光的反射强度值, 首先获取地面区域的范围极值  $(X_{\min}, Y_{\min}, X_{\max}, Y_{\max})$ , 并

将整个区域向  $XOY$  平面作二维投影, 设置网格间距  $G_{\text{GSD}}$ , 则网格大小  $L \times W$  计算方法为

$$L = \frac{(X_{\max} - X_{\min})}{G_{\text{GSD}}}, \quad (6)$$

$$W = \frac{(Y_{\max} - Y_{\min})}{G_{\text{GSD}}}. \quad (7)$$

通常, 经过抽稀的点云之间的间距无法达到足够的精度, 因此为了生成更高分辨率的强度影像, 依据扫描线与扫描点之间的关系, 利用内插的方法进行加密。通过遍历二维网格的各个位置, 选择周围网格最邻近的点进行线性内插, 内插值计算取各个点的强度均值并赋予给中心点, 内插计算方法为

$$I_{\text{core}} = \frac{1}{G_{\text{num}}} \sum_{i=1}^{G_{\text{num}}} I_i, \quad (8)$$

式中:  $I_{\text{core}}$  为内插后中心点强度值;  $G_{\text{num}}$  为落在邻近网格的总点数;  $I_i$  为各个邻近点的强度值。

每个网格  $(m, n)$  的灰度属性  $G_{mn}$  由落在网格内激光点的强度值  $I_{mn}$  决定; 灰度图把白色和黑色之间按照对数关系分为 256 阶, 0 为黑色, 255 为白色, 获取地面点最小强度值  $I_{\min}$  和最大强度值  $I_{\max}$ , 强度与灰度之间的转换方法为

$$G_{mn} = \frac{256 \times (I_{mn} - I_{\min})}{I_{\max} - I_{\min}}. \quad (9)$$

随后统一归化生成强度图像。

### 3.2.3 强度图像二值化

依据井盖反射强度与周边地面在图像背景数值中的差异, 在此考虑先对图像进行二值化, 以强化路面井盖的边缘显示效果。强度图像存储信息的方式为二维矩阵, 矩阵中的各个数值即为对应点的像素值。目前, 基于阈值的二值化方法可以分为两类, 即全局阈值法和自适应阈值法<sup>[19]</sup>。全局阈值法对整个图像采用统一的阈值, 依据图像中每个像素值与阈值的比较结果将其分为目标或背景。自适应阈值二值化基于最小二乘原理, 在使用平均和高斯加权回归两种算法情况下, 通过计算每个像素周围像素块大小的加权均值并减去常量值得到自适应阈值。基于图像局部背景邻域灰度的变化特征, 利用各像元的  $n \times n$  邻域, 对像元的邻域灰度进行统计, 计算公式为

$$T = M + a \times S, \quad (10)$$

式中:  $T$  为考虑邻域的动态自适应二值化时的阈值;  $a$  为常数  $(0 < a < 1)$ , 取值大小与图像质量成反比;  $M$  为某一像元邻域内各像元的灰度均值;  $S$  为该邻域内像元灰度的标准差。

不同像元位置对应不同的阈值, 遍历整个图像

进行上述操作,假设图像灰度范围为  $[0, V-1]$ , 利用阈值  $T$  将图像像素按照灰度值分为两类,其中,  $C_0$  和  $C_1$  分别对应灰度值在  $[0, T-1]$  和  $[T, V-1]$  之间的像素,整个图像的灰度均值计算公式为

$$u = \omega_0 u_0 + \omega_1 u_1 \quad (11)$$

方差是灰度分布均匀性的一种度量,方差数值大小与阈值分离效果成正比,其计算公式为

$$\sigma^2 = \omega_0 (u_0 - u)^2 + \omega_1 (u_1 - u)^2 \quad (12)$$

式中:  $\sigma^2$  为方差;  $u$  为整个图像的中心灰度;  $\omega_0$  和

$\omega_1$  分别为  $C_0$  和  $C_1$  的概率;  $u_0$  和  $u_1$  分别为  $C_0$  目标中心灰度和  $C_1$  背景中心灰度。

当方差  $\sigma^2$  最大时,表明背景与前景分离效果最好,此时的阈值  $T$  为最佳阈值。自适应阈值二值化方法无需人为设定参数,当同一幅图像上的不同部分亮度不同时,此时的阈值根据图像上的每一个小区域自动计算与其对应的阈值,能在亮度不同的情况下得到更好的结果。如图 6 所示,选取典型的井盖灰度图像进行测试,发现基于自适应阈值所产生的二值化结果较为明显,边缘区域更为平滑,易于区分。

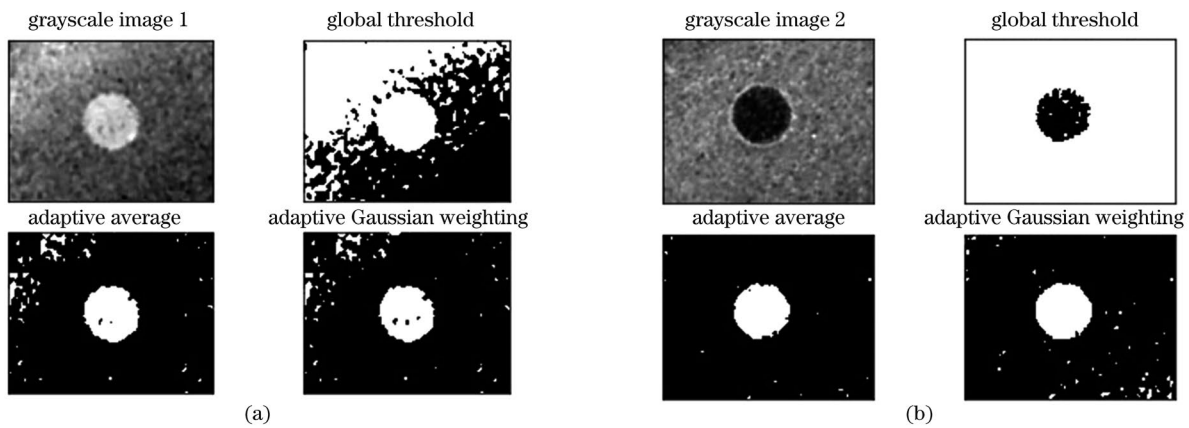


图 6 全局阈值和自适应阈值的图像二值化结果。(a)示例图像 1;(b)示例图像 2

Fig. 6 Image binarization results of global threshold and adaptive threshold. (a) Sample image 1; (b) sample image 2

### 3.2.4 路面井盖自动定位

基于图像二值化分割结果检测边缘,然后使用限制参数的 Hough 圆检测算法和外轮廓绘制方法来定位路面井盖位置。Hough 圆检测<sup>[20]</sup>是一种 Hough 圆变换,基本思路是认为图像上每一个非零像素点都

有可能是一个潜在的圆上的一点,与 Hough 线变换一样,也是通过投票生成累积坐标平面,设置一个累积权重来定圆,可达到亚像素级别的精度。针对强度图像呈现噪点多和 Hough 计算量大的问题,如图 7 所示,本文将井盖圆的定位分为潜在井盖对象检测和

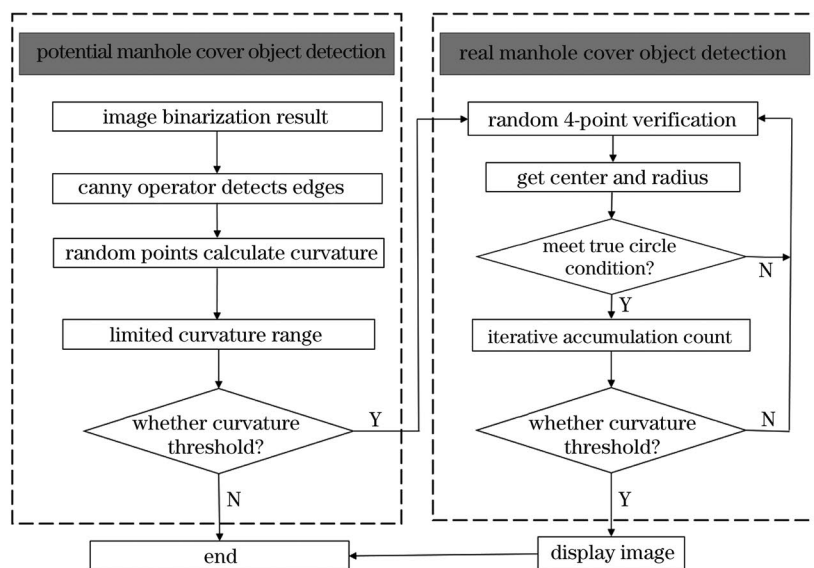


图 7 井盖精准提取框架图

Fig. 7 Frame diagram of precise extraction of manhole cover

真实井盖对象检测两个过程。其中,潜在井盖对象检测通过曲率参数快速排除无效井盖圆的干扰,并将满足阈值的井盖圆传递下去,为真实井盖对象检测提供重要的先决条件;而真实井盖检测在上一步的基础上,通过迭代累加的随机边缘点验证来判别潜在井盖对象的真实性,最终实现井盖位置的精准提取。

### 3.2.4.1 潜在井盖对象检测

井盖圆潜在对象的检测基于圆边缘曲率的一致

性原则,从边缘图像中随机选取若干点,利用微分进行数学推导,通过比较曲线在某一点的弯曲程度以排除非目标圆的干扰。首先,利用二值化图像使用 Canny 算子检测边缘<sup>[21]</sup>,获取高分辨率的井盖圆轮廓。如图 8(a)所示,可以看出一个真实的井盖轮廓周围存在较多噪声点,在 Hough 圆检测过程中造成无效的累加运算,极大影响了真实井盖圆检测的精度和效率。

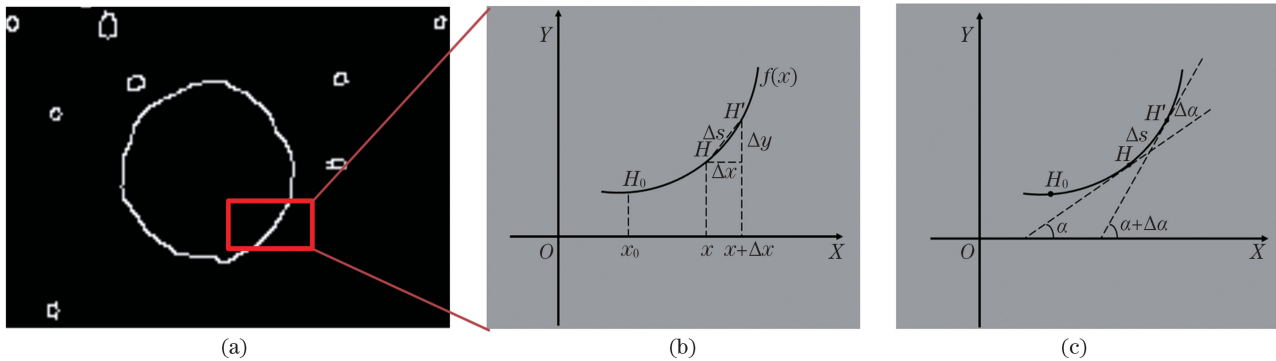


图 8 边缘曲率示意图。(a)井盖圆边缘轮廓;(b)弧微分;(c)曲率

Fig. 8 Schematic diagram of edge curvature. (a) Round edge contour of manhole cover; (b) arc differential; (c) curvature

如图 8(b)、(c)所示,以图 8(a)中井盖圆的部分曲线为例,在直角坐标系中, $H_0$ 、 $H$  和  $H'$  分别为井盖圆所构成的曲线  $y = f(x)$  上的边缘点,其中, $x$  和  $x + \Delta x$  为曲线上两个邻近的点,并设对应于  $x$  的增量为  $\Delta x$ ,对应于  $y$  的增量为  $\Delta y$ ,弧  $s$  的增量为  $\Delta s$ ,则曲线上点  $H$  的曲率可以由微积分推导出,即

$$\frac{\Delta s}{\Delta x} = \pm \sqrt{\left(\frac{\widehat{HH'}}{|HH'|}\right)^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)^2\right]}, \quad (13)$$

$$\frac{ds}{dx} = \sqrt{1 + y'^2}, \frac{ds}{dx} > 0, \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{|\widehat{HH'}|}{|HH'|} = 1, \quad (14)$$

式中: $\widehat{HH'}$  为  $H$  点和  $H'$  点之间的弧长; $HH'$  为  $H$  点和  $H'$  点之间的直线距离; $\frac{ds}{dx}$  为对应弧长的微分形式。

$$y' = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \tan \alpha, \quad -\frac{\pi}{2} < \alpha < \frac{\pi}{2}, \quad (15)$$

$$K = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta \alpha}{\Delta s} \right| = \left| \frac{d\alpha}{ds} \right| = \frac{|y''|}{(1 + y'^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (16)$$

式中: $\Delta s$  为从点  $H$  到点  $H'$  之间的弧长; $\alpha$  为点  $H$  处的切线方向角; $\Delta \alpha$  为切线的转角; $y''$  为曲线  $f(x)$  的二阶导数; $K$  为曲线在点  $H$  处的曲率。

$$K_{\text{cur}} = \frac{1}{R}, \quad R_{\min} \leq R \leq R_{\max}, \quad (17)$$

式中: $K_{\text{cur}}$  为预设的标准井盖的边缘曲率阈值; $R$  为标准井盖半径; $R_{\min}$  和  $R_{\max}$  分别为常规路面井盖的最小和最大半径。

如(17)式所示,对于一个标准的圆形来说,曲率与圆半径互为倒数,所以圆上任意一点的曲率都相等。在实际中,由于井盖尺寸大小基本固定,依据 3.2.2 节地面点云转换强度图像方程,根据真实井盖半径所生成的圆曲率在一定范围内趋于稳定数值,而非井盖圆的半径与所设置的阈值差异较大。因此,基于几何圆的曲率特性,本文在潜在井盖对象检测过程中预设一定的曲率阈值并选取随机边缘点进行迭代运算,当多个随机点的曲率满足预先限定的曲率范围时,可初步定位一个圆轮廓位置,本文将类似的圆统称为“可能圆”。通过对潜在的井盖和噪声点进行判断,非井盖圆在边缘曲率检测过程中被快速剔除,在此基础上,将该“可能圆”输入到真实井盖对象的检测过程中,有效提高了井盖圆检测的运算效率和提取的成功率。

### 3.2.4.2 真实井盖对象检测

真实井盖对象检测实质上是为了验证该“可能圆”是否为一个真正的圆。因为强度图像是数字图像,所以很少会出现一个井盖圆的所有边缘像素完全位于圆上的情况。因此,本文通过井盖圆周长和

边缘累积预设三个阈值,对“可能圆”的边缘像素进行统计并做出精准判断,用于最终确定井盖圆的位置。1)  $D_{4 \rightarrow 123}$  表示随机 4 个边缘点的比较阈值,用于判断该边缘点是否属于真实圆;2)  $T_{\min}$  表示最小累积阈值,与周长  $2\pi R$  结合使用,用于判断一个真圆边缘点的累积数量是否足够多;3)  $T_f$  表示最大容错次数,用于判断一个真圆边缘点检测的最高迭代数目。具体检验步骤如下。

① 将“可能圆”的所有边缘点存储到一个集合中,从中随机选取四个像素点进行计算并判断第四点与其余三个点构成的圆的差值是否处于  $D_{4 \rightarrow 123}$  阈值内,以此来检查该点是否位于一个真正的数字圆上,主要流程如下。

首先,从边缘集合中随机选择 4 个点  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ ,  $(x_3, y_3)$ ,  $(x_4, y_4)$ , 首先通过检查公式来确保它们不是共线的,即

$$(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1) = 0. \quad (18)$$

然后,找出穿过 3 个点的圆,并获取该圆的圆心坐标  $(a_{123}, b_{123})$  与半径  $R$ 。

$$a_{123} = \frac{\begin{vmatrix} x_2^2 + y_2^2 - (x_1^2 + y_1^2) & 2(y_2 - y_1) \\ x_3^2 + y_3^2 - (x_1^2 + y_1^2) & 2(y_3 - y_1) \end{vmatrix}}{4[(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)]}, \quad (19)$$

$$b_{123} = \frac{\begin{vmatrix} 2(x_2 - x_1) & x_2^2 + y_2^2 - (x_1^2 + y_1^2) \\ 2(x_3 - x_1) & x_3^2 + y_3^2 - (x_1^2 + y_1^2) \end{vmatrix}}{4[(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)]}, \quad (20)$$

$$R = \sqrt{(x_i - a_{123})^2 + (y_i - b_{123})^2}, \quad (21)$$

$$D_{4 \rightarrow 123} = (x_4 - a_{123})^2 + (y_4 - b_{123})^2 - R^2, \quad (22)$$

式中:  $(a_{123}, b_{123})$  为经过 3 个点的圆的中心。

获得中心后,通过(22)式判断第四个点是否满足圆方程,以验证该点是否在圆上。如果  $D_{4 \rightarrow 123}$  的值足够小,则表明第四个点位于圆的边界上。

② 如果存在真实的圆,则对边缘图像中位于该圆上的 4 个点的数量进行累加计数。

③ 如果不是真实的圆,则将这 4 个点返回到“可能圆”的集合中。

④ 迭代计算步骤①~③,不断累积符合条件的边缘点数,当一个“可能圆”边缘的累积点总数大于

$2\pi R \cdot T_{\min}$  或迭代次数大于  $T_f$ , 则检测结束。

基于曲率参数和边缘累积阈值等条件参数的限制可以大幅度的减小错检误差,提高定位精度。计算圆心的时候,考虑做一个二维的高斯核,以这个核为权重,对圆做加权求重心。这个核越是中心的位置,权重越高,这样计算出来的重心基本不会偏移。最终以检测出的井盖坐标为基准绘制外框和轮廓,并自动标记圆心位置,如图 9 所示。

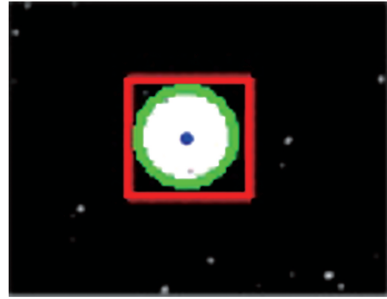


图 9 井盖提取和标记

Fig. 9 Manhole cover extraction and marking

### 3.2.5 计算井盖的沉降值

依据市政部门统计的城市井盖数据,最为常用的井盖尺寸一般在 600,700,800 mm 左右。因此,在对井盖周边选取高程数值时,既不能选取到井盖内部的点云,又要确保井盖附近的高程点足够贴近以提高沉降数值检测精度,所以选取合适的水平直线距离至关重要<sup>[22]</sup>。提取后的结果可直接得到井盖拟合中心的绝对坐标,在距离井盖中心  $X$  一定范围内的点云中选取高程值最大的  $N$  个点( $N$  介于 10~30)进行测试,且这些点距离井盖中心点的水平直线距离在 43~50 cm 之间,具有可靠的意义。设中心点  $X(x_0, y_0)$  和选取点  $B(x_1, y_1)$ , 则两者之间的距离为

$$|BX| = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}. \quad (23)$$

所取的高程点需要满足

$$43 \leq \forall (|BX|) \leq 50. \quad (24)$$

最后,取这  $N$  个点的高程值,计算各个高程值  $Z_i$  与中心  $X$  的高程值  $Z_0$  差的均值即为沉降值  $h$ , 公式为

$$h = \frac{\sum_{i=1}^N (Z_i - Z_0)}{N}. \quad (25)$$

## 4 区域实验

### 4.1 研究区概况

结合研究内容,本文所选研究区域主要位于北京市西三环北路辅路和北三环西路等路段,该道路



修建时间较早且车流来往密集,井盖老化较为严重,路面井盖的沉降病害也较为明显,公路养护部门维护难度大。经过技术论证后,较为适合利用车载移动测量系统生产获取道路点云数据,并用于井盖病害的自动提取和检测实验。

#### 4.2 激光点云数据获取与预处理

外业数据采集基于 SSW 车载移动测量系统进行,此系统可搭载多种不同型号的激光扫描仪和 POS 传感器。本文实验所采用的是 Riegl 激光扫描仪,如图 10 所示,具体参数指标如表 1 所示。在外业测量中,车辆行驶速度控制在  $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  左右,防止车速过快导致点云过于稀疏。期间完全按照实际情况采集点云数据,采集过程存在行人、车辆等因素的遮挡,通过实验来验证本文所提研究方案的实用性和可靠性。

表 1 Riegl 激光扫描仪技术指标

Table 1 Technical indicators of Riegl laser scanner

Laser scanner name	Riegl
Point frequency /kHz	1017
Line frequency /Hz	250
Distance /m	2~200 (reflectivity 80%)
Infinite echo	Yes
Relative measurement accuracy /cm	$\leq 1$
Field of view /( $^{\circ}$ )	360(no blind spots)
Divergence angle /marc	0.3(spot size)

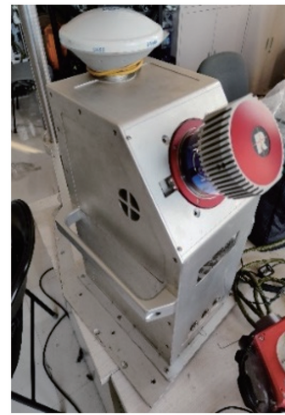


图 10 Riegl 激光扫描仪

Fig. 10 Riegl laser scanner

所获取的原始激光点云数据经过基础数据解译,再利用配套的 Inertial Explorer(IE)软件进行组合导航解算绝对位置姿态,得到的点云数据包括地物点三维坐标、扫描角度、回波反射强度和数据采集时间等属性信息<sup>[23]</sup>。为满足实验需求,借助 SSW 自主开发的后处理软件 SWDY,选取一段典型路线作为实验数据,如图 11(a)所示,道路长度约为 3.6 km,点密度达到  $1800 \text{ point}\cdot\text{m}^{-2}$ ,点云总数约 9 千万。

以点云对地物的反射强度为基准进行点云着色,强度范围 min-max 设置为  $-2000 \sim 9000$ ,图 11(b)为部分强度着色点云数据。点云数据是对外界地物最为真实直接的反映,从强度着色后的点云数据中可以看出,路面标线、车辆、建筑物、路灯杆和行道树等信息被清晰的记录下来。

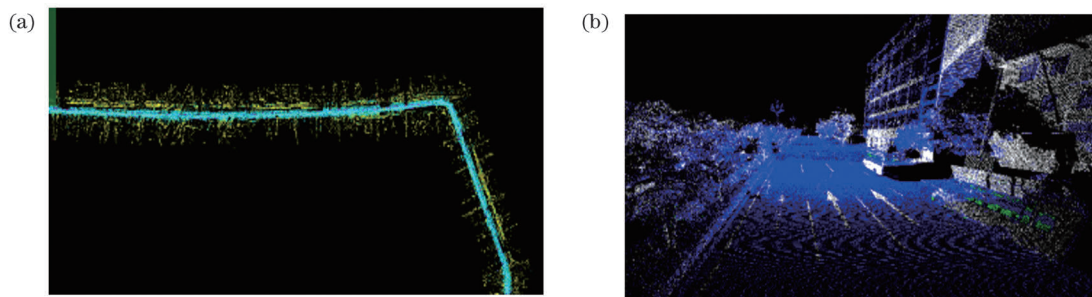


图 11 实验点云数据。(a)实验数据点云路线图;(b)路面点云强度着色图

Fig. 11 Experimental point cloud data. (a) Experimental data point cloud roadmap; (b) coloring map of pavement point cloud intensity

#### 4.3 井盖自动定位与病害检测

##### 4.3.1 井盖自动提取

实验点云数据依据 3.2.1 节内容进行梯度滤波时所设置的邻距搜索半径为 0.5 m,倾斜阈值为  $0 \sim 0.141$ ,该参数适用于一般的城市区域,且具有一定的稳定性。以下使用实测的点云数据进行组合地面

滤波测试,处理效果如图 12 所示。

如图 13(a)所示,选取实验数据中的一段道路作为样本进行展示,其中图 13(b)为强度着色后的地面点云。基于提取的地面点,采用 3.2.2 节内容进行强度投影,使用参数为:影像地面分辨率(GSD)设置为 0.02 m,距地高度 0.5 m,可产生灰度和附



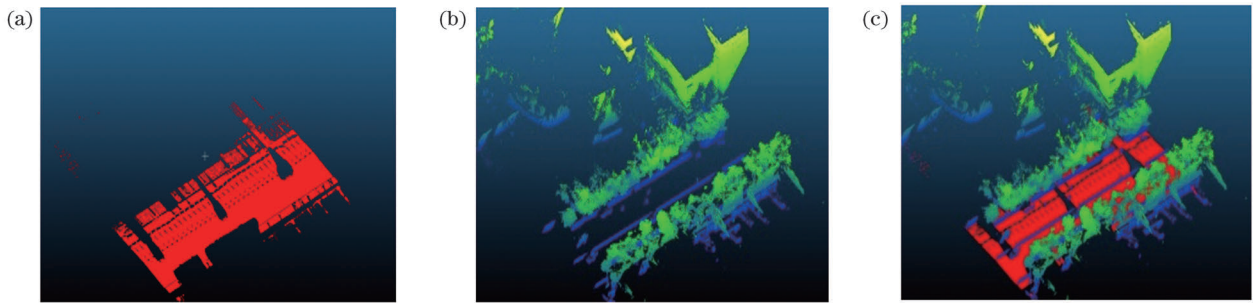


图 12 组合地面滤波。(a)地面点;(b)非地面点;(c)地面点和非地面点相结合

Fig. 12 Combined ground filtering. (a) Ground points; (b) non-ground points; (c) combination of ground points and non-ground points

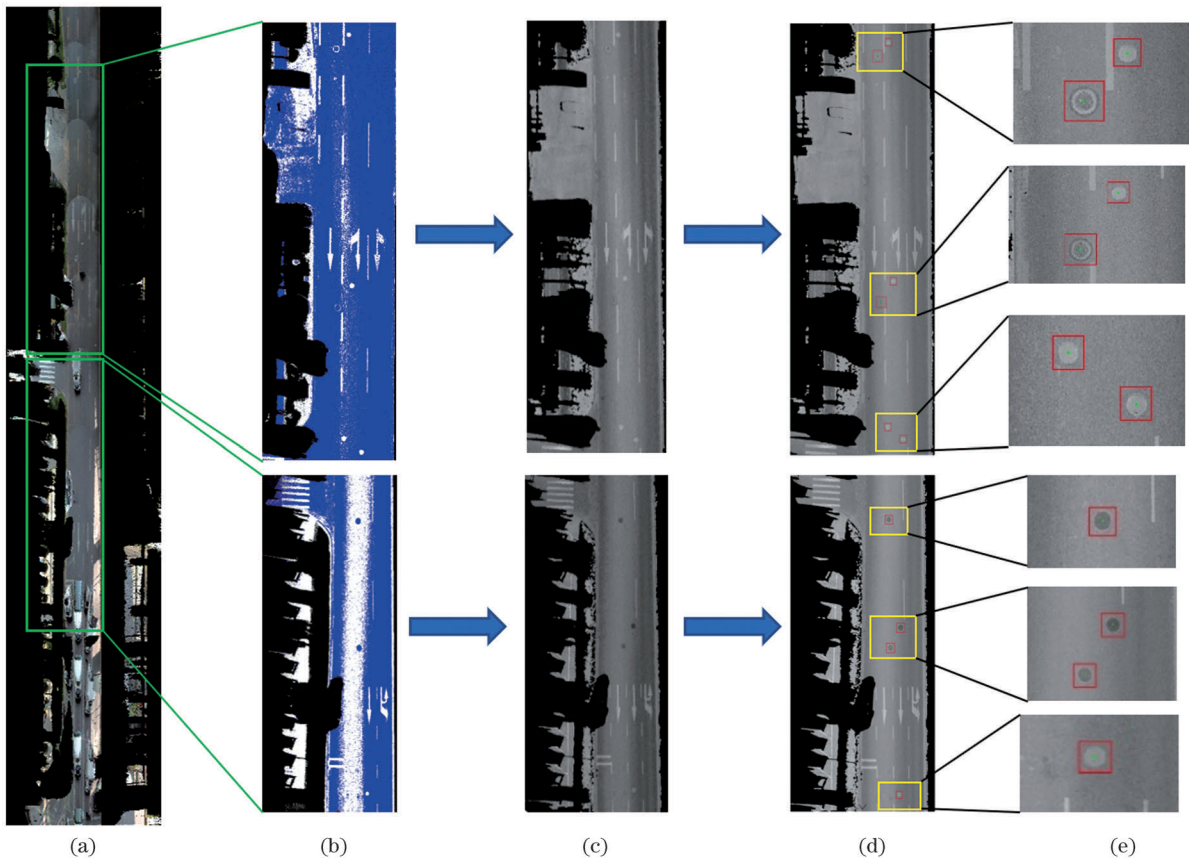


图 13 基于车载激光点云的城市井盖自动提取。(a)原始点云(实景渲染);(b)地面点(强度着色);(c)强度特征图像;(d)井盖提取结果;(e)局部放大图

Fig. 13 Automatic extraction of urban manhole covers based on vehicle-borne laser point cloud. (a) Original point cloud (real scene rendering); (b) ground points (intensity coloring); (c) intensity feature image; (d) manhole cover extraction result; (e) partial enlarged view

有 RGB 真色彩的两种 tif 格式的成果文件。本文以灰度影像作为实验对象,在利用 3.2.3 节的自适应阈值二值化的方法对强度图像处理后,采用 3.2.4 节的限制曲率参数和边缘累积阈值的 Hough 圆检测方法进行路面井盖的自动定位和提取,其中潜在井盖对象检测部分曲率参数设置为 0.04~0.08,随机边缘点数设置为 30,真实井盖对象检测部分参数

设置如下: $D_{4 \rightarrow 123}$  设为  $\pm 0.05$ ,  $T_{\min}$  设为 0.8,  $T_f$  设为 8000,以上参数的设置在保证圆检测精度的前提下,可有效提高井盖圆的搜索效率。井盖在被定位后使用外框进行标记,并标注圆心位置,井盖提取结果如图 13(d)、(e) 所示。

#### 4.3.2 井盖沉降病害检测

基于强度图像和点云之间的坐标转换关系,将

所获取的井盖位置反投影至点云中,如图 14 所示,为井盖提取的矢量化结果。采用 3.2.5 节的方法获取每个井盖的沉降和凸起病害数值,并将其作为井盖提取结果的固有属性保存到数据库中。基于

权属单位、所在路名和绝对坐标等信息进行编号存储,并附上高分辨率的全景照片,方便后期公路养护部门的查询与调用。

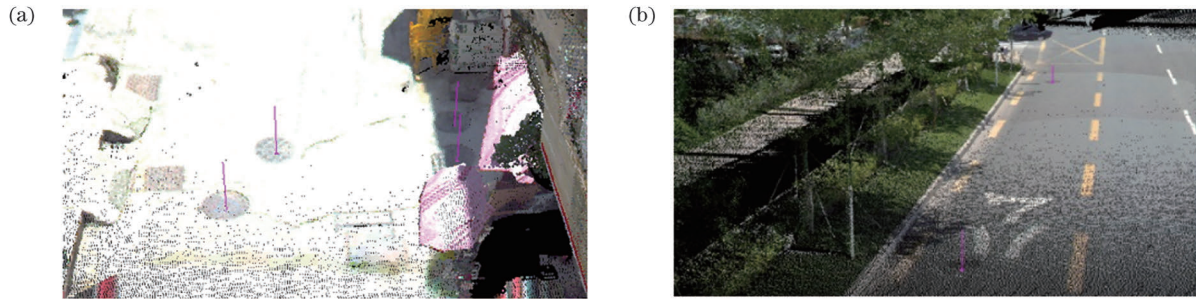


图 14 井盖提取结果。(a)井盖位置示意图 1;(b)井盖位置示意图 2

Fig. 14 Manhole cover extraction result. (a) Schematic diagram of manhole cover position 1; (b) schematic diagram of manhole cover position 2

#### 4.4 实验结果对比分析

##### 4.4.1 准确率和精确率

在自动提取结束后,使用人工交互的方式对井盖的提取结果进行精度分析。以准确率和精确率作为精度评价指标<sup>[24]</sup>,其中准确率和精确率计算公式分别为

$$A_{\text{acc}} = \frac{M_R}{M_R + M_E + M_D}, \quad (26)$$

$$P_{\text{pec}} = \frac{M_R}{M_R + M_E}, \quad (27)$$

式中: $A_{\text{acc}}$  为准确率; $P_{\text{pec}}$  为精确率; $M_R$  为正确提取井盖的个数; $M_E$  为错误提取井盖的个数; $M_D$  为未提取出的井盖个数。

根据统计结果,3.6 km 点云数据总共提取出的井盖总数量是 186,其中正确提取 157 个,遗漏个数为 26,错误提取 3 个。根据(26)式和(27)式得出,井盖提取的准确率为 84%,精确率为 98%,其中工作程序处理时间合计约为 20 min,路面井盖的获取效率得到显著提高。通过人工检查发现,遗漏的井盖大多数都是受到了遮挡导致圆形轮廓的不完整,或者其强度信息与路面相近难以区分。错误提取中有两个是路面自行车车轮标记,一个是形似井盖的路面凹坑的干扰,都具有一定的近圆特性。

##### 4.4.2 残差和中误差

对定位的井盖坐标值和沉降数值进行检验,用

高精度 GPS-RTK 获取坐标数值,将统一坐标系下的检测点坐标和获取的坐标数值进行比对,计算出中误差,判断是否满足具体的精度要求。详细步骤如下:

1)在测区范围内随机选取合适数量(设为  $n$ )的井盖作为检测点,并依次对其编号(设为  $i$ ,  $i \geq 1$ );

2)确认统一的坐标系统,在信号良好的区域使用高精度的 GPS-RTK 获取相对应的三维坐标;

3)基于检测点的分布情况,使用 DS3 水准仪进行高程测量;

4)SSW 点云数据设为  $P_{Si}$ ,检测点数据设为  $P_{Ji}$ ,对每一个检测到的井盖点计算残差值  $\epsilon$  为

$$\epsilon = P_{Si} - P_{Ji}. \quad (28)$$

计算出残差均值  $E$  和中误差  $\sigma$  分别为

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon, \quad (29)$$

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\epsilon - E)^2}. \quad (30)$$

如表 2 所示,选取 20 个井盖中心平面坐标,对比使用高精度 GPS-RTK 测量出对应井盖中心的平面坐标,做精度分析, $x$ 、 $y$  方向坐标残差如表 2 第 6、7 列所示。GPS-RTK 测量平面精度为  $\pm 1 \text{ cm} + 1 \text{ ppm}$ ,SSW 车载激光扫描系统的平面精度为  $\pm 5 \text{ cm}$ 。

表 2 井盖中心精度验证情况表  
Table 2 Accuracy verification of manhole cover center

Serial number	SSW X /m	SSW Y /m	GPS-RTK X /m	GPS-RTK Y /m	Residual $\Delta X$ /m	Residual $\Delta Y$ /m
01	6607.935	26010.356	6607.853	26010.283	0.082	0.073
02	7843.534	21684.368	7843.558	21684.317	-0.024	0.051
03	5235.368	15097.648	5235.467	15097.776	-0.099	-0.128
04	3337.800	15132.482	3337.707	15132.584	0.093	-0.102
05	8767.534	16897.534	8767.568	16897.480	-0.034	0.054
06	9583.426	13701.253	9583.410	13701.212	0.016	0.041
07	4547.686	14986.563	4547.782	14986.442	-0.096	0.121
08	7996.326	26050.105	7996.223	26050.014	0.103	0.091
09	6783.348	15401.867	6783.308	15401.805	0.040	0.062
10	3463.865	13386.324	3463.858	13386.289	0.007	0.035
11	2964.757	25975.712	2964.780	25975.746	-0.023	-0.034
12	6877.865	15386.546	6877.834	15386.593	0.031	-0.047
13	3524.698	14688.138	3524.651	14688.093	0.047	0.045
14	5675.861	14865.239	5675.772	14865.362	0.089	-0.123
15	6764.165	25463.843	6764.139	25463.839	0.026	0.004
16	2688.535	14334.829	2688.547	14334.802	-0.012	0.027
17	3354.879	15589.547	3354.787	15589.654	0.092	-0.107
18	5767.234	23371.976	5767.210	23371.934	0.024	0.042
19	8416.587	13692.572	8416.724	13692.455	-0.137	0.117
20	4740.108	13354.782	4740.077	13354.768	0.031	0.014

由表 2 可知,  $x$ 、 $y$  方向坐标残差在  $-0.137 \sim 0.121$  m 的范围内, 依据(30)式计算出  $\Delta X$  和  $\Delta Y$  残差中误差为  $\pm 0.068$  m 和  $\pm 0.077$  m。依据残差得到井盖点与检查点之间的间距范围在  $0.026 \sim 0.180$  m, 距离中误差为  $\pm 0.053$  m。井盖的平面坐标只是为了在需要对其进行维护时找到井盖的位置, 精度要求相对较低。井盖沉降检测方案的精度要求通常为平面精度  $\pm 0.3$  m, 经过比较得出, SSW 车载系统测量精度完全满足要求。

绝对位置的坐标需要检验, 沉降的数值也需要进行检验。使用水准仪获取高精度井盖高程, 与提

取出的井盖沉降值进行精度评价。如表 3 所示, 从实验区域中随机选择 35 个井盖并依据(25)式计算出相应的沉降值, 对比 DS3 水准仪测量结果, 做精度对比分析。DS3 水准仪的精度为 1 km 往返高差的平均值的中误差不超过  $\pm 0.003$  m, SSW 车载系统的点云相对精度为  $\pm 0.01$  m。

如表 3 所示, 依据(28)式~(30)式, 计算得出井盖沉降残差值在  $-0.021 \sim 0.016$  m, 沉降残差值中误差为  $\pm 0.0108$  m。通常, 井盖沉降检测项目的沉降精度要求为  $\pm 0.03$  m, 从以上实验数据的沉降检测结果可以看出, 车载激光点云测量的精度较高, 可



表 3 SSW 车载系统和 DS3 水准仪的井盖沉降值对比

Table 3 Comparison of manhole cover settlement values between SSW vehicle-borne system and DS3 level

Serial number	SSW /mm	DS3 /mm	Residual /mm
01	16	27	-11
02	21	15	6
03	9	30	-21
04	12	7	5
05	34	43	-9
06	11	29	-18
07	18	26	-8
08	23	38	-15
09	-10	-26	16
10	28	19	9
11	18	9	9
12	13	17	-4
13	28	33	-5
14	-7	-19	12
15	17	4	13
16	22	13	9
17	13	25	-12
18	9	15	-6
19	11	23	-12
20	5	21	-16
21	22	19	3
22	35	22	13
23	8	17	-9
24	43	38	5
25	-38	-27	-11
26	31	23	8
27	-46	-27	-19
28	10	16	-6
29	20	13	7
30	7	18	-11
31	-30	-17	-13
32	15	9	6
33	3	15	-12
34	17	8	9
35	9	13	-4

以满足常规的井盖病害检测项目要求。

#### 4.4.3 时间效率对比

针对同一测区使用 SSW 车载系统进行数据采集,外业人员 2 人,采集时间约为 9 h,内业数据备份、检查、解算点云需要 1 d 时间,集成化程序提取井盖、病害检测至提交成果耗时约 7 h。同等工作量下,传统的井盖测量方式外业小组采集至少需要 3 d,内业处理至少 2 d,且工作量繁琐,外业测量人

员安全性差。相比传统测量方式而言,基于车载激光点云的井盖提取效率至少提高了 2.5 倍,可直接输出井盖绝对坐标和沉降病害等成果数据,大幅度的减少了人员数量和工作量,作业安全性高。

## 5 结束语

针对传统道路井盖维护难度大、效率低等问题,直接利用 SSW 车载移动测量系统所获取的三维激光点云数据,首先,设计了梯度和 CSF 组合滤波算法提取出地面点后生成强度图像,结合自适应阈值二值化方法提取高区分度的井盖边缘轮廓,基于改进的限制曲率和边缘累积阈值的 Hough 圆检测算法实现井盖的快速定位和提取,以获取城市管理部门所需的井盖位置参数和病害信息。结合实地实验数据进行验证得出,本文方法井盖提取的准确率和精确率达到 84% 和 98%,与传统井盖检测方式相比,有效提高了井盖病害检测效率和人员作业安全性。最终通过同名检查点进行精度对比分析,结果显示,车载激光点云测量的作业精度较高,数据成果完全可以满足常规的井盖病害检测项目要求。本文方法为道路井盖的自动提取和病害检测提供了新思路,在城市智能化管理方面具有一定的实际应用意义。

本文研究也存在一些不足,尚且还不能对井盖不完整和井盖点云强度与周围路面阈值极其相近的情况进行识别,这也是目前正在努力解决的问题。针对井盖病害的检测方式,考虑结合深度学习的方法来更准确地获取路面病害的空间分布信息,也期望后期能为道路养护部门提供更为实用的基于车载激光点云测量的路面井盖病害检测手段。

## 参 考 文 献

- [1] Koch C, Georgieva K, Kasireddy V, et al. A review on computer vision based defect detection and condition assessment of concrete and asphalt civil infrastructure[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2015, 29(2): 196-210.
- [2] Long L J, Xia Y H, Huang D. Fast modeling method for substation based on 3D laser scanning point cloud data [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(20): 202801.  
龙丽娟, 夏永华, 黄德. 一种基于三维激光扫描点云数据的变电站快速建模方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(20): 202801.
- [3] Guan L, Ding Y J, Zhang H, et al. Key technologies research and application of 3D modeling for digital

- city construction [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2017(2): 90-94.
- 关丽, 丁燕杰, 张辉, 等. 面向数字城市建设的三维建模关键技术研究与应用[J]. *测绘通报*, 2017(2): 90-94.
- [4] Zou X L, Zhao G H, Li J, et al. Object based image analysis combining high spatial resolution imagery and laser point clouds for urban land cover [J]. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016, XLI-B3: 733-739.
- [5] Tang Y L. Classification and extraction of typical features based on vehicle-borne laser point cloud data [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015: 7-24.
- 唐云龙. 基于车载激光点云数据的典型地物分类与提取[D]. 北京: 北京工业大学, 2015: 7-24.
- [6] Jiang X L. Analysis and registration of on board lidar point cloud data [D]. Changchun: Jilin University, 2019: 27-35.
- 姜小磊. 车载激光雷达点云数据的分析与配准[D]. 长春: 吉林大学, 2019: 27-35.
- [7] Liu J H. Research on algorithm of automatically recognizing and positioning road manhole covers based on vehicle-borne sensors [J]. *Application Research of Computers*, 2011, 28(8): 3138-3140.
- 刘建华. 基于车载传感器的路面井盖自动定位识别算法研究[J]. *计算机应用研究*, 2011, 28(8): 3138-3140.
- [8] Yang B S, Fang L N, Li J. Semi-automated extraction and delineation of 3D roads of street scene from mobile laser scanning point clouds[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, 79: 80-93.
- [9] Xue T, Sun M, Zhang T, et al. Complete approach to automatic identification and sub-pixel center location for ellipse feature [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2008, 19(8): 1076-1078.
- 薛婷, 孙梅, 张涛, 等. 类椭圆特征自动识别及亚像素提取的完整实现[J]. *光电子 • 激光*, 2008, 19(8): 1076-1078.
- [10] Guo F, Pan Y X, Zou Y F, et al. Application study on vehicle-borne LiDAR system in disease detection of manhole cover [J]. *China Energy and Environmental Protection*, 2017, 39(4): 64-67, 73.
- 郭峰, 潘永祥, 邹友峰, 等. 车载 LiDAR 系统在井盖病害监测中的应用研究[J]. *能源与环保*, 2017, 39(4): 64-67, 73.
- [11] Huang M S, Guan Z H. A fast and high-precision pulse laser ranging method based on cursor principle [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0510001.
- 黄民双, 关在辉. 基于游标原理的快速高精度脉冲激光测距方法[J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0510001.
- [12] Yang M M, Wan Y C, Liu X L, et al. Rapid automatic location and extraction for manhole covers based on ground mobile mapping system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(8): 0804001.
- 杨蒙蒙, 万幼川, 刘先林, 等. 基于地面移动测量系统的井盖快速自动定位与提取方法的研究[J]. *中国激光*, 2018, 45(8): 0804001.
- [13] Dong P. Analysis on common quality problems and treatment countermeasures of municipal road inspection wells [J]. *Sichuan Building Materials*, 2019, 45(7): 150-151.
- 董鹏. 市政道路检查井井周沉陷质量通病及处理对策[J]. *四川建材*, 2019, 45(7): 150-151.
- [14] Gao Z Q. Subsidence problems and preventive measures of urban road inspection shaft [J]. *Shanxi Architecture*, 2017, 43(14): 145-146.
- 高志强. 城市道路检查井沉降问题及预防措施[J]. *山西建筑*, 2017, 43(14): 145-146.
- [15] Zu S, Hu P P, Pan Q. Extraction method of artificial landmark center based on lidar echo intensity [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(8): 0810001.
- 祖爽, 胡攀攀, 潘奇. 基于激光雷达回波强度的人工路标中心提取方法[J]. *中国激光*, 2020, 47(8): 0810001.
- [16] Liu R F, Tian M Y, Xu J Y. Expressway road surface point filtering for mobile laser scanning data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(6): 751-755.
- 刘如飞, 田茂义, 许君一. 车载激光扫描数据中高速公路路面点滤波[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2015, 40(6): 751-755.
- [17] Miao Q G, Guo X, Song J F, et al. LiDAR point cloud data with morphological filter algorithm based on region prediction [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(1): 011003.
- 苗启广, 郭雪, 宋建锋, 等. 基于区域预测的 LiDAR 点云数据形态学滤波算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(1): 011003.
- [18] Zhang W M, Qi J B, Wan P, et al. An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(6): 501.
- [19] Zhang J Y. Binarization method with local threshold based on image blocks [J]. *Journal of Computer Applications*, 2017, 37(3): 827-831.
- 张洁玉. 基于图像分块的局部阈值二值化方法[J]. *计算机应用*, 2017, 37(3): 827-831.
- [20] Tang Q B, Tang C, Zhang H H. An improved accurate circle detection method based on Hough

- transform [J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2017, 47(3): 58-61.
- 唐庆博, 唐超, 张恒浩. 一种改进的基于 Hough 变换的精确圆检测方法 [J]. *航空计算技术*, 2017, 47(3): 58-61.
- [21] Guo M, Hu L L, Zhao J T. Surface defect detection method of ceramic bowl based on Kirsch and Canny operator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(9): 0904001.
- 郭萌, 胡辽林, 赵江涛. 基于 Kirsch 和 Canny 算子的陶瓷碗表面缺陷检测方法 [J]. *光学学报*, 2016, 36(9): 0904001.
- [22] Meng Q. Research on the application of vehicle-borne laser scanning system in manhole covers detection [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2017: 42-46.
- 孟强. 车载激光扫描系统在井盖检测中的应用研究 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2017: 42-46.
- [23] Yang M M, Wan Y C, Xu J Z. Research of error analysis and positioning accuracy with four-prism of laser scanning [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(9): 0914001.
- 杨蒙蒙, 万幼川, 徐景中. 激光扫描仪四棱塔镜误差分析及定位精度研究 [J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0914001.
- [24] Huang G, Liu X L. Research on automatic extraction and classification of road markings based on deep learning [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(8): 0804002.
- 黄刚, 刘先林. 基于深度学习的道路标线自动提取与分类方法 [J]. *中国激光*, 2019, 46(8): 0804002.

## Research on High-precision Manhole Cover Extraction and Settlement Disease Detection Method Based on Laser Point Cloud

Xu Mengbing<sup>1,2</sup>, Han Youmei<sup>1\*</sup>, Wang Liuzhao<sup>2</sup>, Zhang Panke<sup>2</sup>, Liu Dongming<sup>1</sup>,  
Yang Jinghua<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Ocean Technology and Surveying and Mapping, Jiangsu Ocean University, Lianyungang, Jiangsu 222000, China;

<sup>2</sup> Beijing Geo-Vision Tech. Co., Ltd., Beijing 100070, China

### Abstract

**Objective** The safety of pavement manhole covers is crucial in urban development. The timely and accurate detection of manhole cover disease can save maintenance costs, reduce road hazards, and ensure driving safety. Traditional methods for surveying and mapping manhole covers mainly use manual measurements, which usually require considerable human and material resources. Moreover, such measurements have a low operating efficiency and poor safety, which is not conducive for the rapid update of data. Therefore, new, efficient, and automated methods and techniques are urgently required for the manhole cover measurement and disease detection. Currently, methods for manhole cover extraction and disease detection mainly include the differential polar method, ellipse feature-based fitting algorithm, and image feature detection method. These methods exhibit low robustness. Moreover, the direct image detection methods are affected by the image quality and illumination. It is difficult to obtain information about manhole cover diseases using such methods. This study develops a technical process involving the original point cloud and the manhole cover extraction and disease detection using vehicle-borne laser point cloud data. Based on the intensity image combined with the improved Hough algorithm for achieving the accurate road manhole cover position and disease information, the experimental results show a good robustness and stability of the proposed method. We hope that the proposed technical solution can help the city management department in inspecting and maintaining manhole covers to effectively improve the extraction efficiency and operation safety of manhole covers.

**Methods** First, based on the high-precision vehicle-borne laser point cloud data, accurate ground point cloud data were obtained using a combined filtering algorithm of the point cloud gradient and cloth simulation. They eliminate the influence of invalid features on the manhole cover extraction. Second, the intensity orthographic method was used to generate high-resolution intensity images of the ground points. Moreover, the manhole cover was binarized using the adaptive threshold method to increase the edge display effect of the road manhole cover. Then, according to the shape and position characteristics of the manhole cover circle, the edge was detected based on the image



binarization segmentation result. Further, the location of the manhole cover circle was divided into potential manhole cover object detection and a real manhole cover using the Hough circle detection algorithm, which strictly limits the curvature and edge accumulation threshold. Finally, using the two processes of object detection, the precise extraction of the manhole cover position was achieved. Next, the disease information of the manhole cover was obtained by calculating the elevation value of the adjacent point cloud within a certain distance between the manhole cover position and the surrounding area. Finally, a high-precision GPS-RTK and DS3 level comparison experiment was performed to evaluate the stability and reliability of the proposed algorithm.

**Results and Discussions** Regarding the road surface properties of the manhole cover position, this study first proposes the combined filtering method of the point cloud gradient and cloth simulation. The latter performs secondary filtering to retain and optimize the ground point results of gradient filtering for invalid floating data elimination. Several data tests were used to obtain the accurate ground point cloud results (Fig. 12). Because the intensity image contains considerable noise and requires a large number of Hough calculations, the accurate position of the manhole cover circle is obtained by detecting the edge contour (Fig. 13) and setting the appropriate curvature and edge accumulation threshold in the improved Hough circle detection algorithm. Combined with the actual vehicle-borne laser point cloud experimental study, the accuracy and precision of manhole cover extraction reach 84% and 98%, respectively. Additionally, the manhole cover extraction efficiency is significantly improved and the vectorization result of the manhole cover extraction can be displayed in the real point cloud coordinates (Fig. 14). Furthermore, the accuracy experimental results show the robustness and reliability of the manhole cover extraction plane position (Table 2) and settlement disease detection results (Table 3).

**Conclusions** In this study, in view of the difficulty and low efficiency of traditional road manhole cover measurements, the vehicle-borne laser point cloud data are directly used to achieve the precise manhole cover position and disease detection. First, a combined filtering algorithm of the point cloud gradient and cloth simulation is proposed to obtain the high-precision ground point data and generate intensity images. Then, this technique was combined with the adaptive threshold binarization method to obtain the high-discrimination manhole cover edge contour using the improved Hough circle detection algorithm. The manhole cover is approximately positioned within the circle curvature limit, and the accurate position is achieved using the edge accumulation threshold based on the previous step. Finally, the position parameters and disease information of the manhole cover are obtained. Combined with field experiment data verification, the accuracy and precision rate of manhole cover extraction of the proposed method reach 84% and 98%, respectively, greatly improving the manhole cover disease detection efficiency and operation safety compared with traditional methods. Combined with the precision analysis of the same name detection points, the manhole cover extraction results of the proposed scheme show high accuracy and the data results can meet the requirements of related projects. The technical scheme and experimental results of this research show the effectiveness and reliability of the vehicle-borne laser point cloud used in manhole cover extraction and disease detection and provide new ideas for urban intelligent management.

**Key words** measurement; vehicle-borne mobile measurement system; three-dimensional laser point cloud; intensity projection; edge curvature; manhole cover disease; automatic extraction

**OCIS codes** 100.4994 280.3420 280.4750