

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209963

基于改进 RANSAC 特征提取的掘进装备 视觉定位方法研究*

张旭辉^{1,2}, 杨红强¹, 白琳娜¹, 张超¹, 杨文娟^{1,2}

(1. 西安科技大学机械工程学院 西安 710054; 2. 陕西省矿山机电装备智能监测重点实验室 西安 710054)

摘要:为解决煤矿井下低照度、高粉尘、多杂光环境中掘进装备位姿测量不易的问题,提出了一种基于改进随机抽样一致性(RANSAC)特征提取的掘进装备视觉定位方法。首先,对矿用防爆相机采集的三激光标靶图像进行预处理,分别建立形状模型与线框模型;其次,根据形状模型以坐标极值为椭圆模型初始点,将前后两次内点差值比值作为最优迭代次数,迭代求取椭圆模型最优参数获得点特征;然后,根据线框模型以像素坐标模为直线模型初始点,利用自适应条件阈值、抽样次数获得线特征;最后,将点线特征作为三点三线位姿解算模型输入,通过空间坐标变换求得掘进装备位姿信息。实验结果表明,在掘进装备距三激光标靶 80 m 范围内,所述视觉定位方法的相对误差为 ± 45 mm,可基本满足煤矿井下掘进装备定位需求,为煤矿井下恶劣环境中掘进装备的位姿测量提供一种新的思路。

关键词:点线特征;形状模型;线框模型;改进 RANSAC;视觉定位

中图分类号: TH39 TN98 TD421 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 440.6010

Research on the visual positioning method of tunneling equipment based on the improved RANSAC feature extraction

Zhang Xuhui^{1,2}, Yang Hongqiang¹, Bai Linna¹, Zhang Chao¹, Yang Wenjuan^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Mine Electromechanical Equipment Intelligent Monitoring, Xi'an 710054, China)

Abstract: To solve the problems of difficult pose measurement of tunneling equipment in low illumination, high dust and multi-light environment in coal mine, a visual positioning method of tunneling equipment based on the improved RANSAC feature extraction is proposed. Firstly, the three laser target images collected by the mine explosion-proof camera are preprocessed, and the shape and wire frame models are established respectively. Then, according to the shape model, the coordinate extremum is taken as the initial point of the elliptic model. The ratio of the difference between the previous and the latter two internal points is the optimal number of iterations, and the optimal parameters of the elliptic model are iteratively obtained to extract the point feature. According to the wireframe model, the pixel coordinate model is used as the initial point of the straight line model, and the line features are obtained by using the adaptive condition threshold and the sampling times. Finally, the point line feature is used as the input of the 3P3L pose solution model, and the pose information of the tunneling equipment is obtained by spatial coordinate transformation. Experimental results show that the relative error of the visual positioning method described in this article is ± 45 mm within the range of 80 m from the three laser target, which can basically meet the positioning requirements of the coal mine tunneling equipment. It provides a new idea for the pose measurement of the tunneling equipment in the harsh environment of the coal mine.

Keywords: point and line features; shape models; wireframe models; improved RANSAC; visual positioning

0 引言

随着煤矿智能化发展,煤矿巷道掘进装备的定向导航和定形截割、位姿感知与协同控制、设备群远程测控^[1]以及煤矿井下巷道长距离定位技术已经成为煤矿智能化实现的关键^[2-3]。目前,常用的掘进装备位姿测量方法主要包括扇面激光定位技术^[4]、室内 GPS (indoor GPS, iGPS) 定位技术^[5]、全站仪定位技术^[6]、超宽带 (ultra wide band, UWB) 定位技术^[7]、惯性导航定位技术^[8]以及视觉定位技术等^[9]。扇面激光定位技术和 iGPS 定位技术自主性良好,但应用精度难以保障。全站仪定位技术和 UWB 定位技术应用精度较高,但系统安装、标定以及建站等工作,使其应用难度大,难以在复杂的煤矿井下环境中应用。惯性导航定位技术定位精度高、自主性强,但测量误差会随时间而增大,致使掘进装备无法长时间获取稳定的位姿^[10-11]。视觉定位技术利用视觉传感器感知环境特征,具有环境适应性好,测量精度高等优势,在煤矿井下经常以点、线为特征,利用相机采集图像,根据视觉定位模型,经坐标转换,获取掘进装备机身在巷道坐标系下的位姿,但受煤矿井下环境的影响,导致特征提取不稳定,测量结果误差大^[12-13]。因此,在杂光、粉尘以及水雾等复杂背景的煤矿井下环境中,研究可靠且稳定的特征提取方法是利用视觉技术测量掘进装备位姿的关键^[14]。

针对图像特征提取问题,国内外众多专家、学者进行了卓有成效的研究。杨文娟等^[15]提出基于颜色分量的峰值聚类约束的激光束标靶图像分割方法,利用 Hessian 矩阵求解激光束粗略中心线像素点的法线方向,结合泰勒展开式实现三激光束中心线的亚像素级特征提取。吴泽楷等^[16]基于改进圆拟合算法,并结合阈值法和中值法,提高了光斑中心位置的精确度。张绍堂等^[17]设计了一种高精度的激光图像光斑中心检测方法,引入了空间域滤波算法进行激光图像去噪和优化,并对激光光斑进行校正处理,检测激光图像光斑中心。Almazan 等^[18]使用 Hough 变换找到图像中的直线,并对直线上的像素点建立马尔科夫链来确定直线端点,得到了较好的检测效果。Gioi 等^[19]提出了一种自下而上的直线检测方法 (line segment detector, LSD),该方法能够在线性时间内得到较为准确和完整的直线结构,不需要调节参数就能适应多种场景,并且能够自行控制误检数量。刘丽霞等^[20]提出了一种自适应参数的 Canny 算子检测边缘,并用梯度法来获取直线,该算法能检测出平均长度更长的直线。戴激光等^[21]针对检测中直线断裂的情况,提出了一种边缘跟踪的直线拟合方法,该算法检测到的直线虽然更加完整,但是耗时较多。Salaun 等^[22]提出了一种基于多尺度思想的直线检测算法,该算法将图像做了不同强度的高斯滤波,从

而对每个强度下的滤波图像都用了 LSD 算法来检测直线,该算法对于高分辨率图像的直线检测有较好的效果。目前,特征提取的算法较多,但可在高粉尘、低照度、多杂光的煤矿井下环境进行应用的方法研究较少。

综上所述,本文研究了一种基于改进随机抽样一致性 (random sample consensus, RANSAC) 特征提取的掘进装备视觉定位方法,以激光指向仪的光斑和光束为特征,结合改进 RANSAC 方法,实现复杂背景下的点、线特征提取,再经视觉位姿解算模型及空间坐标转换,求得巷道坐标系下掘进装备位姿,实现煤矿井下掘进装备的定位。

1 掘进装备位姿视觉测量系统

1.1 系统构成

掘进装备位姿视觉测量系统如图 1 所示,由三激光标靶、防爆相机和防爆计算机组成。其中,三激光标靶利用安装架悬挂于巷道顶板上方,防爆相机固定在掘进装备机身上,防爆计算机安装于矿用隔爆兼本安型控制箱内。通过千兆网 GigE 接口采集图像,利用数字图像处理技术,实现特征提取,结合掘进装备位姿解算模型实现掘进装备位姿测量。

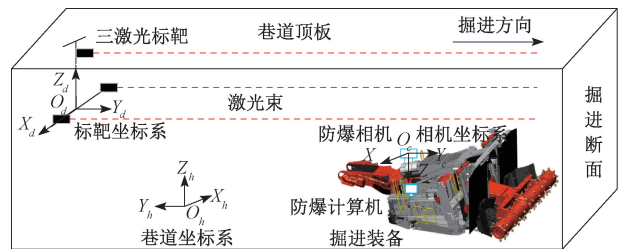


图 1 掘进装备位姿视觉测量系统示意图

Fig. 1 Diagram of the visual measurement system for the position and orientation of the tunneling equipment

图 1 中工业防爆相机坐标系 $O_c - X_c Y_c Z_c$ 建立在相机光心中心,三激光标靶坐标系 $O_d - X_d Y_d Z_d$ 建立在两水平激光光的中心位置。当系统运行时,防爆相机采集三激光标靶图像并将其传输至防爆计算机,防爆计算机完成对三激光标靶图像的预处理操作,并通过点、线特征提取、机身位姿解算以及空间坐标系转换,得到巷道坐标系 $O_h - X_h Y_h Z_h$ 下的掘进装备位姿信息。

1.2 掘进装备位姿视觉测量方案

掘进装备位姿视觉测量方案如图 2 所示,首先,将矿用防爆相机采集到的三激光标靶图像作为输入,经畸变校正和高斯滤波等操作对图像进行预处理,并分别对预处理图像建立形状模型与线框模型,再利用改进的 RANSAC 算法实现三激光标靶点、线特征拟合。然后,将三激光点特征中心坐标和直线特征的斜率和截距作为位

姿解算模型的输入,获取到标靶坐标系下防爆相机的位姿。最后,经空间坐标转换与数据滤波,得到巷道坐标系下掘进装备的位姿。

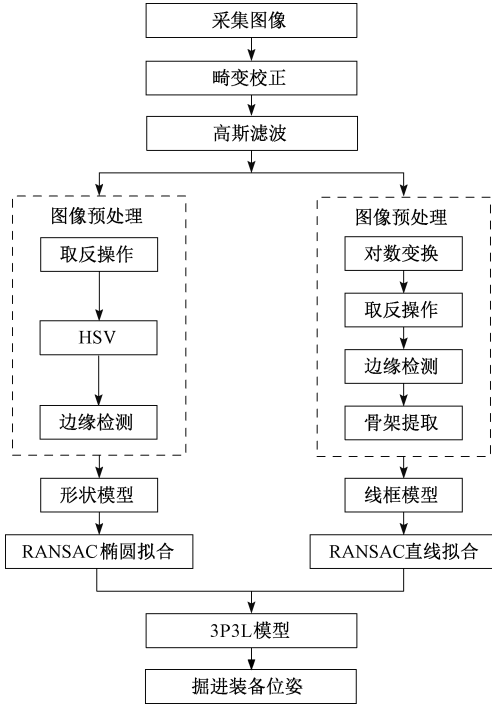


图2 掘进装备位姿视觉测量方案

Fig. 2 The vision measurement scheme of the fuselage of the excavation equipment

1.3 掘进装备位姿解算模型

通过3个激光点及3条激光束,构建基于三点三线(three points and three lines, 3P3L)的掘进装备位姿视觉测量模型,如图3所示。

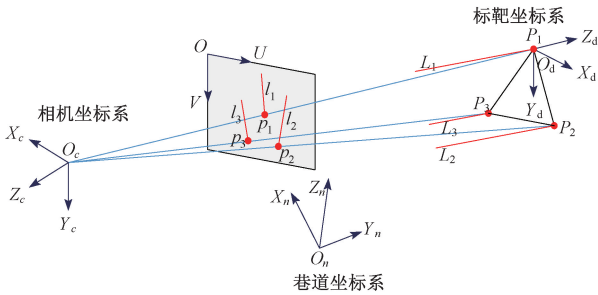


图3 掘进装备位姿3P3L解算模型

Fig. 3 3P3L solution model of the fuselage pose of the tunneling equipment

在相机坐标系下,激光光斑中心点 $P_i = (1, 2, 3)$ 在图像上的投影坐标为 $p_i(x_i, y_i, f)$, 在三激光标靶坐标系

下,激光束直线特征 L_i 的单位向量为 $\vec{L}_i^w = [X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}]^T$, L_i 上的任意点为 $\mathbf{P}_i^w = [X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}]^T$. 设图像中的线特征方程为 $a_i x + b_i y + c_i = 0$, 直线上存在点 $t_i(x_i, y_i, f)$ 和图像直线方向向量 $\vec{v}_i = (-b_i, a_i, 0)$, 使得形成平面 S_i , 并且得到 S_i 平面法向量 \vec{n}_i^w :

$$\vec{n}_i^w = \vec{o}t_i \times \vec{v}_i = (-a_i f, b_i f, a_i x_i - b_i y_i) \quad (1)$$

则从相机坐标系到标靶坐标系的旋转矩阵为 \mathbf{R} 和平移矩阵为 \mathbf{T} , 则有:

$$\vec{n}_i^w (\mathbf{R} \mathbf{P}_i^w + \mathbf{T}) = 0 \quad (2)$$

$$\vec{n}_i^w \mathbf{R} \vec{L}_i^w = 0 \quad (3)$$

连接激光点 P_1, P_2 和 P_3 分别形成 L_{12}, L_{23} 和 L_{13} 三条直线, 其在图像中的投影为 $l_{12}(x_1 - x_2, y_1 - y_2, f)$, $l_{23}(x_2 - x_3, y_2 - y_3, f)$ 和 $l_{13}(x_1 - x_3, y_1 - y_3, f)$, 在标靶坐标系下, L_{ij}^w 方向向量为 $\vec{L}_{ij}^w = (X_{i23}, Y_{i23}, Z_{i23}) (i, j = 1, 2, 3)$, L_{ij} 上任意一点坐标为 $\mathbf{P}_{ij}^w = [X_{wij}, Y_{wij}, Z_{wij}]$. 设图像直线方程为 $a_{ij} x + b_{ij} y + c_{ij} = 0$, 直线上存在一点 $t_{ij}(x_{ij}, y_{ij}, f)$ 和方向向量 $\vec{v}_{ij} = (-b_{ij}, a_{ij}, 0)$, 其构成投影平面 S_{ij} , 其法向量为 \vec{n}_{ij}^w :

$$\vec{n}_{ij}^w = \vec{o}t_{ij} \times \vec{v}_{ij} = (-a_{ij} f, b_{ij} f, a_{ij} x_{ij} - b_{ij} y_{ij}) \quad (4)$$

根据集合约束条件则有:

$$\vec{n}_{ij}^w (\mathbf{R} \mathbf{P}_{ij}^w + \mathbf{T}) = 0 \quad (5)$$

$$\vec{n}_{ij}^w \mathbf{R} \vec{L}_{ij}^w = 0 \quad (6)$$

旋转矩阵 \mathbf{R} 的四元数的参数为 q_0, q_1, q_2, q_3 , 利用 LM 算法获取全局最优解, 得到相机坐标系下激光标靶坐标系的旋转矩阵 \mathbf{R} 与平移矩阵 \mathbf{T} , 建立最小化重投影误差目标函数将激光束上任意一点的空间三维坐标转化为图像投影像素点坐标, 结合全站仪标定获得的标靶坐标系与巷道坐标系的相对位姿转换关系, 得到掘进装备在巷道坐标系下的位姿信息。

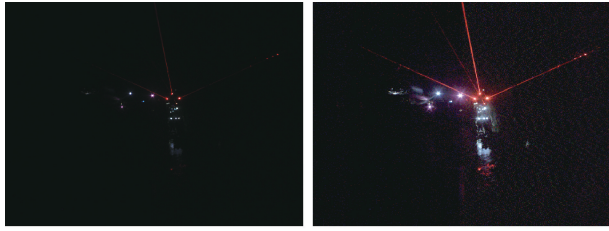
2 煤矿井下三激光标靶图像预处理

2.1 对数变换

为了提高特征提取的鲁棒性, 利用对数变换将图像的低灰度值区域进行扩展, 突显出图像低灰度部分更多的细节, 将高灰度值区域压缩, 减少高灰度值区域的细节, 使得特征图像边缘特征更加明显, 便于特征轮廓提取。其具体操作可表示为:

$$K(m, n) = L(m_u, c \times \log(1 + m_u)) \quad (7)$$

式中: c 为常数; (m_u, n_u) 为 (m, n) 处的灰度值。对数变换前后对比效果如图4所示。由图4可以看出, 三激光标靶图像经对数变换后激光点和激光束细节信息更加突出, 便于后续处理。



(a) 对数变换前图像
(b) 对数变换后图像
(a) Image before logarithmic transformation
(b) Image after logarithmic transformation

图 4 对数变换前后效果对比

Fig. 4 Comparison of the effect before and after logarithmic transformation

2.2 取反操作

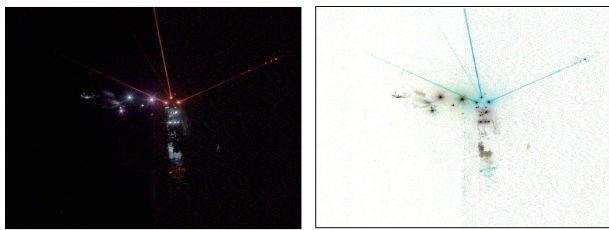
由于煤矿井下受光照、粉尘等原因的影响,所以采集到的图像大部分背景区域为黑色,而特征为其他颜色,且黑色占比大于特征颜色,故对 $K(m,n)$ 中的每个像素点的 B、G、R 像素值进行取反操作突显特征信息得到取反图像 $O(m,n)$ 。每个像素点取反可表示为:

$$\begin{aligned} K_B(m,n) &= 255 - value_B \\ K_G(m,n) &= 255 - value_G \\ K_R(m,n) &= 255 - value_R \end{aligned} \quad (8)$$

取反图像可表示为:

$$O(m,n) = K_B(m,n) + K_G(m,n) + K_R(m,n) \quad (9)$$

其中, $value_B$ 、 $value_G$ 、 $value_R$ 分别代表 $K_B(m,n)$ 、 $K_G(m,n)$ 、 $K_R(m,n)$ 通道像素值。取反前后对比效果如图 5 所示。



(a) 取反前图像
(b) 取反后图像
(a) Image before negation
(b) Inverted image

图 5 取反前后效果对比

Fig. 5 Comparison of before and after inversion

对比图 5(a) 和 (b) 可知,图像经取反后黑色背景变为白色,红色激光特征变为天蓝色,且周围白色灯光取反后变为黑色,突出了主要特征信息。

2.3 边缘检测

图像中以像素灰度为依据划分区域,每个区域中的像素灰度大体一致,而区域之间的边界称之为边缘。所以,边缘检测的目的就是寻找这些边缘骨架。因此,首先对像素坐标 (m,n) 处的灰度值 $O(m_u, n_u)$ 进行水平和竖

直方向梯度计算:

$$\begin{aligned} G_x &= [O(m_u + 1, n_u - 1) + 2 \times O(m_u + 1, n_u) + O(m_u + 1, n_u + 1)] - [O(m_u - 1, n_u - 1) + 2 \times O(m_u - 1, n_u) + O(m_u - 1, n_u + 1)] \end{aligned} \quad (10)$$

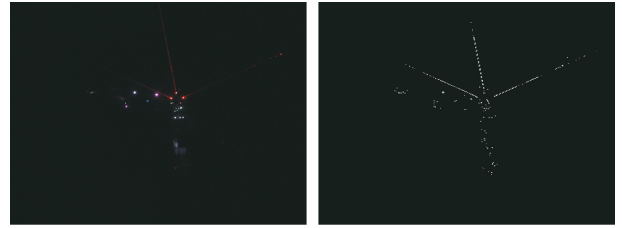
$$\begin{aligned} G_y &= [O(m_u - 1, n_u - 1) + 2 \times O(m_u, n_u - 1) + O(m_u + 1, n_u - 1)] - [O(m_u - 1, n_u + 1) + 2 \times O(m_u, n_u + 1) + O(m_u + 1, n_u + 1)] \end{aligned} \quad (11)$$

式中: G_x 为水平方向梯度; G_y 为竖直方向梯度; $O(m_u, n_u)$ 表示像素坐标 (m,n) 处的灰度值。

将水平方向和竖直方向像素分别取像素绝对值, X 为水平方向像素绝对值, Y 为竖直方向像素绝对值,将水平方向和竖直方向像素绝对值进行相加得到综合梯度:

$$P(x,y) = \sum_{k=0}^n (X_k + Y_k) \quad (12)$$

式中: n 代表综合梯度图像 $P(x,y)$ 的像素个数。边缘检测前后对比效果如图 6 所示。



(a) 边缘检测前图像
(b) 边缘检测后图像
(a) Image before edge detection
(b) Image after edge detection

图 6 边缘检测前后效果对比

Fig. 6 Comparison of before and after edge detection

对比图 6(a) 和 (b) 可知,通过边缘检测后使得点线特征边缘骨架得以显现,便于点线特征的提取。

3 点特征形状模型筛分

将边缘检测到的 M 个轮廓,3 个为 1 组随机分配,得到 K 个组合。因为三激光标靶结构为正三角形,所以安装在激光标靶上的 3 个激光指向仪像素坐标可近似为正三角形。因此,利用正三角形特性建立形状模型。

设 3 个激光指向仪在像素坐标系下的对应顶点为 A 、 B 、 C ,顶点对应的边为 a 、 b 、 c ,如图 7 所示。

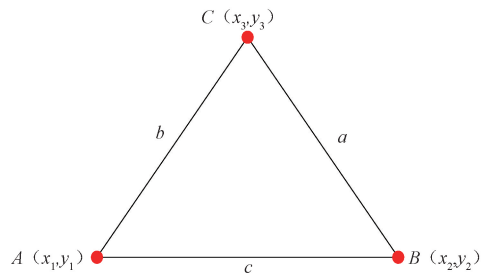


图 7 激光指向仪像素坐标物理分布

Fig. 7 Physical distribution of pixel coordinates of laser pointer

针对相机与激激光靶的距离变化,定义边长特性为:

$$0.5 \leq \frac{a}{b} \leq 1.5 \quad (13)$$

同时,激光指向仪像素坐标 $C(x_3, y_3)$ 满足 $x_1 < x_3 < x_2, y_3 > y_1$ 和 $y_3 > y_2$ 坐标特性。

针对相机相对激激光靶的旋转变化,得到倾角变化规律:

$$-\theta < \arctan\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right) < \theta \quad (14)$$

根据式(14)得到激光指向仪像素坐标旋转示意图,如图8所示。

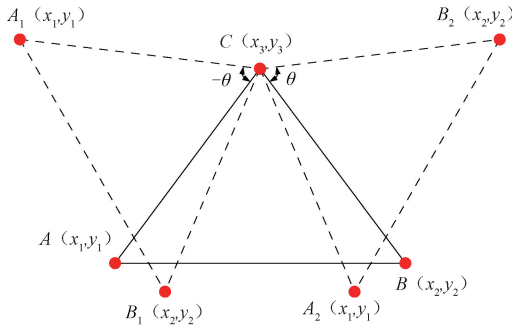


图8 激光指向仪像素坐标旋转示意图

Fig. 8 Diagram of pixel coordinate rotation of laser pointer

从 K 组光斑特征轮廓中筛选满足边长特性、坐标特性、倾角特性的 M 组轮廓。若 $M = 1$, 则 M 相对应的组中即为所需的3个光斑;若 $M > 1$, 则通过 $C(x_3, y_3)$ 在背景中的位置位于图像右上角, 则继续筛选 M 组中点 C 最大的第 K 组即为所需的3个光斑。

4 线特征线框模型聚类

4.1 线框模型建立

为了依据轮廓信息实现直线特征精确拟合,需要对骨架进行处理,因此,建立线框模型。

首先,找出每一个骨架中极值像素坐标 $x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}, y_{\max}$ 对应的坐标 $V_1(x_{\min}, y_i), V_2(x_i, y_{\min}), V_3(x_{\max}, y_a)$ 和 $V_4(x_a, y_{\max})$, 连接 $V_1(x_{\min}, y_i), V_2(x_i, y_{\min}), V_3(x_{\max}, y_a)$ 和 $V_4(x_a, y_{\max})$ 可得骨架最小外接矩形。

然后,计算每个最小外接矩形的长度 L_a 、宽度 W_b 和长宽比 S_{ab} :

$$L_a = y_{\max} - y_{\min} \quad (15)$$

$$W_b = X_{\max} - X_{\min} \quad (16)$$

$$S_{ab} = \frac{L_a}{W_b} \quad (17)$$

最后,计算像素坐标 $(x_{\min}, y_i), (x_i, y_{\min}), (x_{\max}, y_a)$ 和 (x_a, y_{\max}) 的中点坐标 $p_1(x_1, y_1)$ 和 $p_2(x_2, y_2)$ 。通过

$p_1(x_1, y_1)$ 和 $p_2(x_2, y_2)$, 求取最小外接矩形的角度 θ 为:

$$\theta = \arctan\left(\frac{|y_{\max} - y_a| - |y_{\min} - y_i|}{|x_a - x_{\max}| - |x_i - x_{\min}|}\right) \quad (18)$$

通过上述计算,得到的最小外接矩形效果如图9所示。

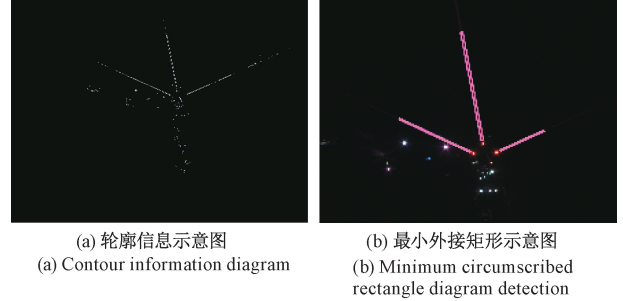


图9 最小外接矩形示意图

Fig. 9 Diagram of the smallest circumscribed rectangle

由图9可知,三激光束的轮廓信息被最小外接矩形包围,满足预期需求。

4.2 线框模型聚类

以 L_a, W_b, S_{ab} 为准则设定区间筛选范围,过滤掉不符合条件的骨架区域。设定 L_a, W_b, S_{ab} 参数范围为 $C_1 < L_a < C_2, C_3 < W_b < C_4, C_5 < S_{ab} < C_6$ 。其中, $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ 均为常数。

以 θ 为准则设定区间聚合范围,将 θ 相近的骨架进行拼接、聚合操作,使其外接矩形连通成一个大的矩形区域, θ 范围设定为 $C_7 < \theta < C_8$ 。其中, C_7, C_8 均为常数。以 θ 的不同值为分类依据,将特征图像骨架划分为若干类。并且,将每一类骨架包含的像素表示为坐标数据集 Q 。

5 基于改进 RANSAC 的特征拟合

因为煤矿井下受光照不均匀、粉尘浓度大、多杂光等影响,使得图像特征局部出现稀疏、模糊和不均匀等现象。所以,充分利用 RANSAC 算法,从包含“局外点”的数据集中,通过迭代方式求解模型参数的优势来解决图像特征缺陷问题。

但是,针对煤矿井下点线特征拟合问题,由于 RANSAC 算法的迭代次数会直接影响点线特征拟合的鲁棒性与准确性。因此,通过改进 RANSAC 算法的初始点与迭代次数来进行特征拟合,以提高特征提取的准确性。

其中,椭圆拟合以坐标数据集极值为椭圆模型初始点求取椭圆模型参数,将坐标数据集与前后两次内点差值比值作为最优迭代次数,迭代求取椭圆模型最优参数获得点特征。直线拟合以像素坐标模为直线模型初始点,利用自适应条件阈值、抽样次数获得线特征。

5.1 椭圆拟合

通过对每一个轮廓坐标数据集 R 建立椭圆模型, 求取 3 个圆心坐标作为掘进装备位姿解算模型 3P3L 中的 3P。

针对坐标数据集 R , 假设椭圆模型数学表达式为:

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (19)$$

从坐标数据集 R 中选择 x 最大值、最小值对应坐标 (x_{\max}, y_x) 、 (x_{\min}, y_n) , y 最大值、最小值对应坐标 (x_x, y_{\max}) 、 (x_n, y_{\min}) , 并随机选取 1 个数据点 (x_s, y_s) 。将 R 中的数据对椭圆模型计算代数距离二范数、几何距离二范数, 求出符合该椭圆模型的内点集 N 。

然后, 如果本次内点集 N_b 大于上次内点集 N_s (设定初次内点集 $N = 5$), 则继续选取坐标点进行椭圆模型参数求解, 设定最优期望内点集:

$$N_q = \frac{R}{N_b - N_s} \quad (20)$$

判断最优内点集是否达到预期数量, 如果内点集 $N_q = N$, 则输出最优椭圆模型; 否则, 重新选取点求取椭圆模型参数; 通过最优椭圆模型求取圆心坐标 (x_0, y_0) 。

5.2 直线拟合

通过改进 RANSAC 算法对骨架提取的坐标数据集 Q 进行直线拟合得到掘进装备位姿解算模型 3P3L 中的 3L。

求取坐标数据集 Q 中每一个坐标的模:

$$M = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \quad (21)$$

其中, x_i, y_i 为 Q 中第 i 个坐标点。选取模最大值 M_{\max} 作为 (x_a, y_a) 、最小值 M_{\min} 作为 (x_b, y_b) 。设直线方程为 $y = kx + b$, 根据 (x_a, y_a) 、 (x_b, y_b) 构造直线 L , 则有直线参数:

$$k = \frac{y_b - y_a}{x_b - x_a} \quad (22)$$

$$b = \frac{(y_a + y_b) - k(x_a + x_b)}{2} \quad (23)$$

计算坐标数据集 Q 中点 $P(x_c, y_c)$ 到直线 L 的距离:

$$d = \left| \frac{-kx_c + y_c - b}{\sqrt{k^2 + 1}} \right| \quad (24)$$

根据 M_{\max} 、 M_{\min} , 设定距离阈值 D :

$$D = \frac{M_{\min}}{M_{\max}} \quad (25)$$

如果 $d \leq D$, 将 P 标记为内点, 存入容器 R ; 如果 $d > D$, 则标记为外点, 对除点 P 外的点重新抽样。抽样次数计算表达式为:

$$S = \frac{\log h}{\log(1 - u^2)} \quad (26)$$

式中: h 为 S 次抽样中坏样本的占比; u 为内点占坐标数

据集 Q 的比例。将内点 P 从坐标数据集 Q 中移除, 得到移除后坐标数据集 Q_r 。

如果满足终止条件且拟合直线个数不满足要求, 则执行下一直线的拟合。否则进行下一帧图像的处理, 其中, 终止条件表示为:

$$Z = \frac{Q}{Q_r} \% < 0.05\% \quad (27)$$

6 实验及结果分析

在榆林大海则煤矿掘进工作面中搭建掘进装备位姿视觉测量平台, 包括山特维克掘锚一体机、工业防爆相机、三激光标靶、防爆计算机、本安型防爆全站仪、防爆显示器和棱镜等。具体如图 10 所示。

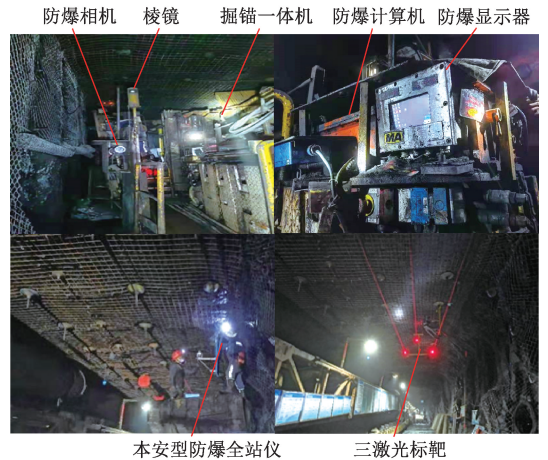


图 10 煤矿井下机身位置视觉测量试验平台
Fig. 10 Test platform for visual measurement of fuselage position in coal mine

选取两点作为全站仪建站坐标点, 建立全站仪坐标系, 利用全站仪测量机身与巷道坐标系之间的关系参数以及标定机身与相机之间的外参。将掘锚一体机移动至巷道中心并进行掘锚作业, 以全站仪实时测量的掘锚一体机位姿数据为真值, 将视觉测量值与全站仪测量真值进行对比分析, 确定煤矿井下掘进装备视觉定位方法的应用误差。

因为煤矿掘进装备在巷道坐标系下机身位姿信息具有方向性, 其中, 左右方向以巷道中线为测量基准, 沿巷道掘进方向规定向左为正方向, 向右为负方向; 前后方向以巷道掘进起点为原点, 沿巷道掘进方向规定为正方向; 上下方向以巷道顶板为基准, 规定向下为正方向。所以, 以相对误差 Re 作为应用误差:

$$Re = V_m - T_v \quad (28)$$

式中: V_m 为视觉测量值; T_v 为全站仪真值。

图 11~16 所示分别为位置 A(40 m) 和位置 B(80 m) 左右、前后、上下方向相对测量误差示意图。

由图 13 可知,在位置 A 巷道顶板上下方向视觉测量值相对全站仪测量值,误差为 ± 25 mm。

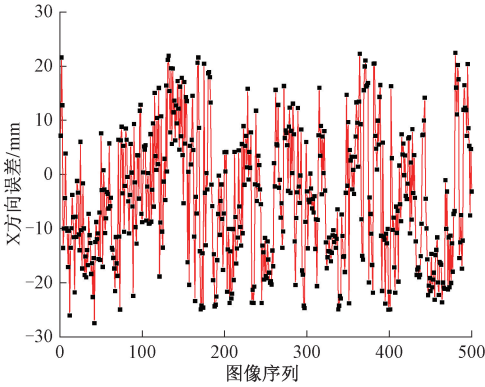


图 11 位置 A 左右相对误差示意图

Fig. 11 Diagram of left and right relative error of position A

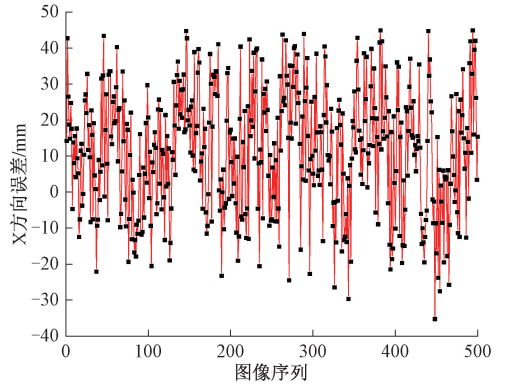


图 14 位置 B 左右相对误差示意图

Fig. 14 Diagram of left and right relative error of position B

由图 11 可知,在位置 A 巷道中线左右方向视觉测量值相对全站仪测量值,误差为 ± 30 mm。

由图 14 可知,在位置 B 巷道中线左右方向视觉测量值相对全站仪测量值,误差为 ± 45 mm。

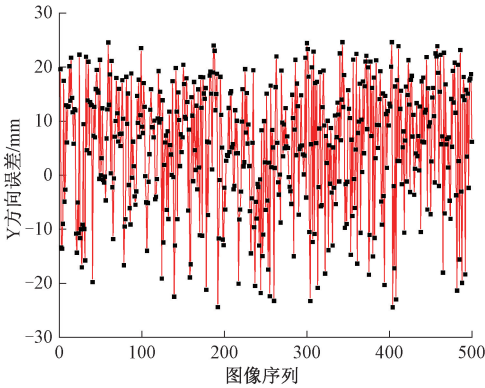


图 12 位置 A 前后相对误差示意图

Fig. 12 Relative error diagram before and after position A

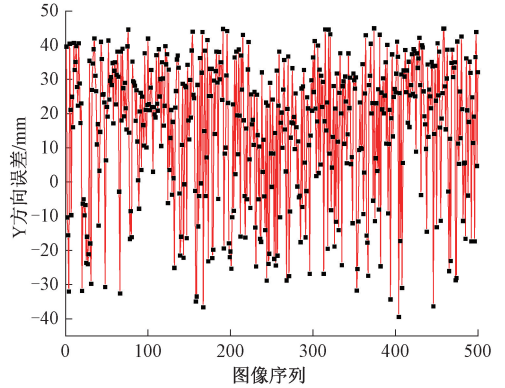


图 15 位置 B 前后相对误差示意图

Fig. 15 Relative error diagram before and after position B

由图 12 可知,在位置 A 巷道起点前后方向视觉测量值相对全站仪测量值,误差为 ± 25 mm。

由图 15 可知,在位置 B 巷道起点前后方向视觉测量值相对全站仪测量值,误差为 ± 45 mm。

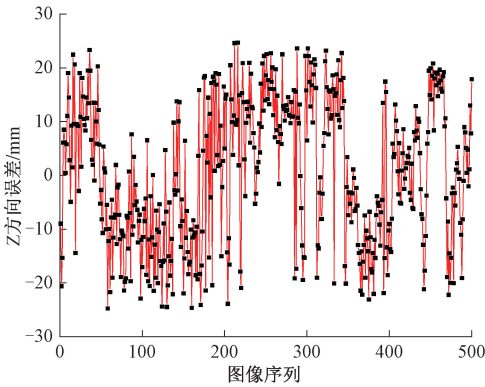


图 13 位置 A 上下相对误差示意图

Fig. 13 Diagram of the upper and lower relative error of position A

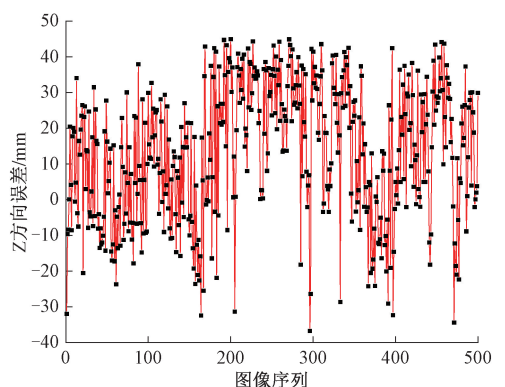


图 16 位置 B 上下相对误差示意图

Fig. 16 Diagram of the upper and lower relative error of position B

由图 16 可知,在位置 B 巷道顶板上下方向视觉测量值相对全站仪测量值,误差为 ± 45 mm。

由图 11~16 可知,本文所述方法可以在掘进工作面高粉尘、低照度以及杂光的环境下稳定提取激光图像点、线特征。当防爆相机距离三激光标靶 40 m 距离时,左右方向、前后方向、上下方向的测量相对误差分别为 ± 30 、 ± 25 、 ± 25 mm;当 80 m 距离时,左右方向、前后方向、上下方向的测量相对误差均为 ± 45 mm。在测试距离范围内所提出的基于改进 RANSAC 特征提取的掘进装备视觉定位方法能够满足煤矿井下掘进装备位姿测量的需求。

7 结 论

本文针对点特征提取,通过建立形状模型进行轮廓提取与筛选,并以轮廓坐标数据集极值坐标点为椭圆模型初始点求取椭圆模型参数,利用坐标数据集与前后两次内点差值比值作为最优迭代次数,实现基于改进 RANSAC 方法的 3P3L 位姿解算模型 3P 求解;针对直线特征提取,通过建立线框模型进行轮廓提取与筛选,以像素坐标模为直线模型初始点,采用自适应条件阈值、抽样次数提高直线特征拟合的快速性、准确性,实现基于改进 RANSAC 方法的 3P3L 位姿解算模型 3L 求解;以煤矿掘进工作面掘锚一体机分别距离三激光指向仪标靶 40 和 80 m 范围内,将掘锚一体机运行时视觉测量数据与全站仪测量数据进行对比,验证所述方法的可行性。验证结果表明,在 40 m 范围内,左右方向、前后方向、上下方向的测量相对误差分别为 ± 30 、 ± 25 、 ± 25 mm;在 80 m 范围内,左右方向、前后方向、上下方向的测量相对误差均为 ± 45 mm。可满足煤矿井下掘进装备位姿测量需求,为煤矿智能化提供技术支撑。

参考文献

- [1] 石泉,孙常军,郑洪涛,等.掘进装备机器人化的关键技术研究[J].煤炭科学技术,2020,48(S2):199-204.
- DAN Q, SUN CH J, ZHENG H T, et al. Research on the key technology of robotization of roadheader[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(S2): 199-204.
- [2] 王国法,王虹,任怀伟,等.智慧煤矿 2025 情景目标和发展路径[J].煤炭学报,2018,43(2):295-305.

WANG G F, WANG H, REN H W, et al. 2025 scenarios and development path of intelligent coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 295-305.

- [3] 王国法,赵国瑞,任怀伟.智慧煤矿与智能化开采关键核心技术分析[J].煤炭学报,2019,44(1):34-41.
- WANG G F, ZHAO G R, REN H W. Analysis on key technologies of intelligent coal mine and intelligent mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 34-41.
- [4] 马源,符世琛,张子悦,等.悬臂式掘进装备位姿检测研究方法研究现状[J].工矿自动化,2020,46(8):15-20.
- MA Y, FU SH CH, ZHANG Z Y, et al. Research status of pose detection methods of boom-type roadheader[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(8): 15-20.
- [5] 陶云飞,李瑞,李嘉庚,等.iGPS 的单站多点分时测量系统对掘进装备偏向位移精度研究[J].煤炭技术,2017,36(2):246-247.
- TAO Y F, LI R, LI J G, et al. Research on positioning accuracy of roadheader based on single station, multipoint and time-shared of iGPS measurement system[J]. Coal Technology, 2017, 36(2): 246-247.
- [6] 张旭辉,刘博兴,张超,等.掘进装备全站仪与捷联惯导组合定位方法[J].工矿自动化,2020,46(9):1-7.
- ZHANG X H, LIU B X, ZHANG CH, et al. Roadheader positioning method combining total station and strapdown inertial navigation system [J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(9): 1-7.
- [7] 徐爱功,闫可新,高嵩,等.一种单目视觉里程计 UWB 组合室内定位方法[J].导航定位学报,2021,9(5):82-88.
- XU AI G, YAN K X, GAO S, et al. A monocular visual odometry UWB combination indoor positioning method[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2021, 9(5): 82-88.
- [8] 华洪涛,马宏伟,毛清华,等.基于捷联惯导和推移

- 油缸信息融合的智能掘进装备位姿测量方法[J]. 煤炭工程, 2021, 53(11): 140-145.
- HUA H T, MA H W, MAO Q H, et al. Pose measurement of intelligent roadheader based on strapdown inertial navigation and oil cylinder movement [J]. Coal Engineering, 2021, 53(11): 140-145.
- [9] 张超, 张旭辉, 杜昱阳, 等. 基于双目视觉的悬臂式掘进装备位姿测量技术研究 [J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(11): 225-235.
- ZHANG CH, ZHANG X H, DU Y Y, et al. Measuring technique of cantilever roadheader position based on binocular stereo vision [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(11): 225-235.
- [10] 邓雅麒, 王进成, 郝兆钧, 等. 光纤陀螺启动漂移补偿方法[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(12): 61-63, 67.
- DENG Y Q, WANG J CH, HAO ZH J, et al. Compensation method for FOG startup drift [J]. Transducer and Merosystem Technologies, 2020, 39(12): 61-63,67.
- [11] 符世琛, 李一鸣, 宗凯, 等. 面向掘进装备的超宽带位姿检测系统精度分析[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(8): 1978-1987.
- FU SH CH, LI Y M, ZONG K, et al. Accuracy analysis of UWB pose detection system for roadheader [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(8): 1978-1987.
- [12] 胡兴涛, 朱涛, 苏继敏, 等. 煤矿巷道智能化掘进感知关键技术 [J]. 煤炭学报, 2021, 46 (7): 2123-2135.
- HU X T, ZHU T, SU J M, et al. Key technology of intelligent drivage perception in coal mine roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46 (7): 2123-2135.
- [13] 杨春雨, 顾振, 张鑫, 等. 基于深度学习的带式输送机煤流量双目视觉测量[J]. 仪器仪表学报, 2021, 41(8): 164-174.
- YANG CH Y, GU ZH, ZHANG X, et al. Binocular vision measurement of coal flow of belt conveyors based on deep learning [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 41(8): 164-174.
- [14] 张旭辉, 赵建勋, 杨文娟, 等. 悬臂式掘进装备视觉导航与定向掘进控制技术研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 1-11.
- ZHANG X H, ZHAO J X, YANG W J, et al. Vision-based navigation and directional heading control technologies of boom-type roadheader [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 1-11.
- [15] 杨文娟, 张旭辉, 张超, 等. 基于三激光束标靶的煤矿井下长距离视觉定位方法研究[J]. 煤炭学报, 2022,47(2):986-1001.
- YANG W J, ZHANG X H, ZHANG CH, et al. Research on long distance vision localization method based on triple laser beam target in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2022,47(2):986-1001.
- [16] 吴泽楷, 李恭强, 王文涛, 等. 基于改进圆拟合算法的激光光斑中心检测[J]. 激光与红外, 2016,46(3): 346-350.
- WU Z K, LI G Q, WANG W T, et al. Laser spot center detection based on improved circle fitting algorithm [J]. Laser and Infrared, 2016, 46(3): 346-350.
- [17] 张绍堂, 吴鸿, 宁德琼. 一种高精度的激光图像光斑中心检测方法 [J]. 激光杂志, 2018, 39 (8): 153-156.
- ZHANG SH T, WU H, NING D Q. High precision laser image light spot center detection method [J]. Laser Magazine, 2018, 39(8): 153-156.
- [18] ALMAZAN E J, TAL R, QIAN Y, et al. MCMLSD: A dynamic programming approach to line segment detection [C]. CVPR, 2017: 2031-2039.
- [19] GIOI R G V, JAKUBOWICZ J, MOREL J M, et al. LSD: A fast line segment detector with a false detection control [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(4): 722-732.
- [20] 刘丽霞, 李宝文, 王阳萍, 等. 改进 Canny 边缘检测的遥感影像分割 [J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(12): 54-58,180.
- LIU L X, LI B W, WANG Y P, et al. Remote sensing image segmentation based on improved canny edge detection [J]. Computer Engineering and Applications,

2019, 55(12): 54-58, 180.

- [21] 戴激光, 李晋威, 方鑫鑫. 一种新的边缘直线拟合方法[J]. 测绘科学, 2016, 41(12): 189-194.

DAI J G, LI J W, FANG X X. A new edge straight line fitting algorithm[J]. Science of Surveying and Mapping, 2016, 41(12): 189-194.

- [22] SALAUN Y, MARLET R, MONASSE P. Multi scale line segment detector for robust and accurate SfM[C]. Proceedings of the 23rd International Conference on Pattern Recognition, 2016:2000-2005.

作者简介



张旭辉, 1996 年于西安矿业学院获得学士学位, 2002 年于西安科技大学获得硕士学位, 2009 年于西安交通大学获得博士学位, 现为西安科技大学教务处处长, 主要研究方向为矿山设备状态监测与故障诊断、机电耦合建模与非线性动力学、数字孪生驱动远程虚拟操控、新型能量收集技术及应用、机电产品绿色设计技术与评价等。

E-mail: zhangxh@xust.edu.cn

Zhang Xuhui received his B. Sc. degree from Xi'an University of Mining and Technology in 1996, M. Sc. degree from Xi'an

University of Science and Technology in 2002, and Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2009. He is currently the director of the academic affairs department at Xi'an University of Science and Technology. His main research interests include mining equipment condition monitoring and fault diagnosis, electromechanical coupling modeling and nonlinear dynamics, digital twin drive remote virtual control, new energy collection technology and application, green design technology and evaluation of mechanical and electrical products.



杨红强(通信作者), 西安科技大学硕士研究生, 主要研究方向为矿山设备状态监测与故障诊断、智能检测与控制、机器视觉等方面。

E-mail: 18294255735@163.com

Yang Hongqiang (Corresponding author) is currently a M. Sc. candidate at Xi'an University of Science and Technology. His main research interests include mining equipment condition monitoring and fault diagnosis, electromechanical coupling modeling and nonlinear dynamics, digital twin drive remote virtual control, new energy collection technology and application, green design technology and evaluation of mechanical and electrical products.