

# 基于稀疏三维散点的地下巷道可视化重建方案<sup>①</sup>

张立昊, 张 峰, 张士文

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

**摘 要:** 为了对地下巷道进行三维可视化重建, 提出了一种基于稀疏三维散点的巷道可视化方案. 根据地下巷道的形状规律, 建立了梯形断面巷道的三维数学模型, 将巷道分为多段, 根据稀疏的三维散点得到每段巷道的中心线位置、长度数据和断面顶点, 画出每段巷道的各个面, 以完成整条巷道的重建. 实验验证表明, 该方法可视化巷道所需要的三维点数量很少, 且有一定抗噪性, 稳定性.

**关键词:** 可视化重建; 巷道; 三维模型; 稀疏散点; 抗噪性

## Underground Tunnel Visualization Solution Based on Sparse Three-Dimensional Points

ZHANG Li-Hao, ZHANG Feng, ZHANG Shi-Wen

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** In order to carry out 3D visualization reconstruction of underground tunnel, this paper presents a new method based on sparse 3D scattered points. According to the shape of the underground tunnel, a three-dimension mathematic model of tunnels with trapezium section is built up. Dividing the tunnel into segments, according to the sparse 3D scattered points to get the central position, length data and the vertexes of the tunnel's each segment, we can draw every surface of each segment, so as to reconstruct the whole tunnel. As is proved by experiments, this method needs only a small amount of three-dimension points, and has noise immunity and stability.

**Key words:** visualizing reconstruction; tunnel; three-dimension model; sparse scatters; anti-noise

为了实现地下巷道掘进过程中的无人化, 需要在掘进机工作时实时采集巷道三维空间点, 并通过这些点对巷道进行三维可视化显示. 目前国内对于巷道三维可视化的研究主要集中在通过测量得到数据建立模型, 用断面及中心线描述巷道, 并优化<sup>[1-5]</sup>. 徐雪战等人对于巷道的交叉点以及一些特殊地形进行了建模分析<sup>[6,7]</sup>, 孙臣良等人做了渲染以增强巷道的视觉效果<sup>[8]</sup>. 李虎等人使用 VR 等技术进一步增强了巷道的视觉效果<sup>[9-11]</sup>. 杜志强提等人出使用激光扫描获取巷道散点, 并用格网进行可视化重建拟合<sup>[12]</sup>. 但由于掘进机掘进过程中会产生大量粉尘, 会对激光、超声波、雷达等传统方法的性能产生巨大影响.

以上文献对巷道建模进行了各种尝试, 然而这些文献对于巷道的建模都是基于巷道挖掘完成后进行测

量得到数据或是激光扫描得到数据进行建模, 无法在掘进过程中进行建模.

本文将目光集中在巷道挖掘过程中, 首次提出使用机器视觉所得到的稀疏散点建模, 在掘进过程中为远程操作人员提供巷道相关信息, 有助于推进地下掘进无人化的实现.

随着图像处理及相关技术的发展, 空间三维点的位置坐标还可以通过机器视觉的方法来获取, 即通过已标定的双目摄像头同步拍摄两张图像, 寻找特征点并匹配, 进而利用视差求出三维点的空间坐标<sup>[13]</sup>. 通过图像降噪以及复杂的特征点选取、匹配算法可以使寻找特征点及匹配的过程有很强的稳定性和抗噪性<sup>[14-16]</sup>, 适用于有粉尘的环境. 但由于图片中特征点数量的有限性, 通过机器视觉得到的三维点是比较稀疏的.

<sup>①</sup> 基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)(2014CB046306)

收稿时间:2016-08-08;收到修改稿时间:2016-10-10 [doi:10.15888/j.cnki.csa.005760]

针对机器视觉所得到的稀疏三维点, 通过建立数学模型, 延续巷道中心线和断面形状描述巷道的方法<sup>[1-5]</sup>, 将巷道分为很多段, 根据这些三维散点, 求得每一段的最佳中心线及断面顶点, 可以得到三维可视化重建图像. 实验表明, 这种方法在三维点较为稀疏时可视化效果良好, 且有较好的抗噪性和稳定性.

### 1 巷道可视化重建方案

地下巷道可以通过巷道断面形状以及巷道中心线来描述, 本文以梯形断面的巷道为例建立模型. 掘进机行进的过程中可以用机器视觉的方法不断获取巷道内壁上的三维点, 通过这些三维点求出许多段直线线段逼近巷道的中心线, 并算出每一段巷道中心线对应的梯形断面的顶点, 根据这些顶点画出每一段梯形巷道的各个面, 以完成可视化重建.

#### 1.1 采集三维点

如图 1, 假设六面体  $A_0B_0C_0D_0A_nB_nC_nD_n$  是已经成功重建的巷道体, 平面  $A_nB_nC_nD_n$  为当前第  $n$  段巷道的出口, 平面  $\alpha$  为巷道中心线延伸方向前方距离为  $d$  的平面,  $d$  即为巷道重建的步长. 巷道中心线延伸方向为  $a$ ,  $b$  由  $a$  逆时针旋转  $\frac{\pi}{2}$  得到,  $a, b$  均为单位向量,  $O_n$  为当前巷道中心线的结束点.

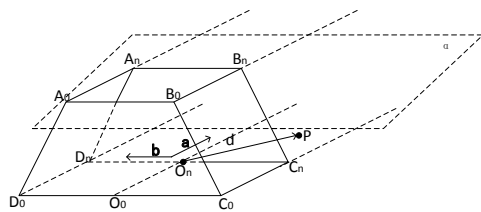


图 1 寻找临近点

平面  $A_nB_nC_nD_n$  和平面  $\alpha$  之间的点即为用于重建下一段巷道模型的三维点, 称为临近点. 假设有一个通过机器视觉得到的三维点  $P$ , 如果  $a \cdot \overrightarrow{O_nP}$  的值落在区间  $(0, d]$  中, 则认为点  $P$  为临近点.

若  $P$  与地板或者顶板的  $z$  轴坐标值的差的绝对值小于阈值  $\Delta h$ , 则相应判断  $P$  为地板或者顶板上的点. 如果  $P$  不在地板或者顶板上, 则计算  $b \cdot \overrightarrow{O_nP}$ , 若  $b \cdot \overrightarrow{O_nP} > 0$ , 则  $P$  在左墙, 反之,  $P$  在右墙.

#### 1.2 最佳中心线法

最佳中心线法即通过穷尽所有可能的中心线朝向, 从中选出能使模型最接近实际三维点的情况. 最

佳中心线法的关键在于求出最佳的中心线偏离角. 中心线偏离角指的是下一段待重建巷道中心线与已重建巷道末端中心线方向的夹角. 如图 2 所示, 已重建巷道中心线在出口  $O_n$  处的延伸方向向量为  $a$ , 下一段待重建巷道的中心线方向所有可能性由  $a' = a_0, a_1, a_2 \dots a_k$  表示,  $a'$  与  $a$  的夹角为  $\theta$ ,  $\theta$  为正表示顺时针旋转,  $\theta$  为负表示逆时针旋转. 当  $a' = a_0$  时,  $\theta$  取最小值  $\theta_{\min}$ , 当  $a' = a_k$  时,  $\theta$  取最大值  $\theta_{\max}$ . 当  $\theta$  从  $\theta_{\min}$  变化到  $\theta_{\max}$  时, 待重建巷道的模型由六面体  $A_nB_nC_nD_nA_{n+1,0}B_{n+1,0}C_{n+1,0}D_{n+1,0}$  变到  $A_nB_nC_nD_nA_{n+1,k}B_{n+1,k}C_{n+1,k}D_{n+1,k}$ , 步长为  $\Delta\theta$ .

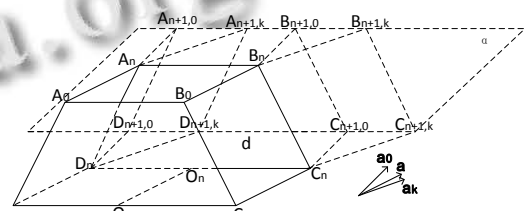


图 2 待重建段巷道模型与中心线的关系

对于每一个可能的  $a'$ , 计算所有临近点与对应待重建巷道体的距离. 如图 3 所示, 在某一个  $a'$  下, 对于一个右墙的临近点  $P_r$ , 在侧边  $B_nC_n$  上找一个与  $P_r$  高度相同的点  $P'_r$ , 点  $P_r$  与经过  $P'_r$  的方向与  $a'$  相同的射线的距离  $d_{P_r}$  即为点  $P_r$  与当前巷道模型的距离. 计算所有左墙与右墙临近点与巷道模型的距离, 并求其平方和, 作为当前  $a'$  下所有临近点与巷道模型的距离.

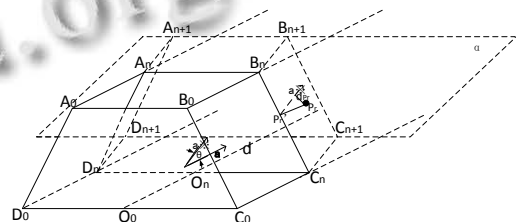


图 3 临近点与巷道模型距离计算

计算所有  $a' = a_0, a_1, a_2 \dots a_k$  情况下所有临近点与巷道模型的距离, 求最小距离对应的待重建巷道体中心线向量  $a'$ , 此时  $a'$  与  $a$  的夹角  $\theta$  即为最佳中心线偏离角  $\theta_{best}$ . 得到  $\theta_{best}$  以后计算  $A_{n+1}B_{n+1}C_{n+1}D_{n+1}$  的点坐标, 并更新  $a$  的值为  $a'$ , 准备下一轮迭代.

#### 1.3 中心线及断面顶点计算

设已重建巷道的中心线在出口  $O_n$  处的延伸方向向量  $a$  与  $x$  轴的夹角为  $\varphi$ , 则:

$$\mathbf{a} = (\cos \varphi, \sin \varphi, 0)$$

将  $\mathbf{a}$  逆时针旋转  $\frac{\pi}{2}$  得到的向量  $\mathbf{b}$  为:

$$\mathbf{b} = (-\sin \varphi, \cos \varphi, 0)$$

根据图 3 的几何关系, 用  $\varphi + \theta$  替换以上两式的  $\varphi$  可以得到:

$$\mathbf{a}' = (\cos(\varphi + \theta), \sin(\varphi + \theta), 0)$$

$$\mathbf{b}' = (-\sin(\varphi + \theta), \cos(\varphi + \theta), 0)$$

设巷道断面的顶板, 地板, 高度分别为  $l_c, l_f, h$ , 当前巷道中心线结束点的坐标为:

$$O_n = (x_0, y_0, 0)$$

则点  $B_n$  和  $C_n$  坐标为:  $y = -0.01 \cdot x^2 + 0.2 \cdot x$

$$\begin{aligned} B_n &= O_n - \frac{1}{2} \cdot l_c \cdot \mathbf{b} + (0, 0, h) \\ &= \left( x_0 - \frac{1}{2} \cdot l_c \cdot \sin \varphi, y_0 + \frac{1}{2} \cdot l_c \cdot \cos \varphi, h \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_n &= O_n - \frac{1}{2} \cdot l_f \cdot \mathbf{b} \\ &= \left( x_0 - \frac{1}{2} \cdot l_f \cdot \sin \varphi, y_0 + \frac{1}{2} \cdot l_f \cdot \cos \varphi, 0 \right) \end{aligned}$$

设有一个在右墙上的临近点  $P_r = (x_r, y_r, z_r)$ ,  $P_r$  在上等高的点为:

$$\begin{aligned} P_r' &= C_n + \frac{z_r}{h} \cdot \overline{C_n B_n} \\ &= \left( x_0 + \left( \frac{z_r}{2h} \cdot l_c + \frac{h - z_r}{2h} \cdot l_f \right) \cdot \sin \varphi, \right. \\ &\quad \left. y_0 + \left( \frac{z_r - h}{2h} \cdot l_f - \frac{z_r}{2h} \cdot l_c \right) \cdot \cos \varphi, z_r \right) \end{aligned}$$

则  $P_r$  与巷道模型的距离为:

$$\begin{aligned} d_{Pr} &= \left| \overline{P_r P_r'} \cdot \mathbf{b}' \right| \\ &= \left| - \left( x_0 - x_r + \left( \frac{z_r}{2h} \cdot l_c + \frac{h - z_r}{2h} \cdot l_f \right) \cdot \sin \varphi \right) \cdot \sin(\varphi + \theta) + \right. \\ &\quad \left. \left( y_0 - y_r + \left( \frac{z_r - h}{2h} \cdot l_f - \frac{z_r}{2h} \cdot l_c \right) \cdot \cos \varphi \right) \cdot \cos(\varphi + \theta) \right| \end{aligned}$$

同理可得, 位于左墙上的临近点与巷道模型的距离为:

$$\begin{aligned} d_{Pl} &= \left| - \left( x_0 - x_l + \left( \frac{z_l}{2h} \cdot l_c + \frac{h - z_l}{2h} \cdot l_f \right) \cdot \sin \varphi \right) \cdot \sin(\varphi + \theta) + \right. \\ &\quad \left. \left( y_0 - y_l + \left( \frac{z_l - h}{2h} \cdot l_f - \frac{z_l}{2h} \cdot l_c \right) \cdot \cos \varphi \right) \cdot \cos(\varphi + \theta) \right| \end{aligned}$$

设所有的左墙上临近点为集合  $H_l = \{P_{l0}, P_{l1}, P_{l2} \dots P_{lm}\}$ , 这些点与巷道模型的距离为  $d_{Pl,0}, d_{Pl,1}, d_{Pl,2} \dots d_{Pl,m}$ , 右墙上临近点为集合

$H_r = \{P_{r0}, P_{r1}, P_{r2} \dots P_{rn}\}$ , 与巷道模型距离为  $d_{Pr,0}, d_{Pr,1}, d_{Pr,2} \dots d_{Pr,n}$ , 则所有临近点与巷道模型的距离为:

$$d_\theta = \sum_{i=0}^m d_{Pl,i}^2 + \sum_{j=0}^n d_{Pr,j}^2$$

随着在与之之间变化,  $d_\theta$  相应变化, 当  $d_\theta$  取得最小值时,  $\theta = \theta_{best}$ .

于是, 可以求得在第  $n$  轮循环中巷道偏转的角度, 令, 可以求得:

$$\mathbf{a}' = (\cos \varphi', \sin \varphi', 0)$$

$$\mathbf{b}' = (-\sin \varphi', \cos \varphi', 0)$$

巷道中心线沿着  $\varphi'$  的方向延长  $d \cdot \cos \theta_{best}$ , 延长后巷道中心线结束点为:

$$\begin{aligned} O_{n+1} &= O_n + d \cdot \mathbf{a}' \cdot \cos \theta_{best} \\ &= \left( x_0 + d \cdot \cos(\varphi + \theta_{best}) \cdot \cos \theta_{best}, y_0 \right. \\ &\quad \left. + d \cdot \sin(\varphi + \theta_{best}) \cdot \cos \theta_{best}, 0 \right) \end{aligned}$$

第  $n$  轮循环结束, 令  $\mathbf{a} = \mathbf{a}'$ ,  $\mathbf{b} = \mathbf{b}'$ ,  $\varphi = \varphi'$ ,  $O_n = O_{n+1}$ , 即可开始第  $n+1$  轮循环.

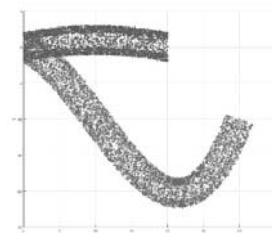
## 2 实验验证与分析

### 2.1 巷道重建

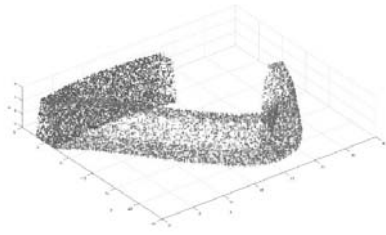
使用 MATLAB 仿真得到重建所需要的巷道散点. 如图 4 所示, 创建弯曲程度不同的两条巷道进行重建, 巷道的中心线分别满足函数,  $y = \frac{1}{300}x^3 - 0.1 \cdot x^2 - \frac{1}{3} \cdot x$ ,  $x$  的取值范围分别为  $[0, 20], [0, 30]$ , 巷道的顶板宽度为 2, 底板宽度为 4, 高度为 6, 用于重建的点的密度为每单位 1 的面积里面 15 个点, 即 15/1. 如果视觉上精度要求为 1 分米, 则当前密度相当于 1 平方分米内 15 个三维点, 这已经远远低于激光扫描等方式得到的三维点的密度, 接近于机器视觉可以得到的三维散点. 初始值如下:

$$\mathbf{a} = (1, 0, 0), \mathbf{b} = (0, 1, 0), \varphi = 0,$$

$$O_n = (0, 0, 0), \Delta h = 0.1$$



(a) 俯视图



(b) 侧视图  
图4 巷道散点

根据第2节所描述的方法在 Visual Studio 中编写 C++程序, 算法流程如图5所示。

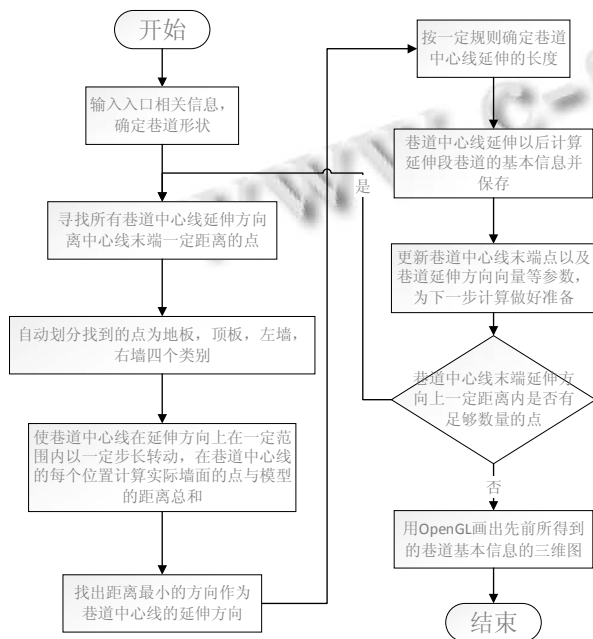


图5 算法流程图

将 MATLAB 仿真得到的点输入, 运行算法, 并用 OpenGL 显示, 结果如图6所示, 比较图6和图4可以看出两条隧道形状基本一致, 表明重建成功。



图6 巷道重建结果

## 2.2 方案性能量化评估

本节将引入巷道重建准确度参数  $\tau$ , 并对不同稀疏度三维点重建能力以及抗噪性, 稳定性进行测试。

### 2.2.1 巷道准确度参数 $\tau$

通过重建得到的巷道中心线与实际巷道中心线的比较, 可以衡量巷道重建的准确度. 设重建得到的巷道中心线上点的坐标为集合:

$$P = \{(x_0, y_0), (x_1, y_1) \dots (x_m, y_m)\}$$

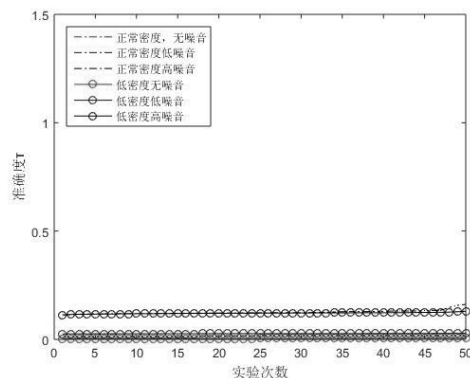
其中,  $m$  为重建得到的巷道中心线上点的个数, 则  $\tau$  的计算公式如下:

$$\tau = \frac{1}{w \cdot m} \sum_{i=1}^m |y_i - \hat{y}_i|$$

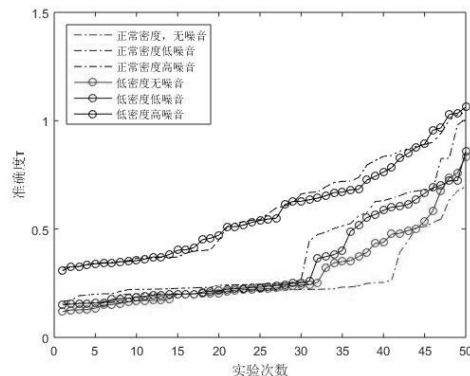
其中,  $w$  为巷道底板的宽度,  $\hat{y}_i$  为  $x = x_i$  处巷道中心线实际  $y$  坐标值.  $\tau$  的值越小, 重建巷道与真实巷道接近度越好,  $\tau$  的值超过 1 时, 巷道偏离度较大。

### 2.2.2 巷道抗噪性及低密度点性能测试

三维点的密度分为单位 1 面积内 15 个点和 5 个点两种情况, 噪音强度分为没有噪音, 每个三维点各个维度上增加幅值为的噪音以及每个三维点各个维度上增加幅值为的噪音三种情况, 每种情况进行 50 次重新产生巷道三维点以及重建实验. 通过准确度参数  $\tau$  观察重建效果。



(a)较规整隧道



(b)大弯度隧道

图7 隧道准确度评估

为了便于比较, 已将每一轮 50 次实验结果的值进

行升序排列,统一了图 7(a)(b)坐标轴的范围.观察结果,可以得出如下结论:

① 降低三维散点密度对结果影响不大,模型对低密度的适应性很好.

② 低噪音对结果基本没有影响,而高噪音对中心线准确度会产生一定影响,但从图 7(a)可以看出,0.5 的噪音造成的准确度变化仅为 0.2 不到,因此模型具有一定的抗噪作用.

③ 隧道的弯折程度对准确性会产生较大影响,大弯度下  $\tau$  值相对于小弯度明显上升,但依然只有极小部分超过 1,模型具有较好的适应性.

④ (b)图的斜率明显大于(a)图,即较规整隧道中模型稳定性很好,但隧道弯度上升时,会对模型稳定性造成一定影响.

综合以上观点可以看出,算法对三维点的密度要求低,可以根据精度要求自行调节,比如要求重建精度为 1 分米时,则每平方分米仅需要 5 个三维点就可以得到较为满意的结果.同时,算法的具有一定的抗噪性,尤其对于低噪音抗性很强,但在隧道遇上非常大的弯道时,准确性及稳定性会有一定下降,综合来说仍然具有不错的实用性.

### 3 结语

本文首次提出了一种基于稀疏三维散点的巷道可视化方案.该方案用巷道中心线和断面形状来描述巷道,基于稀疏的三维散点寻找最佳中心线,并求得每一段断面顶点,画出每一段的各个面,完成整条隧道的重建.该方案可以运用到掘进机挖掘过程中三维可视化模型的重建,推进无人化的实现.

通过实验验证和分析,表明本文所提出的新的可视化方案能够成功重建整条巷道,并且对三维点的密度要求低,具有不错的抗噪性和稳定性.

本文仅以梯形断面为例进行了可视化重建和实验验证分析.对于不同巷道断面形状的应用是未来的研究方向.

### 参考文献

- 1 许军,罗鹭,刘晓明.三维井巷工程建模及可视化技术研究.采矿技术,2010,10(2):77-78,96.
- 2 魏占营,王宝山,李青元.地下巷道的三维建模及 C++实现.武汉大学学报(信息科学版),2005,30(7):650-653.
- 3 王宝山,魏占营.煤矿虚拟环境的巷道 3 维建模研究.测绘学院学报,2005,22(3):204-206,211.
- 4 徐海,罗周全,刘晓明.复杂巷道工程三维可视化建模方法研究及应用.矿冶工程,2011,31(1):19-23.
- 5 谢义林,汪云甲,姚连璧.巷道三维构模及虚拟交互研究.计算机工程与应用,2009,45(23):231-235.
- 6 徐雪战,孟祥瑞,赵光明.三维可视化技术在巷道开拓中的应用.煤矿安全,2014,45(5):106-108.
- 7 张思卿,谭同德.VR 技术在钨矿山巷道可视化研究中的应用.有色金属(矿山部分),2014,66(4):91-95.
- 8 孙臣良,宛洪顺,侯旭江.基于 OpenGL 的面向对象的巷道三维可视化.微计算机信息,2011,(5):213-215.
- 9 李虎,李鹏飞,俞家勇.巷道三维建模与可视化研究.测绘与空间地理信息,2015,(10):168-170.
- 10 张思卿,周天宏,谭同德,于慧影.OpenGL 在矿井巷道可视化研究中的应用.金属矿山,2014,43(6):118-122.
- 11 孙冉.数字矿山巷道三维可视化模块设计与开发.黑龙江工程学院学报,2015,(6):10-14.
- 12 杜志强,石强,董兆江,桂佩华,李景星.基于地面激光扫描的矿山三维建模关键技术.地理空间信息,2013,11(6):23-26,8.
- 13 Hartley RI, Sturm P. Triangulation. Computer Vision and Image Understanding, 1997, 68(2):146-157.
- 14 Bay H, Ess A, Tuytelaars T, et al. Speeded-up robust features (SURF). Computer Vision and Image Understanding, 2008, 110(3): 346-359.
- 15 陈红,吴成东,陈东岳,卢紫薇.基于投票策略的特征点提取.东北大学学报(自然科学版),2016,37(2):157-160,164.
- 16 陈爱华,朱明,王艳华,薛陈.基于方向角的特征配准算法.光电子.激光,2009,(4):521-524.