

# 综采工作面自主移动巡检机器人技术及工程实践

任伟 关士远

**煤**矿机器人在煤矿智能化领域有着举足轻重的作用，是实现煤矿智能化建设的必要手段。2019年，国家矿山安全监察局以第一号公告颁布了《煤矿机器人重点研发目录》，共提出38种重点研发的机器人。综采工作面巡检机器人为煤矿开采提供智能感知、日常维护、抢险救灾等服务，是综采工作面智能化进程中重要的补充部分。自主巡检是巡检机器人智能化的最高形式，具有一键启动、自主导航、自动采集工作面各种传感器数据、自动识别故障点、煤流检测及报警等功能。

目前综采工作面主要是以轨道式巡检机器人为主，根据轨道类型可以分为单轨巡检机器人、双轨巡检机器人。单轨巡检机器人根据轨道的安装方式分为挂轨式巡检机器人及地面轨道式巡检机器人，其中挂轨式巡检机器人适用于载重和空间较小的场合；地面轨道式机器人适用于载重比较大的场合，可设计成隔爆形式，增加电池续航能力。巡检机器人搭载的设备主要包含彩色工业相机、红外热成像仪、甲烷传感器、烟雾传感器等。操作方式主要为远程遥控操作，在车载相机视频的辅助下，地面控制室工作人员远程控制机器人的启停及加减速。

煤矿井下光照条件差，特别是在出现紧急情况或事故时，可能出现全工作面停电的情况，没有照明，视频巡检机器人无法起到巡检的作用，虽然可以采用红外热成像仪，但因红外热成像仪纹理特征比较少，难以分辨现场环境，对救灾抢险起不到明显作用。

此外，巡检机器人通过WiFi把视频及现场的

传感器信息，从井下综采工作面远程传输到地面控制中心，因环境影响，有时WiFi信号稳定性不能保证，在这期间远程操作室无法获取机器人的位置及其周围环境信息，此种情况易发生安全事故。

针对上述问题，笔者分析探讨了自主移动机器人的相关技术，研究总结了适合综采工作面生产条件的自主巡检机器人技术，通过引入自主导航技术，将远程人工遥控巡检转为自主巡检，使巡检机器人具备“识图”功能，即使在没有网络信号的情况下，也能自主完成巡检任务。

## 自主移动巡检机器人

针对目前综采工作面巡检机器人使用过程中存在的问题，设计了一种适用于综采工作面的巡检机器人。该巡检机器人具有自主导航及在无光条件下执行巡检任务的能力。

### 巡检机器人硬件

巡检机器人底盘采用四驱系统，动力采用无刷直流电机，机器人供电采用锂电池。车载设备为2个16线激光雷达、惯导、甲烷传感器、烟雾传感器、彩色视频摄像头、5G模块、工控机（图1）。其中激光雷达和惯导完成自主导航，实现无光条件下执行巡检任务的能力。2个激光雷达分别安装于巡检机器人顶部及尾部，惯导安装于顶部激光雷达下面，整体刚性连接，在安装前做外参标定（图2）。

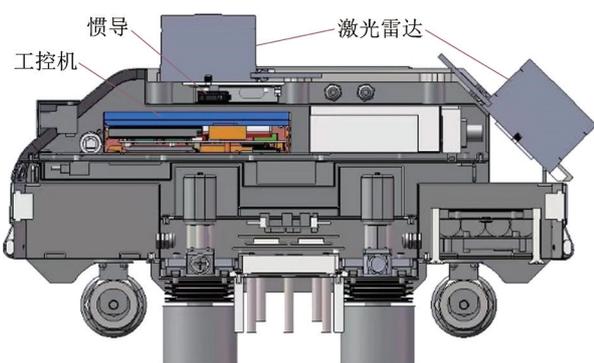


图1 自主移动巡检机器人硬件组成

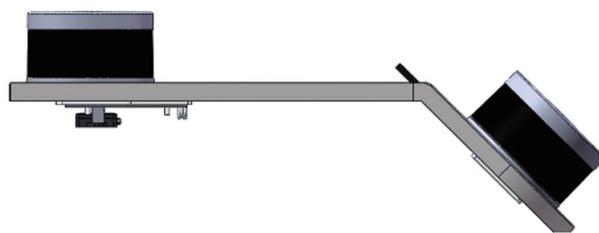


图2 自主导航功能部分

## 自主移动技术

并发建图与定位（Simultaneous Location and Mapping, SLAM）是目前国际上实现机器人自主移动的热点，SLAM可以描述为：机器人在未知环境中从一个未知位置开始移动，在移动过程中根据位置和地图进行自身定位，同时在自身定位的基础上建造增量式地图，进而实现机器人的自主移动。笔者采用SLAM技术实现巡检机器人的自主移动。

SLAM按照传感器类型大体可以分为视觉SLAM与激光SLAM。视觉SLAM传感器为各种类型的相机，视觉SLAM发展比较早也较为成熟，按照相机类型可以分为单目（1个摄像头）视觉SLAM、立体视觉（双目，2个摄像头，通过视差提供深度信息）SLAM，以及rgbd相机SLAM，rgbd相机包括彩色和深度（提供被测物体的距离信息，即深度）2个摄像头。此外，也有采用红外相机或者热成像仪做视觉SLAM的，但是由于其纹理信息不丰富，一般用的比较少。

激光SLAM以各种激光雷达作为主要传感器。激光SLAM的发展与激光雷达的发展密切相关，主要有旋转激光雷达SLAM，包括单线激光雷达与多线激光雷达，目前多线激光雷达做SLAM的比较多，单线激光雷达一般在SLAM发展早期使用较多，其应用场合有限。此外，还有固体激光雷达SLAM，也提供rgbd信息，能充分利用视觉和激光的优点，但是其视角比旋转激光雷达的要小，制约了其使用场景。虽然rgbd相机和双目也能提供深

度，但是rgbd相机和双目提供的深度信息一般只有几米至20 m的范围，而激光雷达的测量距离在100 m左右。激光雷达更适合室外或室内场景大的地方，而且激光雷达的精度也比双目和rgbd相机要高。

## 综采工作面激光 SLAM

综采工作面开采环境较为恶劣，机械振动、粉尘、烟雾等比较严重，对SLAM算法要求可靠性高、鲁棒性好、精度高。由于视觉SLAM严重依赖光源，无法在无光条件下工作，甚至在光照条件差的情况下无法稳定工作。为保证巡检机器人能在各种光照条件下工作，采用激光雷达作为传感器，同时为增强可靠性，增加惯导模块，SLAM算法采用激光雷达融合惯导的非线性优化进行定位及建图。笔者采用2个16线激光雷达，旋转轴成45°布置，在移动过程中可以实现360°×360°无死角扫描。单个雷达每秒可以达到30万点，大量点云处理给计算机算力和内存提出了很高的要求，同时也威胁系统的可靠性，故采用基于特征点的激光SLAM。

考虑到综采工作面现场环境的设备比较固定且类型较少，几何外形比较规则，扫描所获得的点云几何特征非常显著，故采用基于三维张量的几何特征，具体包括直线特征、平面特征、球面特征、全方差、各向异性、曲率变化量、特征值熵。

对激光点云采用主成分分析的方式提取笔者

所述的7类特征，具体方法为通过求取点云内每个点的邻域内所有点的协方差矩阵，由于协方差矩阵是实对称矩阵，可以求得协方差矩阵的3个特征值，通过特征值求得对应的7类特征。在实现过程中，由于点云数据量较大，可能导致实时性较差，实际实现过程中，可以采用并行计算，巡检机器人内的车载工控机支持CUDA，提取特征采用GPU加速实现，所有激光点云的特征提取均在GPU内实现。

通过提取出的几何张量特征点，对当前巡检机器人的6自由度姿态进行估计，为使计算机的算力及内存增加有界，采用基于滑动窗口的非线性最小二乘优化算法，求解6自由度姿态，采用当前帧的特征点与历史10帧点云的特征点进行优化求解姿态。

巡检机器人的实际空间位置是随时间连续变化的，所以对于当前时刻激光雷达扫描所获取的激光雷达点云与前面几帧点云是有大量重合的点，由于激光雷达与巡检机器人刚性连接，雷达坐标系是动坐标系，这些重合点在雷达坐标系中是不一样的，而在全局坐标系中是一样的，全局坐标系一般选为巡检机器人的开始时刻位姿。

姿态为6自由度包含3个旋转分量、3个平移分量，对于旋转分量，表示方法有四元数、欧拉角、轴角、矩阵等。为方便计算将旋转分量和3个平移分量合在一起，用1个4阶矩阵表示，旋转分量形成单位正交子矩阵。姿态求解的核心思想：令 $T$ 代表当前时刻，其为未待求量，通过该姿态可以求得当前时刻的激光点云在全局坐标系下的坐标，当然其坐标也是含有 $T$ 的未知量，该坐标与时间上连续的前面几帧有重合的特征点，哪些是对应的重合特征点可以通过KDTree搜索获得。由于特征点比较多，可以采用最小二乘在误差最小的意义下求得 $T$ 时刻的位置。

一般求最优解需要通过求目标函数的导数，但是姿态矩阵没有加法，只有乘法，不能求导，根据李群相关理论，群没有加法不能直接求导，但是群具有切空间，而且切空间具有特殊的代数结构——李代数，李代数有加法，可以求导，通过对

李代数求导，再通过李群与李代数之间的变换关系，将对应李代数的加法增量变换为李群的乘法增量（姿态变化量），完成最优姿态的求解过程，姿态求解过程中采用通过惯导获取姿态的初始值，作为每次姿态优化的初始值。

考虑到实际应用中会出现个别特征点之间距离特别大，这种情况可能由激光雷达的扫描线与物体表面夹角较小造成，这个点需要剔除或抑制。可采用带有权值的最小二乘法处理这种点，在计算最小二乘法的目标函数时，如出现距离过大的情况，需要减小该误差项的权值，这样处理算法鲁棒性强，不会因为个别点出现误差而导致结果偏差过大。

姿态求取后，将该时刻的点云通过姿态变换到全局坐标系下，将三维激光点云变换为全局坐标系，完成建图。建图过程可实现实时建图和姿态求解的统一，这为实现自主导航提供了必备条件，使巡检机器人能实时感知自己所在的周围环境（三维激光点云地图）。通过点云地图进行定位，获取实时位置，操作人员远程指定具体的位置，机器人即可运行到该位置。此外，所获取的三维激光点云，通过点云的分割算法可以提取出顶板与煤壁的交线用于智能割煤，而获取的姿态可以用于获取刮板输送机的轮廓曲线用于工作面找直。

## 井下工业性试验

本文方案在兖矿能源集团股份有限公司某采煤工作面进行测试，工作面采高为4.5 m，长度为260 m，液压支架数量为144架，自主移动巡检机器人在与溜槽平行的轨道上运行，巡检机器人及内部装有车载电脑、WiFi，现场建图数据及启停指令通过WiFi传输，如图3所示。

由于工作面的液压支架数量固定，虽然由于工作面向前推进会在工作面长度轻微的改变，巡检机器人的巡检总路径基本上保持在260 m左右小幅变化。巡检机器人巡检路径设计是从机头到机尾，走完1个完整的工作面，然后返回。在巡检过

程中实时算出当前位置，并计算与工作面长度差值，当差值小于5 m（即当前位置与起点大于255 m）就返回，当返回到起点就停止，经过实际9次全工作面巡检测试，该巡检机器人均能成功返回起点。实时所建地图及对应轨迹如图4所示，红色为工作面三维激光点云地图，青色线为实时轨迹。



图3 工作面自主移动巡检机器人

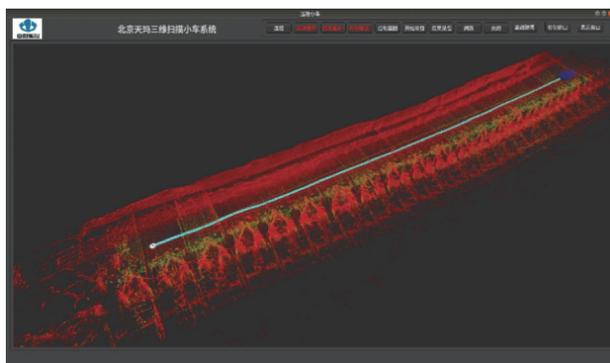


图4 巡检轨迹及对应所建的三维激光点云地图

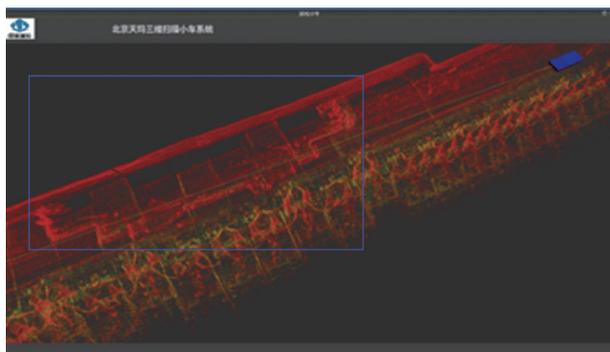


图5 实时点云中的煤机轮廓

### 三维激光点云的定性分析

在线实时所建的三维激光点云地图均有足够的分辨率，可用于实时监控，图5中蓝色框内为煤机，可清晰看出其外形轮廓。

为测试点云分辨率，在工作面液压支架顶梁上挂3个标靶球（图6中蓝色框内“白球”），标靶球直径10 cm，在实时点云上均可清楚看见其轮廓外形（图7中蓝色框内3个“绿球”），这弥补了视频监控不能在无光条件下作业的缺陷，增强了巡检机器人的感知能力，为无人化采煤提供了可靠的感知手段。

### 建图轨迹精度分析及自主巡检

在运行期间从巡检机器人的全局地图坐标原点（起始点）选5个点，从巡检软件直接读出其对应坐标（实际测量值），然后用全站仪再测其坐标，共计测试5组数据，并作为真值，见表1。可以看出对于整个工作面范围而言，实际误差应均小于0.5 m。



图6 标靶球

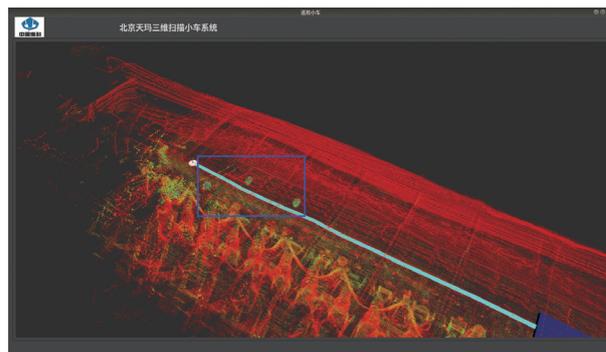
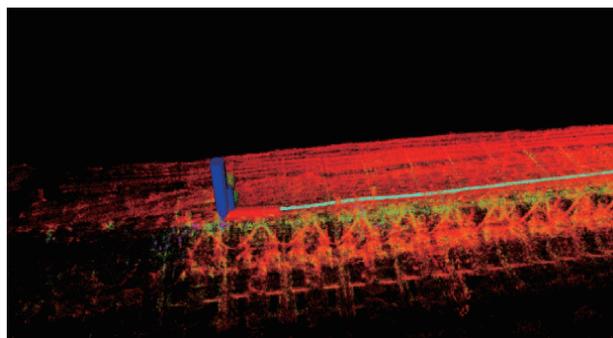


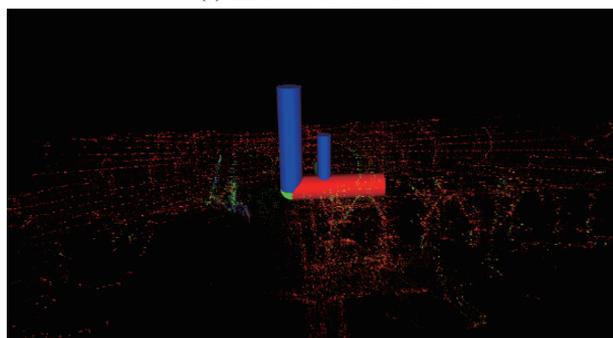
图7 标靶球对应的点云

自主移动机器人回到起始点的累计误差测试，因为激光SLAM算法是累积误差，可以通过走1个闭合路径看其回到起点的误差大小来进行估计，实际测试从机头走到机尾，然后再返回机头，看起点和终点是否重合及不重合的差别大小来估计其绝对误差，如图8所示。大坐标系（图8b左侧较大蓝棒对应为大坐标系，较小蓝棒对应为小坐标系）为轨迹坐标系（起始点），小坐标系为实时里程计姿态（动坐标系，代表估计姿态），起点坐标（0，0，0），开始时起始点与里程计坐标系原点重合（图8a）；终点坐标（0.098 2，-0.240 0，0.025 6），如图8b所示，为回到起始点的位姿估计，里程计姿态与原点几乎重合。照此方法，依次进行5组实测，累计误差见表2，巡检路径长度大于200 m，误差小于0.2%。

由于自主移动巡检机器人能实时计算出自己所在的位姿和地图，可以基于自己所建的地图导航，自主巡检任务可以描述为：机器人基于起始点走完1个完整工作面并且回到初始点，工作面长度已知，根据机器人实时计算的轨迹决定是否返回、



(a) 里程计位姿估计起点



(b) 里程计位姿估计终点

图8 完成1个巡检任务的误差

表1 轨迹绝对误差

实际测量值/m	0.50	13.50	23.90	36.20	42.10
全站仪测量值/m	0.63	13.80	23.50	36.70	42.40

表2 累积实测误差

序号	1	2	3	4	5
误差/m	0.13	0.23	0.27	0.10	0.43

表3 全工作面点云

序号	尺寸/G	范围
1	12.6	全工作面
2	18.2	全工作面
3	6.7	全工作面

表4 激光点云绝对误差

标记点	0(0 m)	1(10 m)	2(20 m)	3(45 m)	4(56 m)
误差/m	0	0.21	0.34	0.13	0.24

判断是否到达起始点，实际测试7次自主巡检，均圆满完成巡检任务。

### 点云地图精度分析

对于激光点云的精度分析，由于在线点云出于实时显示的目的，其密度不高，故录制数据包，制作离线稠密点云，方便进行三维地图的精度测试，变换点云所有的姿态均采用实时估计的轨迹。本次试验所采集到的全工作面数据集大小及对应生成的点云大小见表3。

实际在工作面液压支架上做标记，然后从点云上找到标记，并读出其坐标，图9示例标出了点云内2点之间的距离。

针对上述3组数据集，实际测试了4个标记物，测量原点为机器人初始时刻位置，并用全站仪测出标记物坐标，同时从激光点云读出标记物的坐标，通过2个坐标值计算对应的距离之差，该差值作为绝对误差，见表4。

由表4可知，最大误差小于0.5 m，全工作面中长度大于260 m，其误差小于0.2%。

## 工作面找直技术应用

实时建图所获得的轨迹，可以用于工作面找直的直线度检测，实际为测试直线度检测的精度，人为地将巡检机器人抬离轨道，然后走一段再放回轨道，检查对应轨迹的变化（图10），计算垂直工作面方向的移动距离为0.35 m，实际测试的移动距离为0.40 m，与实际测量的结果几乎完全符合，

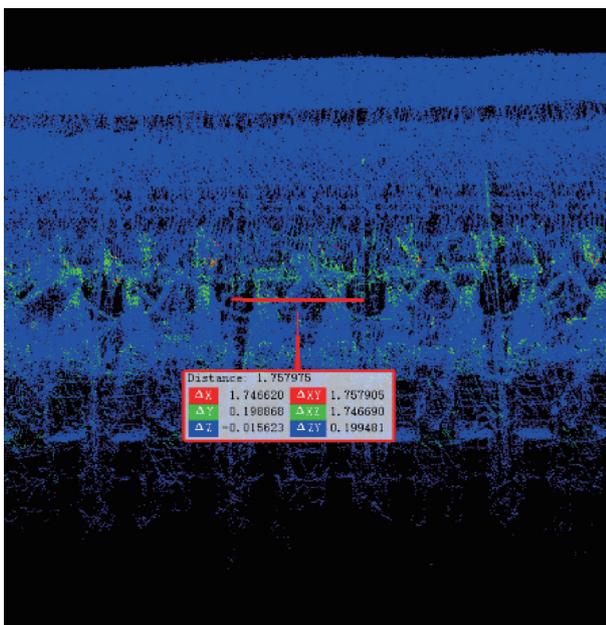


图9 建图精度测试

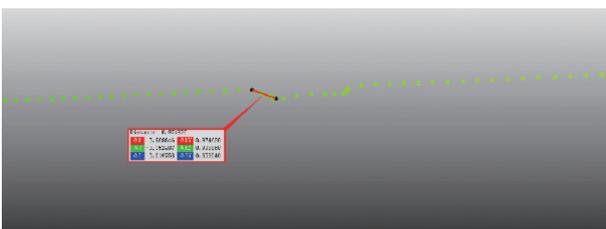


图10 直线度检测

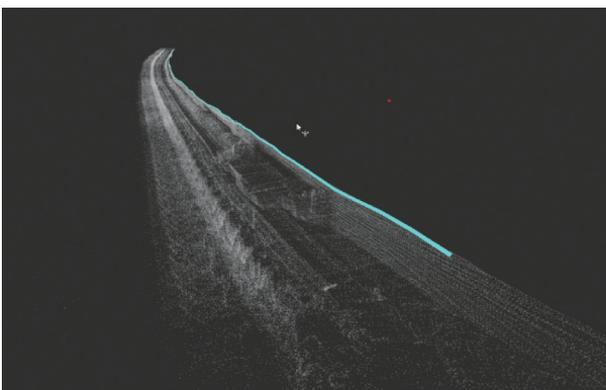


图11 顶板线提取

误差为0.05 m，见图10的 $\Delta Y$ ， $\Delta Y$ 垂直于工作面推进方向。试验证明所获得的轨迹可以高精度地检测直线度，作为工作面找直的依据。

## 指导煤机截割应用

利用实时建图和其对应的轨迹可以提取顶板线，顶板线提取如图11所示，通过绝对坐标的转换，用于指导煤机割煤。获得的点云通过提取位于煤壁侧的特征点，进而获得顶板线，顶板线为相对于巡检机器人起始时刻的坐标，需要利用巷道内的绝对坐标，将其转换到绝对坐标系内，然后与地质钻孔图及地质模型进行结合，对煤机的割煤过程进行指导。

## 总结

(1) 论述了基于激光SLAM的综采工作面自主移动巡检机器人技术，并成功进行井下工业性试验，证实了所述技术的可行性。

(2) 本文方案对其轨迹精度在全工作面范围做了相应分析，基于激光SLAM位姿估计其精度满足巡检任务的需求，能实现自主巡检功能。

(3) 对所建的三维激光点云进行了定性及定量分析，证明该方案能实时、完整、高精度地建出全工作面范围三维激光点云地图，并对其分辨率做了定性分析，探讨了其在弥补视频监控缺陷的应用前景。

(4) 对利用轨迹及激光点云提取的顶板线如何指导割煤进行了初步探讨，未来打算就如何利用轨迹及激光点云指导采煤进行深入研究及现场推广。

■ 责任编辑：李金松

### 作者简介：

第一作者：任伟，副研究员，现任北京天玛智控科技股份有限公司电气自动化部主任工程师。

E-mail: renwei@mktm.com.cn

作者单位：北京天玛智控科技股份有限公司