# 中核管道探伤自动定位检测方案

## 1 系统设计

本方案要解决的核心问题是：对于室内机器人作业区正上方的多根管道，在给定具体管道或全部管道的条件下，使机器人能够自主进行路径规划，依次到达管道正下方的位置，即初定位；此时机器人向上伸出用以管道探伤的探测杆，利用探测杆顶部已有相机，实时测量管道中心线与探测杆中心线的偏移，并自动控制机器人进行相应调节，使探测杆能伸入管道正中进行探伤，即精准定位。

原定方案为利用实验室现有成熟技术，移动机器人会搭载激光雷达、陀螺仪、里程计多种传感器进行SLAM定位，创建室内环境地图和检测自身定位状态，不需要安装任何地标二维码或加装其他辅助光源。针对105所现有的机器人使用的里程计定位方法中里程数据的累积误差引起的机器人位姿不准确的问题，方案采用扫描匹配的方法求取激光雷达的连续测量数据之间的相对位姿变换，以此对里程计定位结果进行有效校正，提高了机器人长距离定位的精度。但是经过试验测试，在圆形室内无特征的环境中，激光雷达扫描匹配的重复定位精度难以保证，所以以上在一般室内环境均适用的方案并不适用于本次管道探伤自动定位。

本方案实现机器人管道探伤自动定位检测，路径规划和运动控制，设计实现主要思路如下：

1. 初定位：在解决二维码易磨损造成的定位失败负面影响外，本着尽量避免对现有平台进行大幅改动的原则，采用网格激光引导机器人定位方法，替代现行二维码引导。如图1所示，网格激光器安置于管道作业区侧方墙面上，在不影响后续管道探伤作业条件下，调节激光器的角度，保证网格激光的各网格顶点（横纵激光线交点）与各地标点（管道于地面的垂直映射点，即场景中现有的二维码标签中心点）尽量重合，利用地面各网格顶点形成机器人定位识别的地标点，引导机器人进行定位。
2. 精准定位：由于网格激光器安装精度、运动控制误差、里程计误差等多种因素对不可避免会对机器人定位精度造成影响，故在机器人完成管道下方地标点初定位后，还需要校正机器人的运动位置，以便实现管道中心精准定位，在完成定位优化的同时，同时修正由于里程计及电子罗盘的误差造成的累积偏移。

机器人探测杆向上展开至接近管道位置，利用探测杆顶部承载相机获取管道端面图像信息，利用视觉方法测量探测杆中心线与管道正中偏移量，反馈此偏移自动调节机器人运动减小偏差，使探测杆与管道良好对齐情况下，重新修正机器人的地标点，补偿由于网格激光器的地标点由于安装带来初定位产生的定位误差，地标点经过修正后，对机器人运动过程进行记忆，能显著提高下次机器人定位的精度和速度。由于精准定位对机器人定位误差校准建立在相对应激光网格点的校准，也同时消除了机器人定位中参照上次定位基准产生的累积误差。



图1 网格激光示意图

该方案整体流程图如图2所示。



图2 机器人自主对接整体流程图

## 2 具体实施方案

## 2.1 硬件安装

如上所述，本方案主要是在网格激光的引导下，使机器人自主完成在作业区的定位过程，根据作业区条件及105所现有检修机器人平台，还需要增加的安装设备为：网格激光器、用于获取场景中激光分布情况的相机以及用于给现有平台上位于探测杆顶部的相机打光所用同轴光源。全部硬件安装如图3所示。



图3 硬件安装示意图

利用网格激光引导机器人进行自定位的关键在于实时获取场景中激光分布情况，而由于管道直径为10cm，管道与管道间距为10cm，故激光网格点（地标点）间距仅为20cm，现有机器人平台在作业区运动过程中不可避免地会出现如图4所示激光线被机器人所遮挡的问题。机器人运动建模的坐标系是以机器人四驱动轮对角线交点（机器人中心位置）为原点，而探杆与机器人运动坐标系在机械安装时便已固定，为已知量。在理想情况下，机器人良好定位即机器人运动坐标系原点与目标网格点重合，如图4中十字叉位置，故在机器人对激光线的遮挡影响下，根据正交定位原则，如何知道机器人运动坐标中心点正交方向的激光线数目是定位的关键。为方便描述，架设机器人在如图5场景下向右运动，且右侧为机器人前方，则具体方案为，在机器人尾部与右方各装一相机，其中，尾部相机用于观测机器人后方垂直于运动方向的激光线数目，则此时实际激光线数目为相机测量所得激光线数目加上机器人后半部遮挡激光线数目（建模时已知），机器人右侧相机同理。通过机器人两个方向拍摄的激光线位置和运动相对变化，就可以较准确的定位机器人的位置。



图4 机器人遮挡激光线示意图

探测杆顶部安装同轴光源主要为探测杆顶部已有的探测杆相机提供照明，安装时需要尽量保证探测杆展开到达顶部某一高度时，同轴光照射区域尽量只完整覆盖当前需要检测的一个管道截面。

### 2.1 定位及对接实现

### 2.1.1 系统初始化

如何利用探测杆顶部相机测得的探测杆中心线与管道中心线的横向（X）、纵向（Y）偏移，得到机器人定位过程的误差，即机器人定位过程中，在机器人运动坐标系下X、Y的偏移量，是探测杆与管道良好对接的前提。其次，机器人在自定位过程中，应该从作业区什么地方开始，以什么样的路径运动，是探伤工作能否顺利进行的基准条件。再者，对于利用探测杆顶部已有的单个相机，测量中心线偏移，则需要标准情况下的基础模板。综上所述，机器人自定位及对接过程的初始化准备工作大致分为以下部分：坐标系的归一化（统一）、起始点到第一个地标点的路径规划以及标准中心线对齐状态下基础模板取样。

在机器人自定位及其所承载的探测杆与管道对齐过程中，主要任务是利用机器人平台承载探测杆，到达目标位置，使探测杆与待检测管道中心线对齐。故在完成此任务过程中，存在以下几个相对关系：探测杆坐标系与机器人运动建模坐标系相对关系、表征探测杆与管道间偏移的基准模板坐标系与探测杆坐标系相对关系、以及基准模板坐标系与机器人运动坐标系相对关系。由于此系统总共包含控制系统、视觉系统及传感系统，其各自的标准（参考坐标系）各异，故在进行自动定位及对接作业过程中，需要将其统一至全局坐标系下，即为坐标系的归一化（建立全局坐标系），全局坐标系的建立及统一具体方法如下：

如图5所示，机器人运动坐标系为以机器人中心为原点，以小车运动正向（本次假定为机器人图5右方运动）为Y轴，以与Y轴成右手螺旋正交方向为X轴建立的坐标系。探测杆坐标系为以探测杆截面中心为原点，以与机器人X轴平行方向极径为X轴，以与X轴成右手螺旋正交方向极径为Y轴建立的坐标系 。基准模板坐标系以待测管道端面圆心为原点，以机器人运动正向为Y轴（与平行），以与Y轴成右手螺旋正交方向为X轴（与平行）建立的坐标系。



图5 机器人平台各坐标系示意图

在上述坐标系中，将垂直向下映射至地面，可得到如图6所示映射坐标系。由地标点定义可得，点应与该管道所对应地标点（激光网格点）重合，并且机器人在位于当前地标点时，由图像所得的探测杆相对于坐标系的X、Y方向上偏移，等价于探测杆与坐标系的偏移。



图6 基准图像坐标系与映射坐标系示意图

综上所述，设定以探测杆坐标系作为全局坐标系，则机器人运动坐标系与探测杆坐标系之间存在由于机械安装引起的平移矩阵 （二维向量，表示X、Y方向上的平移量），同理，探测杆坐标系与基础模板坐标系之间存在由于定位误差而造成的平移矩阵。

对于机器人启动到自定位及对接实现，首先是要让机器人定位自身以及在某一参照物下待作业区的状况，故机器人从启动位置到参照物位置确认作业区的位置对于后续路径规划至关重要。取网格激光最外侧四个顶点中的一个（离门口最近的那个）为参照物（点），机器人每次从同一位置出发进入作业区，由于作业区门口离此点不远，则可以采用固定路径及固定运动方式从固定起始点出发，利用里程计（编码器）的信息进行路径规划。

由于后续探测杆与管道间的偏移测量是通过对探测杆顶部承载相机当前时刻下采集的图像与标准图像进行比对，进而获得其具体偏移情况，故还需要对每种管道进行基准模板取样。具体方式如下，针对作业区中各异的管道，在手动调节至中心线对齐（标准对接）状态下，采集图像并保存作为该类管道的基准模板。

### 2.1.2 机器人自定位

由于机器人在网格激光引导下，可以利用激光线在图像中的成像位置予以运动偏差纠正，而机器人转向过程中，不可避免引起激光线数目变化，坐标系方向变化，用以检测激光线条数以定位机器人的相机视区变化，同时编码器精度在转向过程中降低，故机器人在完成一行地标点定位后，并不旋转180°进入下一行，而是利用其全向移动特性，直接平动至下一行。此时，机器人运动方向与上一行相反，探杆坐标系与机器人运动坐标系的平移矩阵与上一行两者之间的平移矩阵反向不变。同时，为尽量避免曲线或与斜向运动，机器人在完成当前行的地标点定位后，以曼哈顿距离进入下一行地标点定位，减少曲线或斜向运动带来的误差。

机器人在作业区中自定位逐点定位运动轨迹如图7所示（基于最下方网格点为参照点），机器人从参照点按直线巡线式遍历该行所有地标点，在遍历完该行所有地标点后，利用机器人全向移动平台按曼哈顿式距离平动（不改变方向）至第二行第一个地标点，其余行亦如此，直至遍历所有地标点。



图7 机器人逐点定位路径规划示意图

机器人在每一行进行逐点定位过程中，由于编码器精度，激光线照射精度等多种环境因素干扰，不可避免的会造成自定位偏差。故在机器人对各地标点定位的前提下，利用探测杆顶部承载相机，利用视觉方法测量探测杆中心线与管道中心线的偏移，并将该偏移反馈至机器人运动坐标系，使机器人进行相应调节，逐点消除定位误差。

对于特定管道的探伤工作，需要特定地标点的定位及探测杆对齐，此类情况下机器人自定位路径如图8所示。对于特定管道的机器人自定位，则首先需要机器人到达参考点，然后沿着激光线以曼哈顿距离式到达指定地标点。



图8 特定管道机器人自定位路径示意图

测量管道中心线与探测杆中心线是否良好对齐，常用的方法是双目视觉立体测量法，但此方法存在硬件需求相对较高，数据量相对较大等问题，故在机器人完成地标点自定位之后，使用单目模板匹配的方法进行偏移测量。在机器人完成地标点自定位后，利用探测杆顶部承载相机获取当前地标点对应管道端面图像信息，再将该图像信息与最初取样的基准模板进行比对，则可以获得探测杆与管道中心偏移量。具体过程如图9所示，假定图9(a)为基准模板，基准模板坐标系为，图9(b)为当前地标点相机所获得的图像信息。则偏移量可以表示为点与点间的平移矩阵，此偏移量可以表征探测杆与管道中心的偏移量，即机器人自定位误差偏移。故在反馈机器人调节此偏移，使探测杆与管道良好对齐情况下，重新修正机器人的定位地标点，消除在当前地标点产生的定位误差。



图9 模板匹配测量偏移量示意图

针对实际应用中码盘里程数据精度低引起的机器人姿态角不准确的问题，可以在机器人上加装陀螺仪，采用扩展卡尔曼滤波的方法融合码盘数据和陀螺仪数据，以提高机器人位姿测量的精度，并校正机器人的运动状态，以便更优地完成地标点的定位。