

硕士学位论文

一种八自由度的隧道自动喷浆机器人

A Tunnel Automatic Shotcrete Robot Based on 8-DOF  
Manipulator

学科专业：控制科学与工程

学科方向：模式识别与智能系统

作者姓名：宋迪

指导教师：谢斌 副教授

中南大学

2019年5月



中图分类号 TP391.4

学校代码 10533

UDC 004.8

学位类别 学术学位

## 硕士学位论文

### 一种八自由度的隧道自动喷浆机器人

### A Tunnel Automatic Shotcrete Robot Based on 8-DOF Manipulator

作者姓名：宋迪

学科专业：控制科学与工程

学科方向：模式识别与智能系统

研究方向：智能机器人

二级培养单位：自动化学院

指导教师：谢斌 副教授

论文答辩日期\_\_\_\_\_

答辩委员会主席\_\_\_\_\_

中南大学

2019年5月



## 学位论文原创性声明

本人郑重声明，所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了论文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中南大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我共同工作的同志对本研究所作的贡献均已在论文中作了明确的说明。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

作者签名：\_\_\_\_\_ 日期：\_\_\_\_\_年\_\_\_月\_\_\_日

## 学位论文授权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解中南大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和电子版；本人允许本学位论文被查阅和借阅；学校可以将本学位论文的全部或部分内 容编入有关数据库进行检索，可以采用复印、缩印或其它手段保存和汇编本学位论文。

保密论文待解密后适应本声明。

作者签名：\_\_\_\_\_

导师签名\_\_\_\_\_

日期：\_\_\_\_\_年\_\_\_月\_\_\_日

日期：\_\_\_\_\_年\_\_\_月\_\_\_日



## 一种八自由的隧道自动喷浆机器人

**摘要：**目前，隧道建设中的隧道面初喷主要由人工操控多自由度的喷浆机械手完成。由于隧道环境恶劣、工作劳动强度大，该工作对施工人员身体伤害极大，在隧道面初喷时采用全自动喷射代替人工喷射是社会发展的必然趋势，然而当前国内外对于隧道面自动喷涂技术的研究极少。基于此，本文对一款八自由度隧道喷浆机械臂进行了全自动喷浆系统的设计。

摒弃了传统的 D-H 参数法，本文设计了一种简单有效的进行正向多自由度冗余机械臂的正向运动学模型的方法；逆向运动学模型通过固定关节角法求解。本文采用二维单线激光雷达加装电控云台的方式实现隧道面三维数据的采集，并对原始点云数据进行了去噪、采样、中轴线提取和隧道特征提取等处理；采用点云切片技术处理三维点云数据，基于点云切片并根据待喷面检测结果实现最优喷涂轨迹规划。结合驱动特性、负载情况等多方面因素考虑，设计了基于分段 PID 的控制算法，控制机械臂各关节运动以实现全自动喷浆。在对原机完成了硬件改装后（加装了负责上层运算的工控机，负责运动控制的运动控制器以及各类传感器），本文设计开发了一套自动喷浆机的上位机控制平台，操控模式分为全自动和半自动喷射。

本文所设计的自动喷浆机器人在搭建的模拟隧道环境下进行了真机实验，实验结果证明了其能够全自动的实现三维扫描、待喷面识别、轨迹规划和运动控制等功能，说明本文设计的机器人系统具有隧道全自动喷浆的可行性。

图 53 幅，表 14 个，参考文献 71 篇

**关键词：**八自由度机械臂；运动学建模；三维重建；轨迹规划；运动控制

**分类号：**TP391.4

# A Tunnel Automatic Shotcrete Robot Based on 8-DOF Manipulator

**Abstract:** At present, the tunnel surface initial spraying of the tunnel construction is mainly completed by manually controlled multi-degree-of-freedom shotcrete robots. Due to the harsh environment of the tunnel and the high labor intensity, the work is extremely harmful to the construction workers. It is an inevitable trend of social development to use automatic spraying instead of manual spraying when doing tunnel surface initial spraying. However, there is very little research on automatic surface spraying at home and abroad. This paper designs an automatic shotcrete system for an 8-DOF tunnel shotcrete manipulators.

This paper designs a method based on translational rotation operation for the forward kinematics model instead of the traditional D-H table; The inverse kinematics model is solved by the fixed joint angle method and the pose separation method. The 2D Lidar is installed with the electronically controlled pan to obtain the 3D point- cloud data of the tunnel surface which is processed by denoising, sampling, central axis extraction and tunnel feature extraction. Then, the 3D point-cloud data is processed by the point-cloud slicing technology, and the optimal spraying trajectory planning is realized according to the detection result of the surface to be sprayed. Considering various factors such as comprehensive drive characteristics and load conditions of the manipulator, this paper designs a segmented PID-based control algorithm to control the joint movement of the arm to achieve automatic shotcrete. After the hardware modification of the original machine (with the industrial computer responsible for the upper layer operation, the motion controller responsible for the motion control and various types of sensors), this paper designs the control platform of the automatic shotcrete robot, and the operation mode is divided into automatic and Semi-automatic spraying.

The real machine experiment verification is carried out under the simulated tunnel environment, which can realize the 3D reconstruction of the surface to be sprayed, the trajectory planning and the motion control

function. It shows that the robot system designed in this paper has the feasibility for tunnel automatic spraying.

**Keywords:** 8-DOF Manipulators; kinematics model; 3D reconstruction; trajectory planning; motion control

**Classification:** TP391.4

# 目 录

摘 要:	I
Abstract:	II
1 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 多自由度机械臂运动学建模研究	3
1.2.2 隧道复杂环境感知及重建研究	4
1.2.3 机械臂轨迹规划及跟踪控制研究	5
1.3 研究目的与主要研究内容	6
1.3.1 研究目的	6
1.3.2 主要研究内容	7
1.4 本章小结	9
2 喷浆机器人八自由度机械臂的运动学建模	10
2.1 基于旋转平移的正向运动学建模	10
2.2 基于固定角法的逆向运动学建模	11
2.3 运动学实机验证	13
2.4 本章小结	14
3 隧道待喷环境的感知与重建	15
3.1 三维扫描系统概述	15
3.2 激光雷达坐标系的标定	16
3.3 三维重建隧道成像	18
3.3.1 隧道点云数据预处理	19
3.3.2 隧道中轴线提取	20
3.3.3 基于点云切片的隧道特征识别	22
3.4 本章小结	28
4 喷浆机器人末端喷头笛卡尔空间轨迹规划	29
4.1 喷浆空间坐标变换	29
4.2 基于点云切片的末端喷头轨迹规划	30
4.3 本章小结	34
5 喷浆机器人八自由度机械臂的轨迹跟踪控制	35
5.1 喷浆机器人底层控制	35

5.1.1 基于经典位置式 PID 的单关节控制 .....	35
5.1.2 基于模糊 PID 的单关节控制 .....	37
5.1.3 基于分段 PID 的单关节控制 .....	39
5.2 八自由度机械臂轨迹跟踪算法 .....	41
5.2.1 轨迹跟踪算法概述 .....	41
5.2.2 机械臂抖动抑制 .....	42
5.3 目标控制轨迹仿真 .....	43
5.3.1 目标控制轨迹仿真目的 .....	43
5.3.2 目标控制轨迹仿真步骤 .....	44
5.4 实际控制效果测试 .....	44
5.5 本章小结 .....	45
6 自动喷浆机器人的系统集成及模拟隧道实验 .....	46
6.1 自动喷浆机器人系统集成 .....	46
6.1.1 硬件改装 .....	46
6.1.2 软件开发 .....	47
6.2 模拟隧道实验 .....	48
6.2.1 实验目的 .....	48
6.2.2 不带负载的运动轨迹实验 .....	48
6.2.3 带负载的喷水运动轨迹实验 .....	50
6.2.4 实验分析 .....	51
6.3 本章小结 .....	55
7 工作总结与展望 .....	56
7.1 论文总结 .....	56
7.2 工作展望 .....	57
参考文献 .....	59
攻读硕士期间主要研究成果 .....	65
致谢 .....	66

# 1 绪论

## 1.1 研究背景及意义

步入 21 世纪以来，随着科技的发展，机器人的应用领域越来越多样化。尤其在工业领域，机器人的应用极为常见，工业机器人能够解放生产力，更高效安全。隧道喷浆机是一种工业机器人，它是一种广泛应用于铁路公路隧道、地下建筑、各类矿山和水利水电工程施工的工程设备。

隧道是人们用以克服复杂地形、充分利用地理空间建设公路、铁路的重要建筑形式。隧道初喷前隧道表面存在多种支护结构，如拱架、防护网等。隧道初喷指隧道表面的第一层喷涂，使隧道表面由原始壁面变为较为光滑规则的表面。由于施工环境复杂、喷浆机器人自动化水平较低等多重因素的影响、国内外喷浆机器人进行隧道的施工作业过于依赖手动操作，耗费大量人力物力，且喷浆的质量和效率也主要取决于工人的经验。在实际工作中，由于隧道施工环境恶劣，长期处于这种环境会严重影响工人的身体健康，实际隧道施工环境如下图 1-1 所示。企业要聘请这些操控手也需要一笔不小的开销，由于以上原因，往往很难找到合适的操作手，这也严重降低了隧道施工效率。



图 1-1 人工隧道喷射示意图

根据《“十三五”现代综合交通运输体系发展规划》中的建设目标，铁路提出要构建横贯东西、纵贯南北的“十纵十横”综合运输大通道，未来几年将新增铁路营运里程 2.9 万公里，高铁增加 1.1 万公里；公路将增加 42 万公里，新建改建高速公路

2.6 万公里。加上大城市地铁轨道工程，我国仅隧道开挖每年就有上千公里，当前隧道初喷的施工方式在一定程度上阻碍了铁路公路隧道开发建设之路。随着科技的发展和湿喷工艺的推广，全自动喷浆机械臂代替人工喷射已成为必然的趋势，研制自动喷浆机器人具有极大的社会意义和学术价值。

随着人工智能的迅速发展，人类社会已开始迈入智能化时代，人工智能引领社会发展是大势所趋，不可逆转。习总书记多次强调应大力发展人工智能，智能工业机器人是智能工业发展的重中之重。目前全行业对于全自动的隧道喷浆机器人研究尚在起步阶段，尚未见到规模量产的全自动喷浆机器人产品，相关研究具有极高的技术含量以及巨大的经济价值。

## 1.2 国内外研究现状

当前隧道智能工业机器人的研究集中在隧道监测评估[2-6]等方面。吉林大学的周强[2]设计了一种地下隧道及工程监测用移动式机器人，研究了移动式机器人系统的运动规划、地下隧道各类信息的获取、机器人系统的运动控制问题等。Rubinstein 等人[3]提出了一种新型的自主隧道测绘机器人，LITANK-LIDAR 坦克；该机器人完全依赖激光雷达传感器，而不使用其他传感器，利用点云配准进行实时同步定位。Loupos 等人[4]设计了一种自主检测隧道的机器人平台，由电梯、高精度机械臂、先进视觉系统、3D 激光扫描仪和超声波传感器组成。Protopapadakis 等人[5]介绍了一种用于隧道评估的机器人自动检测平台，该平台能够在民用基础设施内自主导航，获取立体图像并对其进行处理分析，通过深度学习方法进行裂纹检测。Menendez 等人[6]介绍了一种用于隧道缺陷检测的半监控计算机视觉系统，以及一种用于检测裂缝宽度和深度的超声波传感器机器人工具。此类文献对于本文研究内容中的硬件改装、环境感知重建与轨迹规划有一定参考作用。

对于智能多自由度工业机器人的研究主要集中在六自由度工业机器人、工业涂胶机器人、抓取物体机器人和基于不同应用场景的机器人控制仿真等领域[7-12]。韦帅[7]设计研发了一套适用于六自由度涂胶工业机器人的控制系统，研究其运动学建模、轨迹规划以及多自由度机械臂的控制方法。王海果[8]介绍了一种基于 EtherCAT 通信协议的多自由度机器人控制仿真系统，该系统可通过控制实体机器人运动的同时实现仿真软件中的虚拟机器人运动，完成相同的运动轨迹，实现实时一致性。Hanh 等人[9]将立体视觉和基于图像的视觉服务与模糊控制器（IBVSFC）相结合，设计了可以自动抓取静止、随机定位的矩形物体的 6 自由度工业机器人。Liu 等人[10]提出了一种基于 6 自由度工业机器人的姿态估计技术与智能抓取系统，使机器人能够在非正规姿态下抓取大型零件。Luo 等人[11]设计了一种非接触动态避障的七自由度机器人系统；实现子系统包括：三维模型对象识别，数据库对象获取和非接触安全避障。Kadir 等人[12]设

计了一种自主装卸重型负载的工业机器人，加装了传感器使得机器人有能力避免碰撞与途中的任何障碍。此类文献对于本文研究内容中的环境感知重建与轨迹规划有一定参考作用。此类文献对于本文研究内容中的软件开发、运动学建模以及系统仿真有一定参考作用。

综上可知，针对于隧道初喷施工的自动喷浆机器人的相关研究极少，没有发现对基于八自由度串联机械臂的自动喷浆机器人的研究与实现，且世界范围内尚未见到规模量产的全自动喷浆机器人产品，故本部分对基于八自由度串联机械臂的自动喷浆机器人的综合研究，接下来将按照与其相关的主要研究内容，分运动学建模、环境感知与重建以及轨迹优化及跟踪三大方面进行针对性探讨。

### 1.2.1 多自由度机械臂运动学建模研究

运动学建模包括正向运动学建模和逆向运动学建模。正向运动学的求解比较简单，根据不同自由度与机械结构各不相同。拥有一个机器人的关节变量,我们能够确定机器人的位置和姿态的每一个环节,对于一个给定的一组机器人的几何特征[13]。常见的方法有 DH 表法[14-16]，用于自由度较少的机械臂比较方便，而求解多自由度的机械臂（超过 6 自由度）便比较繁琐。

一般满足 PIEPER 法则的特殊几何结构的逆运动学求解即为机器人逆运动学求解，对于这种问题，一般适用传统的分离变量法来求解[17-19]。对于满足封闭解的逆向求解，可以通过旋转量子理论求解非线性方程组，得到机器人的逆运动学解[20]；不满足封闭解的可采用解析法和数值法结合的解法[21]。机器人逆运动学的求解的常见方法还有代数法、数值法，但都需要其几何结构满足特定要求，且计算量较大。以上方法很难运用于求解超过 6 自由度机械臂的逆解，李向东[22]提出了一种七自由度机械臂的逆解求解方法，建立单个关节运动的特定区间，利用特定区之间的交集求得所有可行逆解，完美的解决了特定问题，但适用性不够好。Xin 等人[23]提出了适用于实际工程应用的七自由度工业机器人的逆解方法，建模方法简单但不适用于更多自由度的机械臂。REN 等人[24]提出了一种可用于八自由度机械臂逆解问题的方法，提出了一种基于生物地理学的优化（BBO）和差分进化的混合生物地理学优化算法，该算法收敛性能不够好，耗时较长，不适用于快速求解的隧道施工环境。目前，国内外对于多自由度冗余结构机械臂的逆向运动学研究较为稀少，Whitney[25]通过最小范数法求得了冗余自由度机械臂的逆运动学解，Zhang[26]使用粒子群算法来求得冗余机械臂的逆运动学解等，但是以上方法难以满足工业实时性要求，一般仅用于离线条件下的计算求解。

### 1.2.2 隧道复杂环境感知及重建研究

环境感知与重建是指获得隧道内表面的三维点云并进行处理。隧道初喷指隧道爆破后在其表面的第一层喷涂，此时隧道内表面为形状多变的岩石断面，且上面可能安装有拱架、防护网等多种支护结构[27]，是整个隧道建设过程中实现三维重建与检测面临的最复杂的场景之一。由于激光雷达技术具有高精度和高点密度，比全站仪等传统设备采集速度快、操作方便，比相机及 TOF 红外相机在抗粉尘干扰、不需额外光源等方面具有优势，因此在隧道测量方面应用越来越广泛[28]。

本文所涉及的环境感知与重建主要研究隧道激光三维点云的数据处理与特征结构的识别，应用于全自动隧道喷浆机器人的喷浆轨迹规划。与之相关的研究集中在爆破隧道的超欠挖量计算与岩体爆破特性[29-31]、已建成隧道的断面变形与施工质量监测[32, 33]、移动的隧道中轴线提取与隧道点云拼接[34-37]以及隧道点云数据参数化存储与可视化[38-41]等方面。

Feketea 等人[29]介绍了钻探和爆破隧道中三维激光扫描系统的岩土工程和操作应用，系统采用静态激光雷达系统进行扫描，可以远程获取详细的岩体和挖掘信息，包括：喷射混凝土厚度的计算，竣工螺栓间距和潜在泄漏区域等。Daraei 等人[30]介绍了一种新的隧道施工损坏区域的预测方法，利用数值模拟来模拟隧道周围的开发区边界，超挖深度根据岩石强度系数计算，该方法可以用来预测超挖深度，便于估计更精确的喷射混凝土和隧道施工成本。

Zhua 等人[32]设计了一种基于椭圆圆柱模型的隧道点云过滤方法，首先将原始激光点云数据投影到水平面上，并提取搜索算法提取两侧的边缘点，进一步用于拟合隧道中心轴。沿着轴线，点云在区域上被分段，然后通过迭代拟合为平滑的椭圆柱面，该方法为地铁常规运行和维护中隧道断面的全方位变形提供了一种新的模式。Yuhui 等人[33]针对传统隧道间隙检测方法存在的问题，如低密度，低速度和大量人工操作，提出了一种基于移动激光扫描系统 (MLS) 获得的三维点云的隧道间隙检测方法，其精度可达 0.03 m，可有效计算出不同类型的间隙。

Mostafa 等人[34]提出了采用移动光探测和测距 (LiDAR) 数据的地铁隧道竣工模型生成的全自动方法，采用的数据集由 Velodyne HDL 32E 提供，覆盖 155 米的含有 600 万点的地铁隧道。首先，提取隧道的主轴和横截面；再通过将椭圆拟合到每个提取的横截面来创建初步模型，该模型通过使用残差分析和 Baarda 的数据窥探方法来消除异常值；然后通过对无外延数据应用最小二乘法调整来生成最终模型。横截面的平均半长轴为 7.8508 m，标准偏差为 0.2 mm，半短轴为 7.7509 m，标准偏差为 0.1 mm。与构建的模型的平均法线距离（平均绝对误差）也是 0.012 米。所开发的算法适用于具有任何水平方向和曲率度的隧道，但限于比较平整的隧道。Mendes 等人[38]讨论了在隧道中处理和呈现通过激光扫描获得的 3D 点云的方法的实现，开发了一种算法来

自动处理在隧道中获得的点云，以产生可以分析的整流图像。以上方法可本文对于隧道的三维感知与重建具有一定借鉴价值。

### 1.2.3 机械臂轨迹规划及跟踪控制研究

机器人轨迹规划包括笛卡尔空间轨迹规划与关节角度空间轨迹规划[42]。关节角度规划常采用 B 样条插值、多项式插值、抛物线插值[43,44]，线性插值等方法[45-47]；笛卡尔空间的轨迹规划一般使用基于直线获知圆弧的插补法等[48-51]。本文涉及的轨迹规划为机械臂末端喷头的主要是笛卡尔空间的轨迹规划。

林威等人[48]研究了在笛卡尔坐标系中工业机器人空间直线及圆弧轨迹规划问题，提出利用抛物线过渡的空间直线插补算法和基于局部坐标系的空间圆弧插补算法，该直线和圆弧插补算法能保证机器人运行平稳，轨迹衔接平滑，此方法对多自由度工业机器人适用性不够理想。Jiang 等人[49]提出了可用于与六自由度钢索悬吊并联机器人的对点的动态轨迹规划方法，每个轨迹段的目的是平移和旋转速度为零的端点；过渡段之间的平移和旋转加速度连续性，此方法不适用于八自由度串联机械臂。Chen 等人[50]本文结合了 7 自由度机械手的应用护理机器人，提出了基于笛卡尔空间的加速度连续，梯形速度曲线的轨迹规划方法，可适用于多自由度串联机械臂，但护理机器人与本文所涉及的机器人在驱动特性以及机械结构上有所区别。Lu 等人[51]提出了一种新的基于 7 自由度机械手的笛卡尔空间轨迹规划方法，在笛卡尔空间中，建立了五次多项式插值算法。以上方法对于本文所研究的轨迹规划具有巨大的参考价值。

轨迹跟踪控制的目的是将给定的轨迹数据完美的实现，使得实际轨迹与期望轨迹的贴合度高[52]。常见的机械臂的轨迹跟踪控制方法有先进 PID 控制、神经网络自适应控制等[53-55]。多自由度冗余机械臂的轨迹跟踪控制方法一般有动态 PID 控制、模糊自适应控制、带补偿的 PID 控制等[56-59]。多自由度冗余机械臂的轨迹跟踪控制需要消除机械臂负载等影响因素 [60-62]。本文所涉及的基于八自由度串联机械臂的轨迹跟踪控制研究包括机械臂单关节控制、多关节联动控制以及负载抖动等影响因素的抑制。

Jinkun[53]以机器人为对象，对先进 PID 控制、神经网络自适应控制、模糊自适应控制、迭代学习控制、反演控制、滑模控制、自适应鲁棒控制等方法进行了研究探讨，具有极大参考价值。具体的，Cho 等人[54]介绍了通过基于神经网络的 PID 控制方案控制气动伺服系统的机器人，利用神经网络学习和固有的非线性补偿，推导出动态线性模型的设计参数，此方法设计较为复杂，且不适用于离线控制场合。Yoo 等人[55]设计了基于双连杆平面机器人机械手的动态自适应控制方法，结合机器人动力学的性质和不确定性函数的分解，减少模糊规则的数目，该方法速度较快，但不适用于液压驱动的八自由度机械臂系统。余秋蕾[56]为七自由度串联机械臂的控制提供了一套有

效的基础理论方法，建立了一种基于分段重力补偿的模糊 PID 控制器,建立了仿真模型，对控制效果进行了分析验证，此方法性能优越但对于八自由度的机械臂适用性不够好。Lombai 等人[58]提出了一种适用于六自由机械臂的轨迹跟踪控制方法，单关节的轨迹跟踪是使用离散时间线性控制器的设计来实现。朱明超[60]通过采用神经网络补偿控制器，提高轨迹跟踪控制的性能，缺点是耗时比较长。赵翀[62]设计了一种模糊自适应补偿控制器，对柔性机械臂系统中的不确定扰动因素系进行了很好的补偿，控制效果比较理想，对于刚性机械臂的去扰效果不够好。以上文献对于本文所研究的轨迹跟踪控制具有巨大借价值。

### 1.3 研究目的与主要研究内容

#### 1.3.1 研究目的

本课题的研究目标是对一款八自由度隧道喷浆机械臂进行智能化改造，使其能够脱离人工的控制，实现对隧道面全自动喷浆。目前，全行业对于全自动隧道喷浆机器人的研究较少，尚未见到规模量产的全自动喷浆机器人产品。本文针对上述问题提出了一种全新的自动喷浆系统，系统通过对隧道面进行三维重建得到喷射对象的点云模型，根据点云模型自动规划出末端喷头的喷射轨迹，结合逆向运动学模型求解得出各个关节变化序列，并将其输入到机械臂的运动控制器中，最终实现机械臂对隧道面自动喷浆的目的。

本文研究内容主要涵盖三大技术内容：①施工设备的建模（运动学建模）；②施工面的识别及建模（三维重建）；③自动化施工作业轨迹规划及智能控制（轨迹规划与轨迹跟踪控制）。喷浆机（KC 系列）如图 1-2 所示，机械臂全长约 17 米，原机共九个自由度，由于最后一个关节是使喷浆均匀的 360°旋转关节（末端喷嘴），故在运动学建模时忽略，视为共八个自由度：



图 1-2 喷浆机（KC 系列）

### 1.3.2 主要研究内容

实现指定型号(KC 系列)喷浆机的自动喷射施工作业,需综合硬件和软件两部分考虑。

#### (1) 硬件部分:

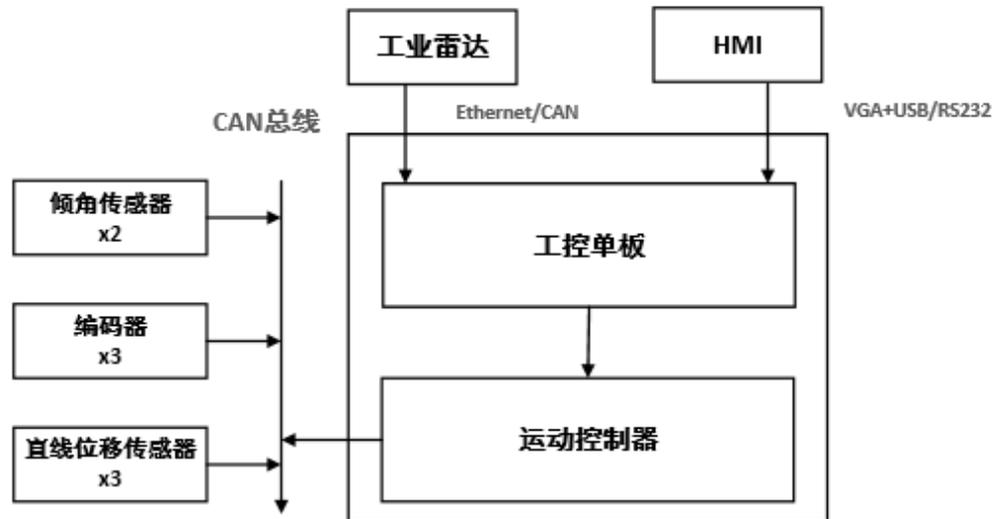


图 1-3 硬件系统框架图

硬件系统总体框架如上图所示。硬件架构主要针对实时运动控制及快速环境感知两大核心任务展开,前者通过各关节传感器数据及规划结果实时控制机械臂去完成指定动作;后者接收环境感知传感器(主要是激光雷达)数据快速完成环境感知任务并输出规划结果。机械臂的各关节类型及的关节传感器使用情况如下,其中五号关节由于机械结构限制,采用油缸伸缩长度换算成旋转角度的测量方式;在精度测算上,油缸伸缩长度 1mm 对应于旋转角度  $0.1^\circ$ 。

表 1-1 各关节传感器参数要求及使用情况

关节号	关节类型	量程要求	精度要求	传感器类型
1	旋转	$360^\circ$	$0.1^\circ$	编码器
2	俯仰	$180^\circ$	$0.1^\circ$	倾角传感器
3	伸缩	3000mm	1mm	直线位移传感器
4	俯仰	$180^\circ$	$0.1^\circ$	倾角传感器
5	旋转	$360^\circ$	$0.1^\circ$	直线位移传感器
6	伸缩	2000mm	1mm	直线位移传感器
7	旋转	$360^\circ$	$0.1^\circ$	编码器
8	旋转	$240^\circ$	$0.1^\circ$	编码器

核心运算单元上本文采用实时运动控制器和工控单板结合的方式,前者提供实时

控制运算及输出能力，后者提供较强的运算能力；HMI 为用户人机交互的人机界面，其可用于系统配置调试、实时数据显示及用户操作等场景。

(2) 软件部分，软件模块划分图如下图所示：

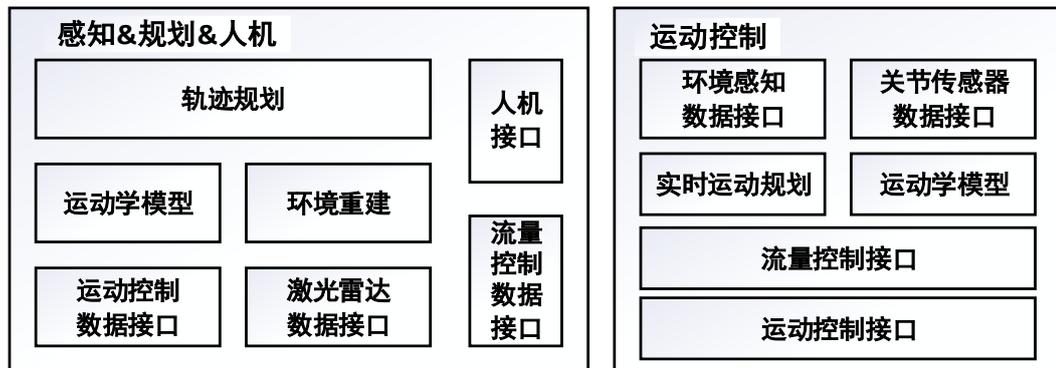


图 1-4 软件模块划分图

自动喷浆机器人的软件模块主要分为感知&规划&人机和运动控制两大块。其中感知&规划&人机主要包含运动学模型、环境感知与重建和运动轨迹规划三大研究内容，运动控制部分主要是运动轨迹跟踪控制的研究与实现。具体如下：

#### 主控单板模块（感知&规划&人机）：

##### ■ 运动学模型：

- 正向运动学输入：传感器传回的各个关节变量的具体值；
- 正向运动学输出：末端喷头对应于基坐标系的具体位置和朝向；
- 逆向运动学输入：末端喷头相对于基坐标系的变换矩阵（包括位置变化和角度变化，由环境感知与重建和运动轨迹动态规划给出）；
- 逆向运动学输出：各个关节的变化量；

##### ■ 环境感知及重建

- 输入为雷达扫描的数据；
- 输出观测点路径规划，包括一连串观测点位置和朝向，观测点的坐标是相对于喷浆机基座（一号关节）的坐标系；输出车辆左右相对隧道壁的距离、朝向，隧道壁（待喷涂面）各点的三维数据（数据是相对于关节 6 的坐标系）以及相对于每个观测点的喷头末端的目标喷涂位置和朝向；

##### ■ 运动轨迹动态规划

- 输入为环境感知及重建给出的所需喷涂面的扫描模型，包括整个隧道的坐标建立；
- 输出为是一段期望运动轨迹，包括若干个位置点数据，数据包括末端位置和朝向（基于基坐标系），由上一点到下一点之间的运动过程通过调用运动学建模转换成关节变化量；

#### 运动控制器模块（运动控制）：

##### ■ 运动轨迹跟踪控制

- 输入为上层主控单板模块给出的末端位置的期望目标轨迹数据, 包括每个点的对应基坐标系的位置与朝向, 各关节运动的期望变化量等;
- 输入为各关节传感器传回的实际数据, 通过正向运动学解算和控制算法可获得末端位置相应时刻的实际位置和朝向;
- 输出为经过控制算法调整后的各关节变化量数据, 转化为关节驱动量后经由 CAN 通信网络传至对应驱动关节以实现期望控制效果。

## 1.4 本章小结

纵观国内外对于运动学解算、环境感知与重建以及轨迹优化及跟踪三个大方面的研究现状, 学术研究成果较丰富, 但结合实际的应用价值有限、集成性较低, 世界范围内尚未见到规模量产的全自动喷浆机器人产品, 对于适应特定隧道施工场景的八自由度自动喷浆机器人整体系统的研发具有重大挑战性及先导性, 同时也具有巨大学术及商业价值。

文章余下各章节的内容分配: 第 2 章介绍对于机械臂的运动学建模; 第 3 章介绍对施工环境的感知与重建方法; 第 4 章介绍喷嘴的轨迹规划研究内容; 第 5 章对于机械臂的联动控制算法展开阐述; 第六章对整机进行模拟隧道实验并分析; 第 7 章对全文进行总结与展望。

## 2 喷浆机器人八自由度机械臂的运动学建模

机器人的运动学建模是实现机器人轨迹规划和控制的基础，主要包括正向运动学与逆向运动学两个方面。其中，正向运动学建模的目的是根据已知机械臂八个关节变量，计算出末端喷嘴相对于机体基坐标系的变换矩阵，该矩阵能够提供末端喷头相对于机械臂基座的位置和朝向信息。而逆向运动学建模的目的是根据末端喷头相对于基础坐标系的位置和朝向，反向求出此时机械臂的各个关节的运动参数。

### 2.1 基于旋转平移的正向运动学建模

考虑到本文所涉及的机型为八自由度机械臂，且同时存在旋转与伸缩两种关节，使用传统的 D-H 参数法来建立正向运动学模型不仅较为复杂，还会增大逆向运动学求解的难度。因此，针对正向运动学模型，摒弃了传统的建立 D-H 参数表的方法，取而代之的是在机械臂基座建立一个基础坐标系后，直接对基坐标系进行平移操作，移动到下一个关节的中心位置，若下一个关节为平移关节，则继续对坐标系进行平移操作；若下一个关节为旋转关节，则对坐标系进行旋转操作，以此类推得到最终的各关节坐标系（如图 2-1 所示）。

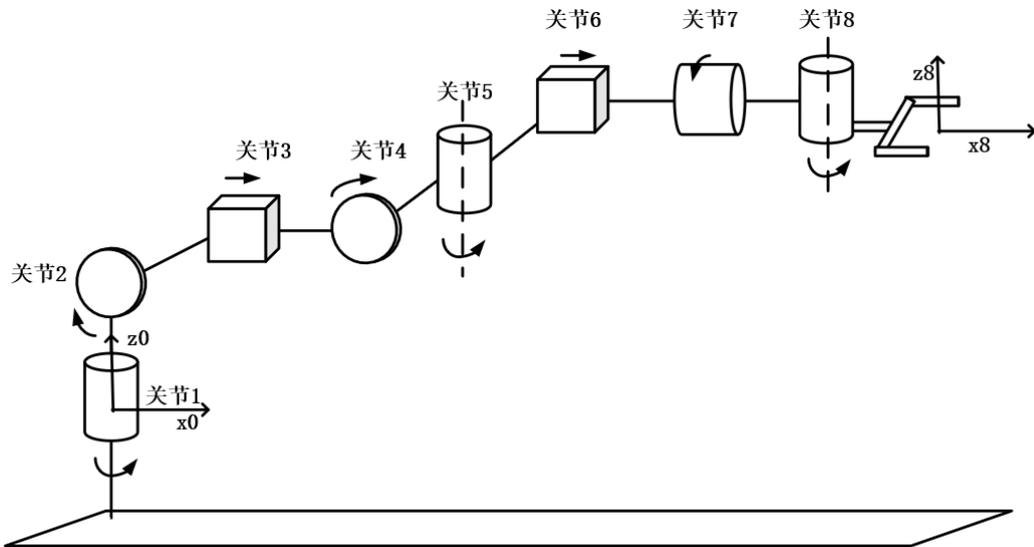


图 2-1 机械臂的结构简图及各关节坐标系建立情况图

空间中某点由矢量  $ai + bj + ck$  描述。其， $i, j, k$  为轴  $X, Y, Z$  上的单位向量。平移操作的齐次变换矩阵为：

$$\text{Trans}(a, b, c) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

旋转操作对应  $x, y, z$  轴三个方向, 对应于  $x, y, z$  作转角为  $\theta$  的旋转变换[63], 分别可得变换矩阵:

$$\text{Rot}(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

$$\text{Rot}(y, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

$$\text{Rot}(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

本文以 KC 系列机械臂为例建立正向运动学模型, 其中包含六个旋转关节和两个伸缩关节, 正向运动学模型的结果即为各个关节坐标系变换矩阵的乘积, 即

$${}^0_8T = {}^0_1A_1 {}^1_2A_2 {}^2_3A_3 {}^3_4A_4 {}^4_5A_5 {}^5_6A_6 {}^6_7A_7 {}^7_8A_8 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

式 (2-5) 中, 左边的  ${}^0_8T$  表示从基坐标系到末端喷头的变换矩阵, 右边的  ${}^i_jA$  表示表示从第  $i$  个关节至第  $j$  个关节的变换矩阵,  $[p_x, p_y, p_z]^T$  表示末端喷头的位置,  $\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$  表示喷头的朝向。

## 2.2 基于固定角法的逆向运动学建模

本文采用基于固定关节角法[64]的求解方法进行逆向运动学模型的求解。由于对八自由度的机械臂直接求解的难度和计算量巨大, 实际情况证明, 如果不简化模型, 本机的逆向运动学结算是没有办法得到完全解的; 在对机械臂进行驱动测试和隧道实际调研后, 结合机械臂结构和实际施工时对机械臂末端可达空间的要求等因素的考虑, 本文选择从八个关节中将第五号旋转关节和第六号伸缩关节固定, 其关节数据作为已知变量, 然后根据正向运动学模型的结果求解剩余六个关节的解析解, 这样在减少了运算量的同时也获得了全部解析解, 且满足实际工况要求的末端喷嘴可达范围。

对于逆向运动学模型, 第一步, 假定需要使得机械臂末端达到某一个朝向和某一个位置, 此时机械臂末端坐标系相对于基坐标系的变换矩阵已知, 设为  $R$ :

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

则：

$$R = {}^0_8T = {}^0_1A_1^2A_2^3A_3^4A_4^5A_5^6A_6^7A_7^8A \quad (2-7)$$

第二步，由于 1 号关节相对于基坐标系的变换矩阵为：

$${}^0_1A = \begin{bmatrix} C\theta_1 & S\theta_1 & 0 & 0 \\ -S\theta_1 & C\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

其他关节的相对于其前一个关节的变换矩阵可由正向运动学中所介绍的旋转平移操作得到类似于式（2-8）的公式。

对式（2-7）左右两边分别乘以 ${}^0_1A^{-1}$ ，得到：

$$\begin{aligned} & {}^0_1A^{-1} * R \\ &= \begin{bmatrix} r_{11}C\theta_1 + r_{21}S\theta_1 & r_{12}C\theta_1 + r_{22}S\theta_1 & r_{13}C\theta_1 + r_{23}S\theta_1 & p_xC\theta_1 + p_yS\theta_1 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z - d_1 \\ r_{11}S\theta_1 - r_{21}C\theta_1 & r_{12}S\theta_1 - r_{22}C\theta_1 & r_{13}S\theta_1 - r_{23}C\theta_1 & p_xS\theta_1 - p_yC\theta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-9) \\ &= {}^1_2A_3^2A_4^3A_5^4A_6^5A_7^6A_8^7A \end{aligned}$$

由上式可根据左右两边矩阵对应位置的元素相等，建立多个等；若左乘 ${}^0_1A^{-1}$ 仍然难以求解，则继续两边同时乘以 ${}^1_2A^{-1}$ ，然后列等式，依次类推，直到列出的等式能够求解出各个关节的解析解。得到第一个关节的逆解解析式为：

$$\theta_1 = \arcsin\left(\frac{a_1}{\sqrt{(A^2+B^2)}}\right) - \arctan\left(\frac{B}{A}\right) \quad (2-10)$$

其中，

$$\begin{aligned} A &= (a_2 + a_3) * r_{13} - p_x + a_3 * r_{12} + a_4 * r_{11} \\ B &= -p_y + (a_2 + a_3) * r_{23} + a_5 + a_4 * r_{21} \end{aligned} \quad (2-11)$$

$a_i(i = 1,2,3,4,5)$ 为已知的机械臂的结构参数。

由第一个关节的解析解，通过上述列出的等式可以依次得到后续关节的解析解，对于每一个变换矩阵，经过逆向运动学可以求得 16 组解。我们将求解出的这 16 组解分别带入正向运动学模型，计算得到的 16 个变换矩阵，与求解该逆解时输入的变换矩阵完全一致，从而验证了逆向运动学模型的正确性。

机器人逆运动学解是一个多解问题，要利用逆运动学解来驱动机器人关节运动，需要多组解中选出最适合机械臂实际运动轨迹的解。逆解选解问题的常见解决方法时满足最短行程原则法[17]，即通过利用“多移动小关节，少移动大关节”的原则来进行优化。

基于此，我们对逆向运动学模型求解出的 16 组解增加筛选条件，包括当前解与上一组解各个关节变量的变化尽可能最小；优先改变距离末端更近的关节的关节变量，即遵循“多移动小关节，少移动大关节”的原则；俯仰、横摆等旋转关节以及伸缩等移动关节的增量方向尽可能保持一致等。通过以上筛选条件可以选出最优的一组解作为机械臂运动时需要输入的关节变量。

### 2.3 运动学实验验证

要验证 1-8 号关节的正逆运动学模型，需要进行实际测试。首先要确定一个基坐标系，然后调节机械臂 1-8 号关节到达任意一组角度，确定关节 8 处此时实际的坐标系相对于基坐标系的变换矩阵，变换矩阵的求取方法如下：先用皮尺量出 8 号关节处的 X, Y, Z 轴相对于基坐标系的位置，具体的，由于之前建立的模型中基坐标系的中心是放在关节 1 的中心位置，实际验证时不方便量测，所以可以将基坐标系平移到关节 1 坐标系正下方，并假设平移距离为  $d$ ，其中 X, Y, Z 轴的方位和之前建模时候的方位一致。从关节 8 坐标系原点处挂一条垂线，先用皮尺量出垂线到地面的距离，减去  $d$  作为 z 轴方向的位置变换，然后在垂线接触到地面的地方做一个标记，设这个点为 A，然后沿着基坐标系 X 轴方向用粉笔做延伸，从标记处往 X 轴延伸线做一条垂线，这条垂线与 X 轴延伸线的交点设为 B，设基坐标系原点为 O，则 OB 的距离即为 X 轴方向的位置变换。AB 的距离即为 Y 轴方向的位置变换。示意图如图 2-2 所示：

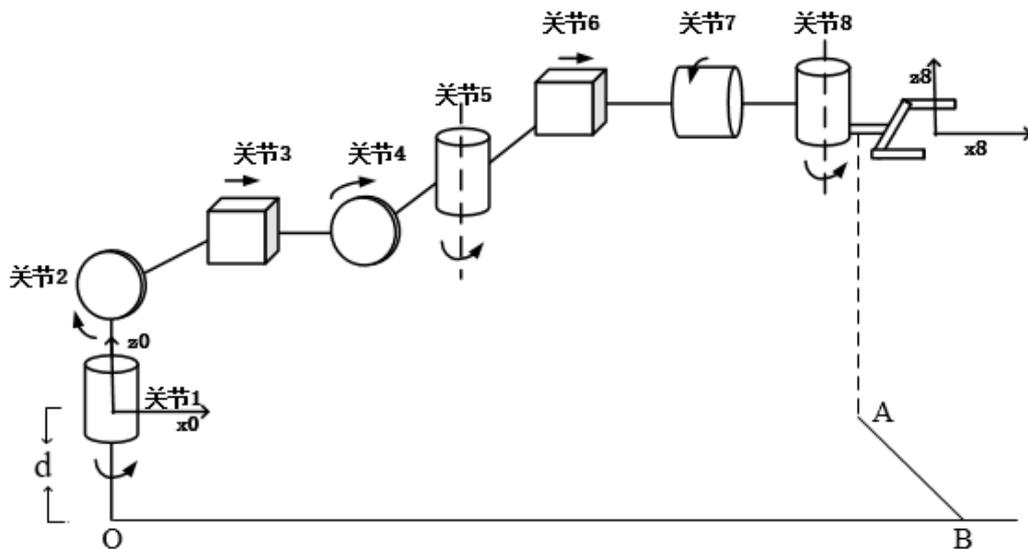


图 2-2 机械臂运动学建模精度测试示意图

以上步骤可以得到 8 号关节末端在这一组关节变量下相对于基坐标系的 X, Y, Z 轴的实际位置，将这组变量带入正向运动学模型可以得出计算位置，两者做差值可得到运动学建模的位置误差；针对喷嘴此时的朝向，测量喷嘴末端相对于基坐标系的 X, Y, Z 轴的实际位置与期望位置求向量夹角，可获得实际位置与期望位置的角度误差。以隧道范围进行平均划分为五个区域，分别为中间、左上、左下、右上、右下，进行多组不同区域点的位置和朝向的测量实验，部分测试结果如下表所示。

表 2-1 机械臂运动学建模精度测试表

组数	位置区域	X 轴向位置 误差	Y 轴向位置 误差	Z 轴向位置 误差	喷嘴角度 误差
1	中间	70.4mm	42.1mm	96mm	2.4°
2	中间	41.2mm	31.1mm	83.9mm	1.8°
3	中间	-22.1mm	-18.5mm	71mm	1.1°
4	左上	-28mm	-71.4mm	86mm	1.8°
5	左上	39mm	38mm	73mm	2.3°
6	左上	33mm	30.8mm	67.7mm	1.4°
7	左下	44mm	36mm	70.9mm	1.7°
8	左下	-15mm	-16mm	62mm	1.8°
9	左下	18.9mm	32.2mm	58.9mm	1.3°
10	右上	12mm	25mm	55mm	1.8°
11	右上	20mm	11.5mm	60.88mm	1.7°
12	右上	-17.6mm	-43.4mm	77.7mm	1.8°
13	右下	-12.3mm	-8.1mm	72.6mm	1.5°
14	右下	17mm	10.8mm	66.8mm	1.9°
15	右下	-33mm	-34.7mm	81.2mm	2.3°
...		...	...	...	...

由上表可知，X 轴向位置误差绝对值最大为 70.4mm，最小 12mm；Y 轴向位置误差绝对值最大为 71.4mm，最小为 8.1mm；Z 轴向位置误差绝对值最大为 96mm，最小为 55mm，区域不同对于误差的影响不大。Z 轴误差较大的原因是因为在机械臂末端由于重力原因存在下压现象，从而增大了误差。而角度的误差绝对值范围基本都在 1.5°至 2.5°之间。实际施工时对于喷嘴位置误差绝对值的要求为各方向 150mm 以内，角度误差绝对值的要求为 5°以内，运动学解算的精度高于实际施工时对于喷嘴位置的精度要求，验证了运动学模型的正确性。

## 2.4 本章小结

本章首先介绍了运用传统方法对本文所涉及的机型进行运动学建模限制和问题，针对这些限制和问题，着重介绍了本文所设计的运动学建模方法，首先介绍了基于旋转平移操作正向运动学建模方法，其次引出基于固定关节角法（本文固定 5、6 号关节）的逆运动学求解方法。经实际验证运动学模型基本正确，误差控制在理想范围内，为本文接下来将要阐述的部分打下了坚实的基础。

### 3 隧道待喷环境的感知与重建

完成了喷浆机自身的运动学建模后,需要进行隧道初喷施工面的识别与建模,通过三维重建技术获取隧道的特征信息并传输给轨迹规划部分,作为喷浆规划的基本数据。目前隧道三维重建常用于隧道勘察、维护检修、施工效果评估等,本文应用的三维重建方法填补了隧道初次喷浆施工过程中的隧道三维重建问题的研究空白。本章将从三维重建系统设计、激光雷达的标定与三维重建隧道成像等三个方面展开阐述。

#### 3.1 三维扫描系统概述

隧道施工现场较为潮湿,偶尔存在渗水情况,混凝土反弹率较大,不时有石子落下,粉尘浓度较大,空气能见度较低,且隧道中存在的支护结构会对环境三维扫描与湿喷机喷浆造成遮挡影响。在这种恶劣工况下实现湿喷机的全自动喷浆,需要一套精度较高、抗干扰能力与防护能力较强的隧道支护结构扫描建模系统。



图 3-1 隧道湿喷现场

根据喷浆机的作业方式和作业环境,为实现三维重建与隧道喷浆一体化,需要将扫描设备安装在喷浆机械臂上并跟随臂架移动,从而减少障碍物遮挡、增大扫描范围。因此要求扫描设备体积小、质量轻、抗粉尘、精密度高、成本低、防护等级高。当前三维重建技术发展十分迅速,隧道三维数据重建通常使用采用双目立体相机、全站仪或激光扫描仪等设备。双目立体相机造价较低,但是需要充足的光源与干净的环境,在布满粉尘的施工中的隧道里使用时易受到遮挡与噪声

干扰；全站仪不适用于采集高密度的点云信息，且需要固定位置的反射片的辅助，在施工隧道中使用不便；激光扫描仪包括二维和三维扫描仪，能够克服大多数环境因素，其中现有的三维扫描仪造价非常昂贵且体积较笨重，不符合喷浆机在实际工况下的使用需求。

针对以上的各种问题，本文设计了一种二维激光雷达结合电控云台的三维重建装置，性价比较高，能配合喷浆机完成相应施工区域的数据采集与分析，并完成隧道三维数据基于三维重建仪器坐标系与隧道喷浆机坐标系之间转换，且数据采集时受到隧道施工环境的影响较小。二维激光雷达如下图 3-2 所示；图 3-3 中，左侧为二维单线激光雷达工作示意图，右侧为加装云台后的工作示意图。



图 3-2 二维激光雷达

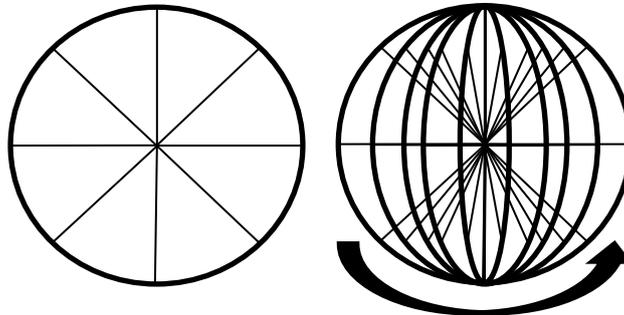


图 3-3 二维单线激光雷达工作示意图与结合电控云台的工作示意图

### 3.2 激光雷达坐标系的标定

考虑到扫描过程需要广阔的视野和方便进行逆向运动学求解，本文将扫描装置装在了机体六号关节前端，并加装了红色保护装置，如下图 3-4 所示，并通过正向运动学解算将雷达所处的坐标系转换到机体坐标系，坐标系的转换将在轨迹规划中做介绍。



图 3-4 扫描装置安装实物图

在标定前，因为安装精度等原因，点云 X 轴朝向与六号关节朝向存在一定的角度偏差，这样会导致采集到的点云数据也存在偏差。基于此，需要在采集设备使用前对其初始位置进行调零，即通过旋转微调雷达角度，保证点云数据所处坐标系的 X 轴（正前方）朝向与六号关节 X 轴朝向重合。通过手动选取六号关节的中间一点（如图 3-4 所示），由该点的坐标计算出该点与原点的连线（X'轴）和 X 轴之间的夹角，再通过传输操作指令，控制云台旋转此角度标定好坐标轴的朝向。

图 3-5 为标定前后雷达扫描得到的机械臂 6 号关节处的点云图像，绿色坐标轴为点云 Y 轴，红色坐标轴为点云 X 轴，浅蓝色直线为六号关节 X'轴朝向。由图 3-5 (a) 可知，在标定前存在了一定的偏差，此偏差与雷达自身的扫描精度不相关，但由于运动学模型是基于基坐标系的，此偏差会导致雷达点云数据再进行基坐标系转换是出现较大偏差，会直接导致逆向运动学的解无法使用。由图 3-5 (b) 可知标定后 X 轴方向与六号关节朝向已基本一致。

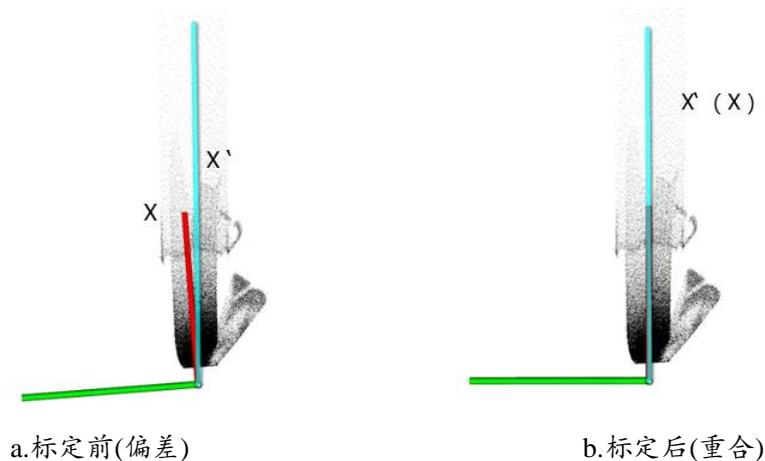


图 3-5 标定前后效果图（俯视图）

在完成扫描设备标定后，进行了模拟隧道点云精度实验测试，选取模拟隧道上多组点进行基于极坐标系下的实际位置与基于基坐标系下的雷达扫描位置的

对比。以隧道范围进行平均划分为五个区域，分别为中间、左上、左下、右上、右下，进行多组不同区域点的位置和朝向的测量实验，部分测试结果如下表所示，五个区域分别选择 3 个点，其中 X1、Y1、Z1 代表实测数据，X2、Y2、Z2 代表雷达扫描数据， $\Delta X$ 、 $\Delta Y$ 、 $\Delta Z$  分别代表 X、Y、Z 三个方向上的扫描精度误差，可以看出 X、Y、Z 三个方向上的位置误差绝对值均在 5mm 以内。

表 3-1 雷达标定效果精度测试表

序号	X1/mm	Y1/mm	Z1/mm	X2/mm	Y2/mm	Z2/mm	$\Delta X$ /mm	$\Delta Y$ /mm	$\Delta Z$ /mm
1	13339.0	-4575.2	1129.2	13337.2	-4578.7	1127.3	1.8	2.5	1.9
2	13294.8	-4052.6	1768.9	13291.8	-4050.5	1766.3	3.0	2.1	2.6
3	13228.3	-3545.2	2386.3	13225.6	-3541.7	2389.5	2.7	3.5	2.8
4	13232.7	-2955.0	2927.6	13231.7	-2950.1	2930.8	1.0	4.9	3.2
5	13293.1	-2293.8	3338.6	13290.2	-2293.2	3336.8	2.9	0.6	1.8
6	13324.1	-1605.6	3686.8	13326.6	-1604.9	3683.6	2.5	0.7	3.2
7	13247.2	-803.8	3918.4	13245.7	-808.5	3914.4	1.5	4.7	4.0
8	13147.9	8.9	4044.4	13145.0	5.3	4040.4	2.1	3.6	4.0
9	13174.5	796.1	4089.9	13178.5	798.7	4086.9	4.0	2.6	3.0
10	13146.6	1593.8	4043.9	13149.6	1593.2	4043.1	3.0	0.6	0.8
11	12985.8	2383.2	3819.4	12988.7	2385.2	3816.4	3.1	2.0	3.0
12	13041.2	3178.9	3570.1	13038.0	3177.3	3571.6	3.2	1.6	1.5
13	13196.3	3980.1	3043.1	13194.8	3984.1	3044.1	1.5	4.7	1.0
14	13093.9	4605.9	2518.9	13093.7	4604.9	2516.6	0.2	1.0	2.3
15	12991.1	5123.8	1940.7	12995.7	5125.0	1936.5	4.6	1.2	4.2
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

### 3.3 三维重建隧道成像

标定完成后便开始对周围环境重新进行扫描及三维重建，隧道三维重建的目的是将点云中的隧道主体提取出来、并对隧道特征面进行识别。隧道三维重建处理流程如图 3-6 所示：

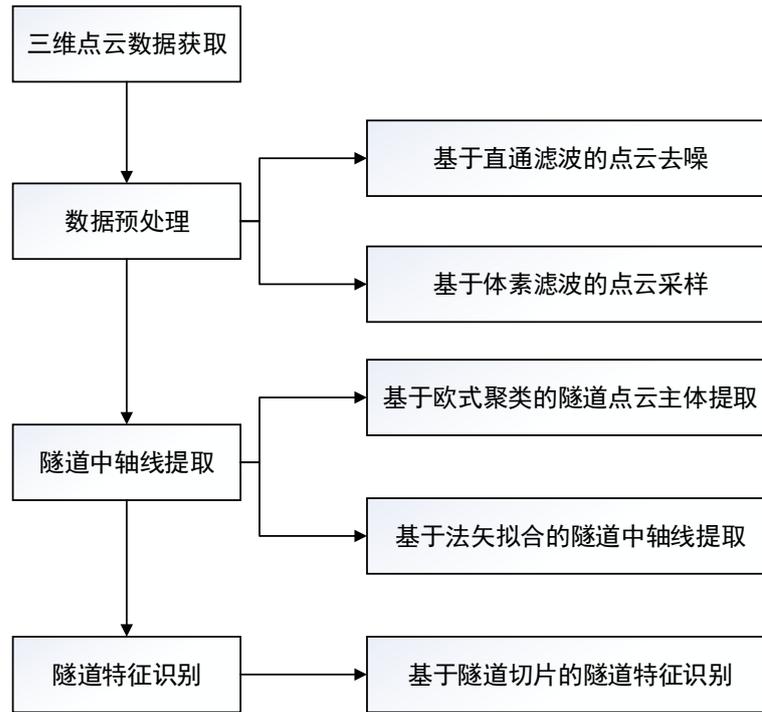


图 3-6 隧道点云处理流程图

### 3.3.1 隧道点云数据预处理

#### 1) 基于直通滤波的点云去噪

标定完成后需要对周围环境重新进行扫描及三维重建，获取数据后首先进行点云去噪，以去除隧道数据范围以外的干扰点数据。本文采用直通滤波进行去噪，根据标准隧道参数确定大致隧道范围，一般纵深约为 3m，高度约为 9m，宽度约为 11m；隧道原始点云设为：

$$S_0 = \{q_1, q_2, \dots, q_n\} \quad (3-1)$$

其中  $q_n = (x_n, y_n, z_n)$ ，且  $x_n \in X_0, y_n \in Y_0, z_n \in Z_0$ 。

设定滤除点为：

$$q_i = (x_i, y_i, z_i) \quad (3-2)$$

其中  $x_i < X_2 \cup x_i > X_1, y_i < Y_2 \cup y_i > Y_1, z_i < Z_2 \cup z_i > Z_1$ 。

通过设定坐标轴上的特定范围  $\{X_1 \sim X_2, Y_1 \sim Y_2, Z_1 \sim Z_2\}$ ，将特定范围外的所有点云数据删除，这样使得点云数据范围缩小至本文需要的范围要求，经过滤波后，点云为：

$$S_1 = \{q_1, q_2, \dots, q_m\} \quad (3-3)$$

其中  $q_m = (x_m, y_m, z_m)$ ，且  $x_m = \{x_m \in X_0 | X_1 \leq x_m \leq X_2\}$ ， $y_m = \{y_m \in Y_0 | Y_1 \leq y_m \leq Y_2\}$ ， $z_m = \{z_m \in Z_0 | Z_1 \leq z_m \leq Z_2\}$ 。隧道点云去噪处理前后的效果对比图如下图所 3-7 所示，左侧为直通滤波处理前的点云效果图，右侧为处理后的点云效果图。

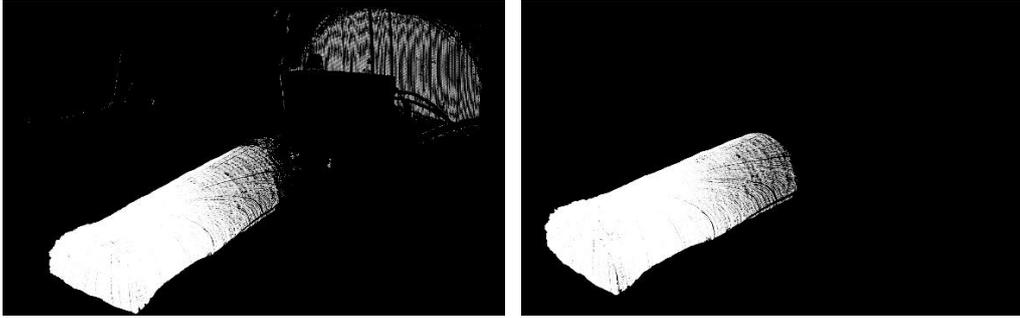


图 3-7 隧道点云去噪处理后效果图

### 1) 基于体素滤波的点云均匀采样

在点云去噪完成以后，需要进行隧道点云均匀采样。对点云数据进行体素滤波使其空间分布均匀，消除因雷达扫描的自身特性造成的数据点近处分布密集、远处分布稀疏的情况。为了在减少点云数量的同时不破坏隧道形状并是点云分布均匀，本文采用网格体素滤波的网格方法进行下采样 [65]。体素滤波进行下采样的结果为，原有约 300 万点云数据，压缩得到约 50 万点以内数据量的下采样数据，且隧道特征保留完整。点云均匀采样处理前后的隧道效果对比图如下图 3-8 所示，左边是体素滤波处理前的隧道点云效果图，右边是处理之后的隧道点云效果图。

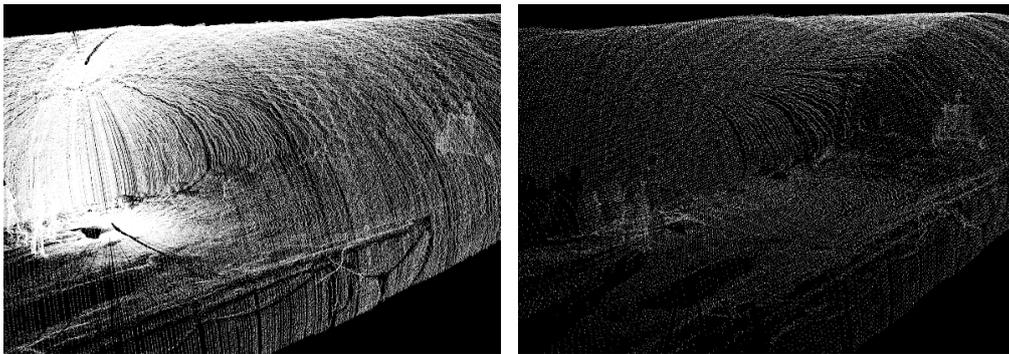


图 3-8 点云均匀采样处理前后隧道效果图

## 3.3.2 隧道中轴线提取

### 1) 基于欧式聚类的隧道点云主体提取

对三维点云进行聚类分析实现点云分割，分割后真正属于隧道面的点云占最大的一部分，据此将点云中属于隧道面的数据提取出来，将行走的施工人员、停放的车辆等干扰数据剔除。先通过直通滤波先将与隧道相连的地面数据删除，然后采用欧式聚类分割[66]。对三维点云进行聚类分析实现点云分割，分割后真正属于隧道面的点云应占最大的一部分，据此将行走的施工人员、停放的车辆等干扰数据剔除。将点云中属于隧道面的数据提取出来，得到  $n$  个点云数据  $\{(x_i, y_i, z_i), i = 0, 1, 2 \dots n\}$ 。隧道点云主体效果图如下图 3-9

所示：

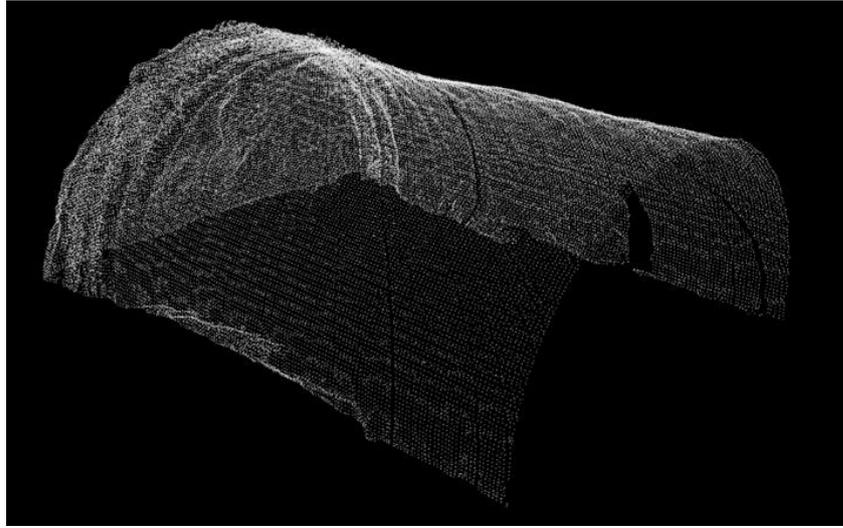


图 3-9 隧道点云主体效果图

## 2) 基于法向量拟合的隧道中轴线提取

隧道具有类似于圆柱体的形状特征，基于此，轴线方向的获取可通过计算已喷面的点云法向量垂线来实现，如下图 3-10 所示。首先，先获取隧道已喷表面点云法向量，其计算方法可近似为：分析一个协方差矩阵的特征值与特征向量，通过点的近邻查询可获得这个协方差矩阵，假设协方差矩阵  $W$  如下：

$$W = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (P_i - \bar{P}) \cdot (P_i - \bar{P})^T, C \cdot \bar{V}_j = \lambda_j \cdot \bar{V}_j, j \in \{0,1,2\} \quad (3-4)$$

其中， $m$  代表离点  $P_i$  的最近的  $m$  个点， $\bar{P}$  代表近邻的重心点， $\lambda_j$ 、 $\bar{V}_j$  分别代表第  $j$  个特征值与第  $j$  个特征向量。

获取到隧道已喷表面点云法向量后，可以进一步求取隧道中轴线。中轴线可用一个方向向量与一个定位点来表示，该定位点  $O(x_0, y_0, z_0)$  即为隧道中心点，可以由所有点云数据求均值得到，其公式如下 3-5。

$$O(x_0, y_0, z_0) = \sum_{i=1}^k (x_i, y_i, z_i) / k \quad (3-5)$$

将所有隧道已喷表面点云法向量平移至定位点，平移后将其单位化，便获得了一簇圆柱放射状的单位向量。采用平面最小二乘将向量末端点组成的圆柱拟合为圆面，可得：

$$aX + bY + cZ + d = 0 \quad (3-6)$$

其中， $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^T$ ,  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}^T$ ,  $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_n\}^T$ 。空间圆的法向量  $f(a_0, b_0, c_0)$ ，即为隧道中轴线的方向向量。

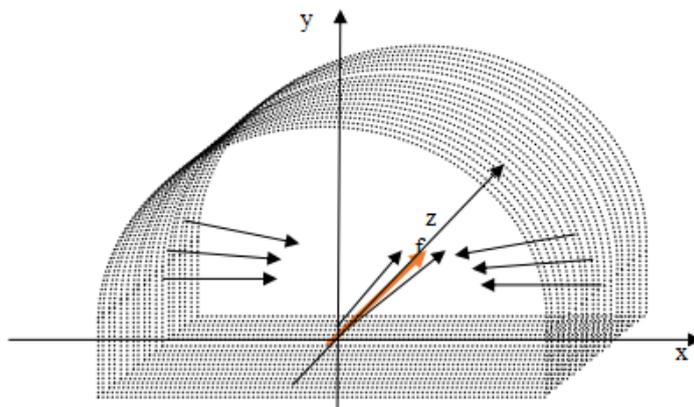


图 3-10 法向量簇求取隧道中轴线示意图

### 3.3.3 基于点云切片的隧道特征识别

标准隧道参数：高度约为 9m，宽度约为 11m，待喷面纵深约为 3m；某实际隧道图示如下图 3-11 所示，其对应点云效果图如下图 3-12 所示，此隧道规格为高度 7.5m，宽度 11.26m，待喷面纵深为 2.5m。



图 3-11 实际隧道图

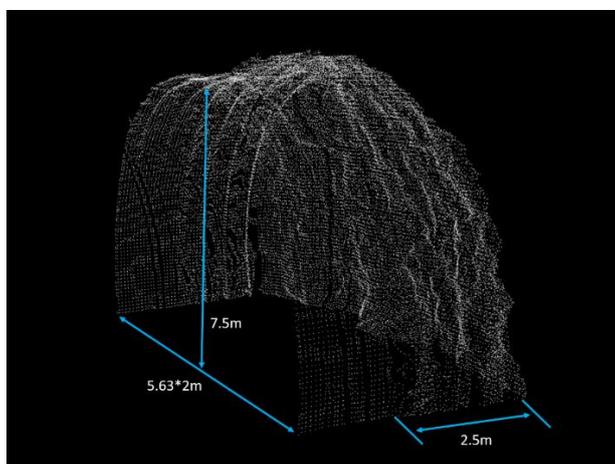


图 3-12 实际隧道点云效果图

隧道初喷时的实际支护结构如图 3-13 所示,左侧为隧道初喷完成后的隧道面情况,右侧为初喷前的隧道面情况,初喷完成后混凝土刚好覆盖钢拱。据此可画出隧道支护结构示意图如下图 3-14 所示。在超挖线与拱架安装线之间是正常的施喷区域,超挖线以外属于超挖区域,超挖区域需要单独进行特殊喷浆处理;而在拱架支护的附近喷头需要沿拱架外形作喷头朝向的改变。因此隧道特征识别的主要目的是获取隧道的钢拱与超挖分布情况。在确定中轴线后,将隧道点云主体沿中轴线正向作均匀切片,在每个切面上对隧道实际轮廓与标准轮廓进行对比,进而获取超挖的分布情况以及支护结构的分布情况。



图 3-13 湿喷现场隧道支护结构实物图

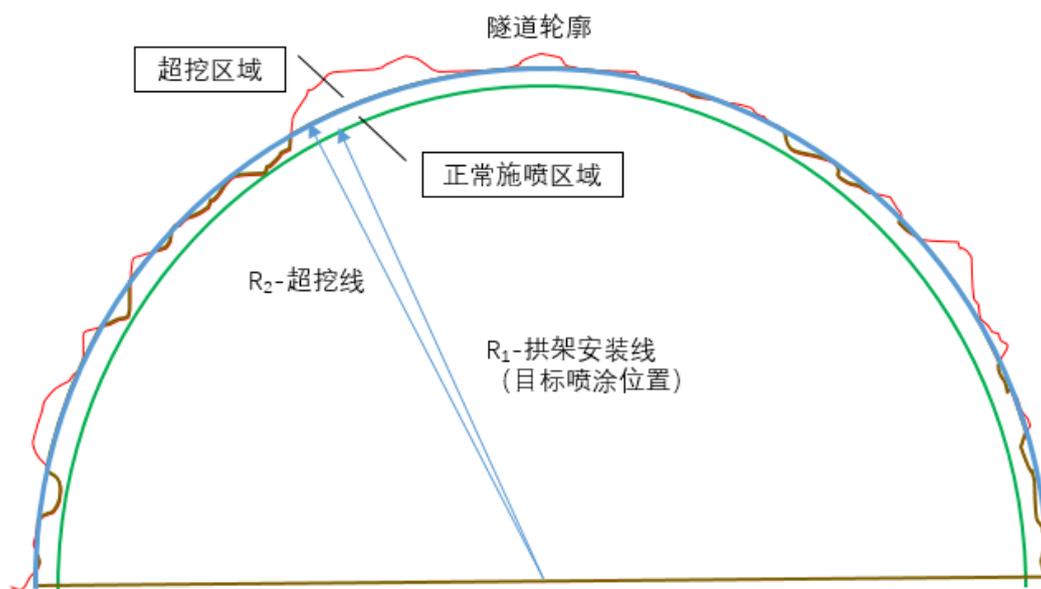


图 3-14 隧道支护结构示意图

以往的研究工作中,对于隧道轮廓的识别一般通过沿轴线切片后逐层处理[64,65]。针对图所示实际隧道点云图像,本文以5cm为步长沿轴线截取隧道剖面,在剖面上以轴点所在位置为圆心,隧道设计标准圆弧半径为参考,沿径向判断隧道轮廓上的点是否属于超挖区域。超挖识别示意图如下图3-15所示,其中 $R_2$ 为某个切片轴心到超挖线的距离, $R_2$ 可由隧道施工参数值估计得出; $R_2'$ 为轴心到隧道壁的距离;若 $R_2'$ 大于等于 $R_2$ ,则该点为潜在超挖点,该点所在的区域为潜在超挖区域,在进行下一步判断。

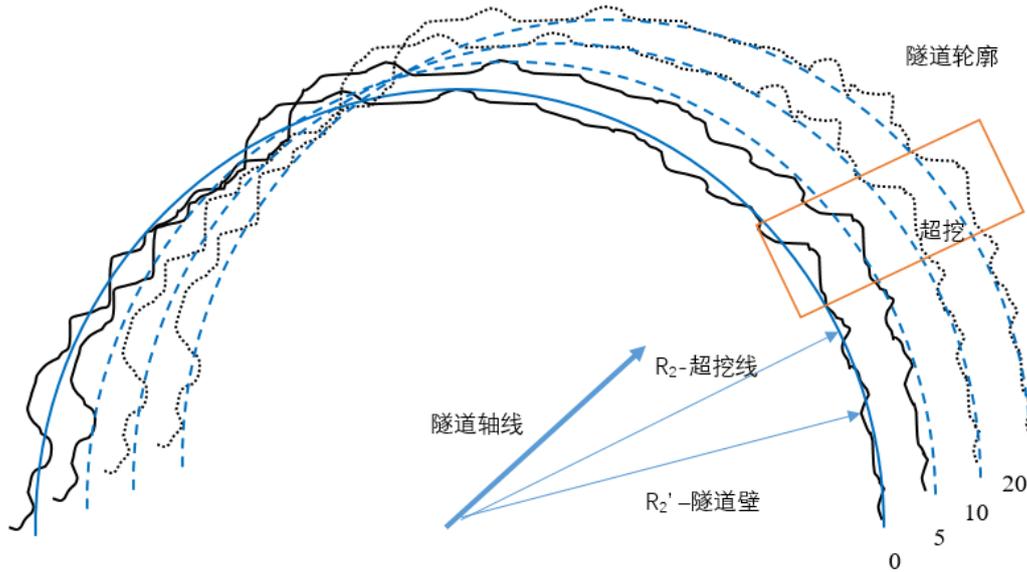


图 3-15 超挖识别示意图

由于体积较小的超挖区域,一般对施工影响不大,故可以将其忽略。根据施工经验与标准,通过人为设定阈值进行检测,如果弧线上达到20cm的一段区域内有80%以上的点属于超挖区域,则判定这一段区域为一处超挖。超挖识别算法流程图如下图3-16所示:

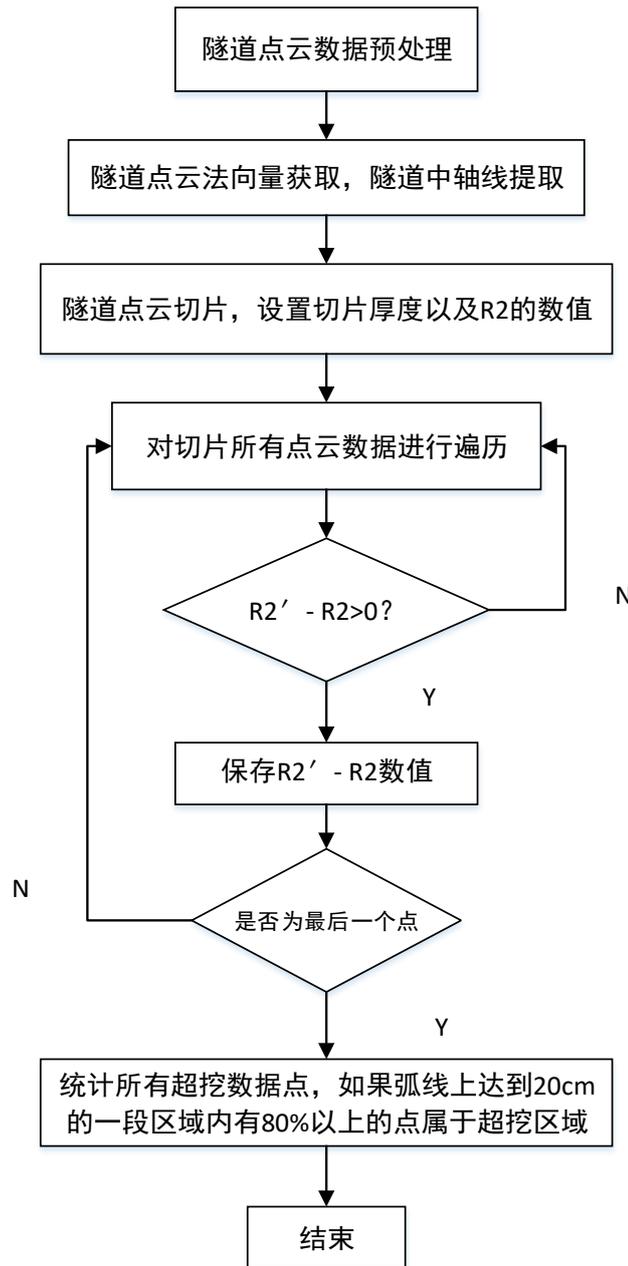


图 3-16 超挖识别算法流程图

隧道非拱架安装位置的某处切片与标准线比对结果如图 3-17 所示，隧道中非拱架安装位置的切片厚度为 5cm，对这段有 5000 个点（点间距弧长约 2mm）的隧道轮廓弧线，其中 2250 至 2500 的点云区域（图中圈出来的区域）认定为一处超挖；其中超挖线与拱架安装线之间的区域都属于正常的施喷范围。在进行隧道施工时，先将超挖部分填满；随后进行正常施喷范围的喷射，在喷浆路径规划中直接采用其数据，超挖部分剔除以后留下的数据空洞由超挖线上的标准值进行填补。

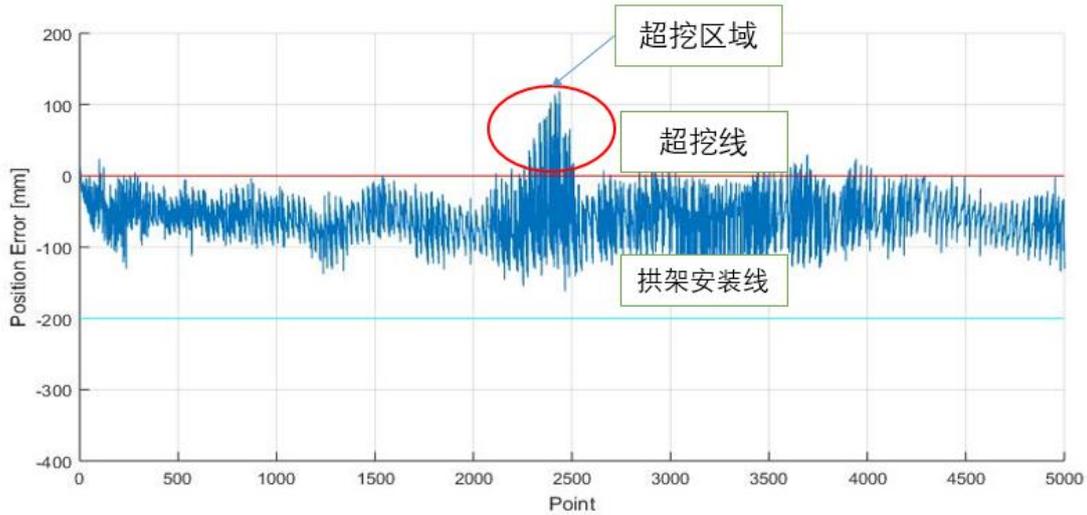


图 3-17 隧道非拱架安装位置的某处切片与标准线比对结果

对于钢拱识别问题, 仅从单个截面判断该截面是否属于钢拱安装位置的方法是不可行的, 原因如下:

1. 由于钢拱存在一定厚度 (一般 20cm), 而切片为 5cm, 因此一条钢拱必然存在于相邻的多个切片中;
2. 有时钢拱的安装是不完全标准的, 在轴向上有所倾斜, 因此即使是钢拱所在的切片区域, 在单个截面中也只能存在钢拱的局部。
3. 一部分凸起的岩石也能达到钢拱安装线的高度, 会对钢拱的识别产生干扰, 只有与多个相邻的切片共同比较才能判断该区域属于钢拱还是岩石;
4. 由于雷达扫描位置不在钢拱正下方, 而且钢拱安装时并不贴合隧道壁, 因此雷达也会扫描到钢拱上方的隧道壁, 这部分壁面也可能存在超挖情况, 会对钢拱的识别产生干扰。

考虑以上影响因素, 本文在以往沿轴做剖面检测轮廓的研究基础上, 创新性地 将相邻截面关联起来进行识别。拱架识别示意图如下图 3-18 所示, 通过施工经验与标准, 人为设定识别规则为: 其中,  $R1$  代表某切片轴心到拱架线的距离,  $R1'$  代表轴心到隧道壁的距离, 若  $R1' \leq R1$ , 则认为该点为潜在拱架区域的点, 再进行下一步判断。如果连续 4 个切片中都存在至少 3m 跨度的拱架区域 (每个区域有至少 80% 的点超过拱架安装线的位置), 则判断这部分连续的几个切片为拱架区域。拱架区域算法流程与超挖识别类似, 在此不做赘述。

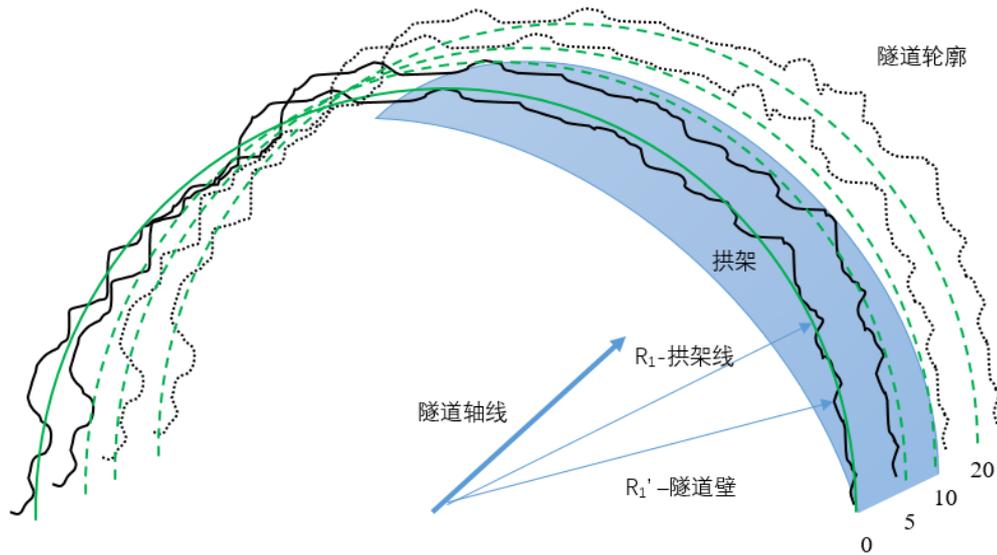


图 3-18 拱架识别示意图

隧道拱架安装位置的某处切片与标准线比对图如图 3-19 所示。拱架线隧道中拱架位置处的切片为 5cm。已知拱架厚度为 200mm，因此图中有一部分点达到了拱架安装线及以下，表明这些三维点属于拱架。又因为拱架宽度为 200mm，如果连续 200mm 内的切片都存在拱架区域，则这一部分连续的切片为同一道拱的拱架区域。

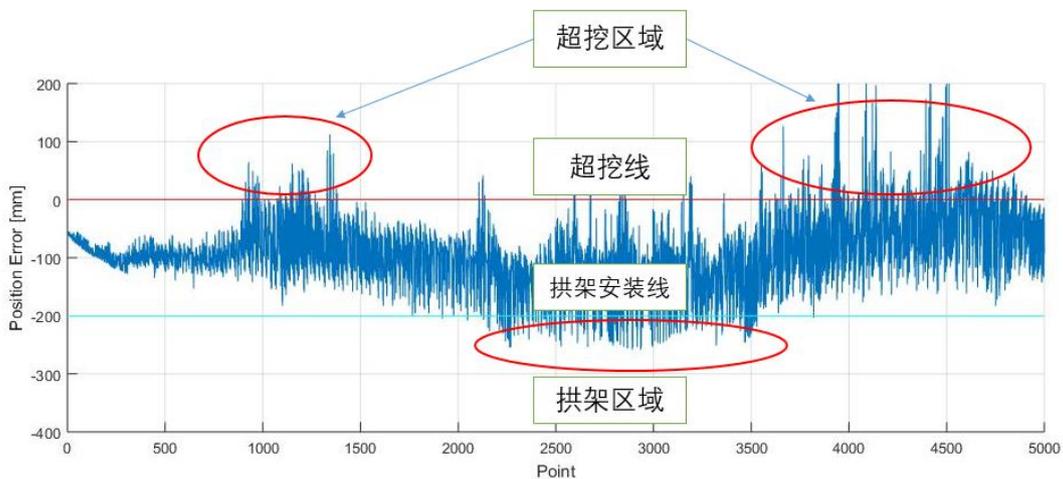
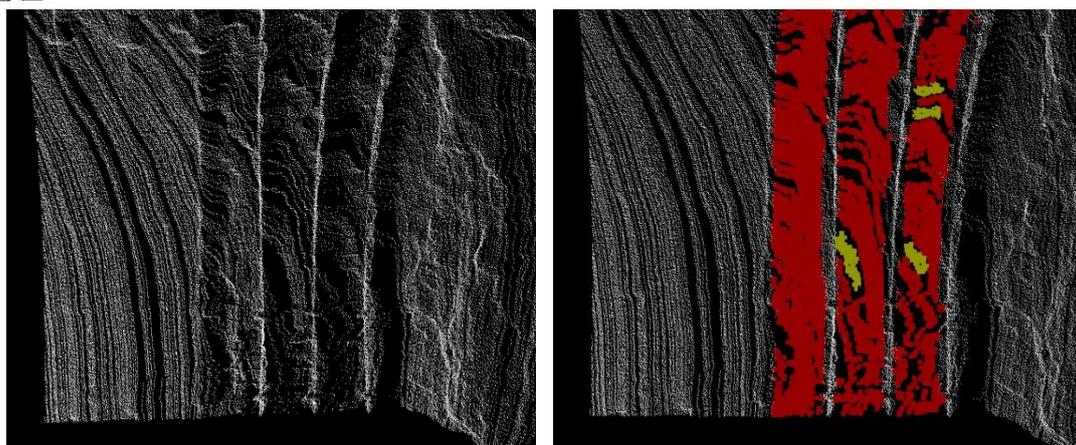


图 3-19 隧道拱架安装位置的某处切片与标准线比对图

通过处理真实隧道点云数据，得到处理后的真实隧道点云特征面识别效果如图 3-20 所示。其中图 3-20(b)红色点云部分为识别拱架后截取出的拱间面，用于喷浆路径的自动规划；黄色点云部分为超挖区域，需要在全自动喷浆前进行填充；钢拱没有进行特别标注，拱间面之间的正常颜色部分为钢拱区域；从图中可以看出隧道特征的识别结果较为理想。隧道特征识别的效果在模拟隧道实验中做数据

验证。



(a)隧道点云数据

(b)拱间面与超挖区域识别结果

图 3-20 真实隧道点云特征面识别效果

### 3.4 本章小结

本章简要介绍当前对于隧道三维重建方法存在的一系列不足，从而引出本文所设计的三维重建系统；说明了激光雷达的原始误差产生原因和本文所采用的自标定方法的过程；着重介绍了三维重建隧道成像技术，包括中轴线的确认和钢拱、超欠挖等隧道信息的获取，最后展示了实际隧道的三维重建效果图。将隧道面超欠挖及支护结构分布情况反馈至整机，进行喷浆机器人的轨迹规划。

## 4 喷浆机器人末端喷头笛卡尔空间轨迹规划

喷浆机器人的轨迹规划是根据三维重建得到的隧道特征信息,以完成隧道面喷浆支护任务为目的,在喷浆机械臂运动范围内规划出一系列基于基坐标系的末端喷枪轨迹,包括喷嘴具体位置和朝向。在实际的喷浆支护作业中,喷浆轨迹规划是极为重要的一个问题。本章主要研究如何利用点云切片技术对三维隧道模型进行喷浆轨迹规划的问题。首先根据隧道喷浆空间的各个坐标系,利用正向运动学求解坐标系之间的变换关系,然后采用点云切片技术实现喷浆轨迹的位置规划,最后根据隧道的表面法向量求出各个喷枪位置的朝向。

### 4.1 喷浆空间坐标变换

根据三维重建系统的设计,可知三维重建的坐标系位于六号关节的末端。然而,轨迹规划是结合喷浆机械臂的基坐标系完成的。因此,需要根据三维扫描坐标系和喷浆机械臂坐标系之间的平移旋转变换,将三维重建获得的隧道特征信息转化到基坐标系上。

由于三维扫描装置安装在机械臂的六号关节末端,可以利用前六关节的正向运动学建模结果来完成坐标系之间的转化。

三维扫描给出的数据基于六号关节坐标系的法向量和位置数据,为了便于进行轨迹规划以及逆向运动学模型的求解,需将基于六号关节坐标系的法向量和位置数据转换为基于基坐标系的变换矩阵。设此变换矩阵为  $W$ , 具体为:

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{13} & p_x \\ w_{21} & w_{22} & w_{23} & p_y \\ w_{31} & w_{32} & w_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

其中,  $[p_x, p_y, p_z]^T$  表示点云数据或规划点的位置,  $\begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{13} \\ w_{21} & w_{22} & w_{23} \\ w_{31} & w_{32} & w_{33} \end{bmatrix}$  表示点云数据或规划点的朝向。在下一小节中将介绍规划点数据的求取。

将各个关节回归到零位,雷达开始扫描。由于控制系统存在的一定的控制误差,每个关节的位置不一定是准确的零位。因此,需要通过各个关节传感器实时获取各关节的当前量,根据前六关节的正向运动学公式:

$${}^0T = {}_1A_2A_3A_4A_5A_6 \quad (4-2)$$

左边的  ${}^0T$  表示从基坐标系到末端喷头的变换矩阵,右边的  ${}_iA_j$  表示表示从第  $i$  个关节至第  $j$  个关节的变换矩阵,将雷达扫描到的隧道数据转化到基坐标系,只需用式 (4-2) 左乘式 (4-1),作为轨迹规划的数据基础。

## 4.2 基于点云切片的末端喷头轨迹规划

在一个复杂多变的隧道空间中进行喷枪轨迹的规划，问题较为复杂，实现难度较大。为了降低轨迹规划的难度，可以采用匀速喷浆这种简化的方式进行轨迹规划。喷漆机器人常用的匀速喷枪轨迹形式有 s 形轨迹和螺旋形轨迹。结合操作手在实际隧道中喷浆的经验，本文采用 s 形轨迹进行喷浆。

针对隧道初喷时的正常施喷范围，为了实现 s 形轨迹喷浆，本文采用点云切片技术处理三维点云数据。首先采用一系列与三维隧道数据中  $X=0$  平面平行的平面去切割三维隧道模型，其切割平面间的距离等于喷浆机的混凝土喷射半径。经过切割平面处理之后，可以得到多段点云数据，以每相邻的两段点云数据为一组，如图 4-1 的 E1、E2、E3 为平行切割平面，得到两小段点云数据。

喷枪末端位置规划方法：计算获取每组的两段点云数据中互为最近点的匹配点对，匹配点对连线后与切割面相交于多个点[69]。如图 4-2 所示，切割面 E2 与各匹配点集的连线的交点即为隧道面待喷点。匹配点对连线与切割面交点的计算公式如下：

$$\frac{x - x_1}{x_1 - x_2} = \frac{y - y_1}{y_1 - y_2} = \frac{z - z_1}{z_1 - z_2} \quad (4-3)$$

$$x = x_q \quad (4-4)$$

其中， $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2)$  为匹配点坐标， $x = x_q$  为切割平面方程。联立方程 4-3 和 4-4 便可以计算出交点坐标。

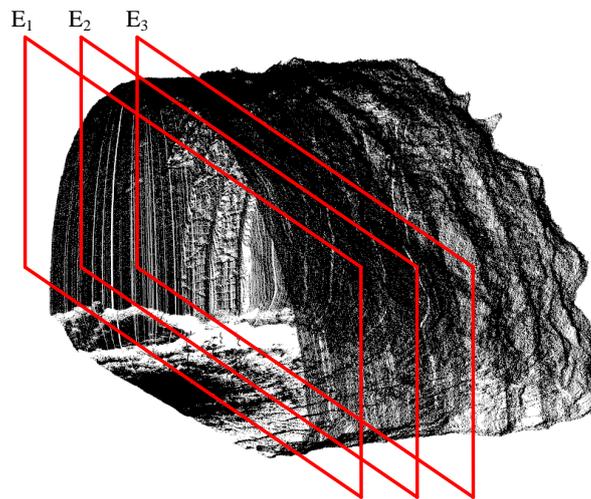


图 4-1 隧道点云切片示意图

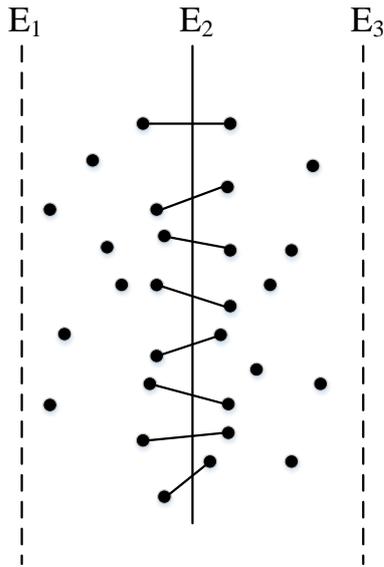


图 4-2 切割平面与点云求交点示意图

根据交点临近的  $K$  个点拟合提取隧道面的其点云数据的表面法向量，此法向量为内测方向法向量，即朝向隧道中心，并且将该点沿着法向量偏移  $1\text{m}$  得到拟待喷点，得到偏移后的轨迹点位置数据  $[p_x, p_y, p_z]^T$ ，依次首尾连接偏移后的轨迹点，得到喷浆机的喷枪末端的位置曲线，如图 4-3 所示。

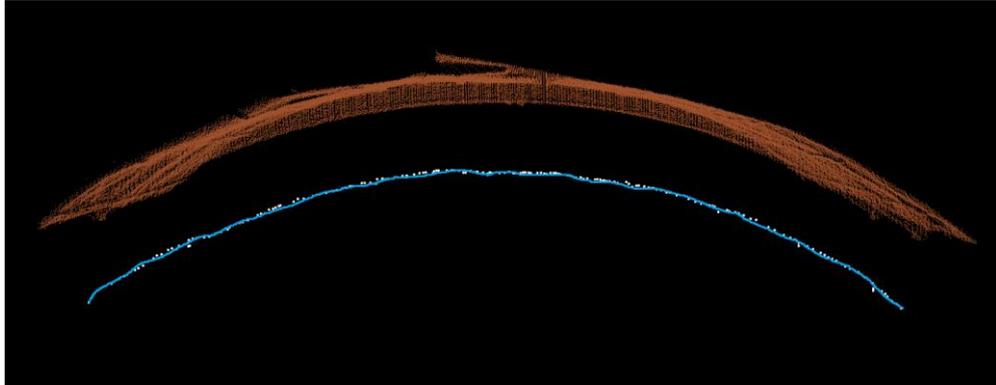


图 4-3 轨迹点连接图

该方法得到的位置点较为散乱，点与点之间的距离不一致。为了得到较为规整的位置点，本文采取体素滤波[66]的方法，可将点与点之间的距离控制在  $100\text{mm}$  左右，如图 4-4 所示。考虑到实际喷浆的过程中，混凝土喷射半径远远超过  $100\text{mm}$ ，可将点与点之间的距离控制在  $500\text{mm}$  左右，可根据实际喷浆情况调整点的密度，如图 4-5 所示。

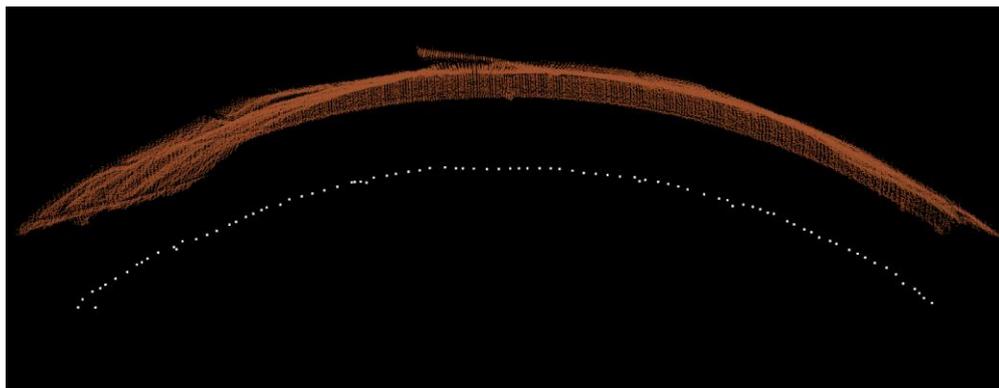


图 4-4 体素滤波 100mm 轨迹点图

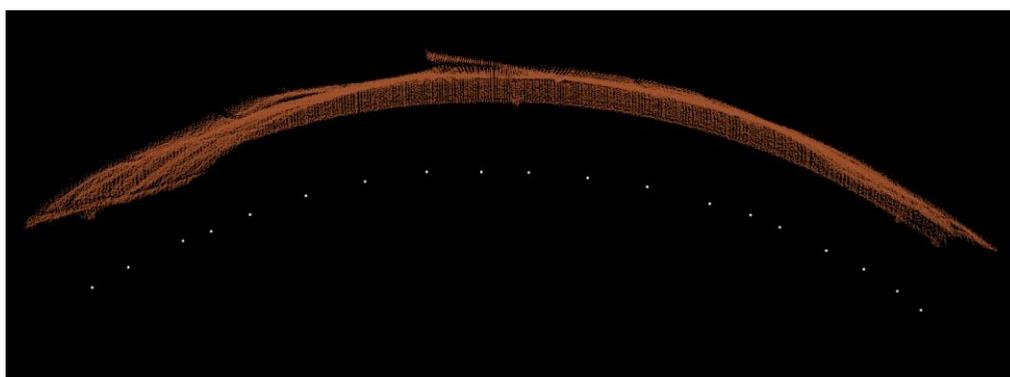


图 4-5 体素滤波 500mm 轨迹点图

对于喷枪末端朝向规划，在实际隧道喷浆中，尽量保持喷枪末端与隧道面垂直可以降低混凝土的反弹率。因此，本文将不同位置的喷枪末端朝向与相应的表面法向量的反方向（指向隧道壁）平行，如图 4-6 所示，白线箭头代表不同位置的法向量，褐色部分代表隧道壁面。

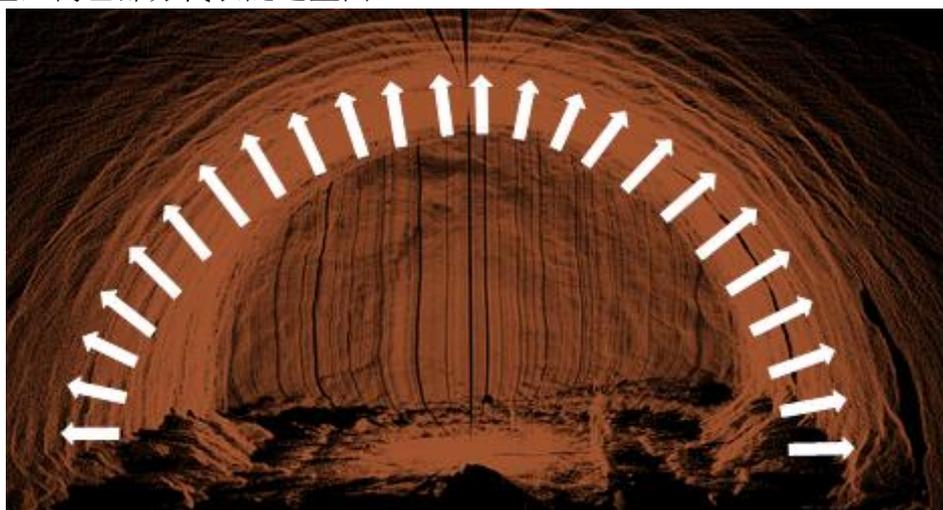


图 4-6 表面法向量示意图

由于逆向运动学的输入是  $4 \times 4$  矩阵，需要将位置和朝向转化成相应的矩阵，才能传输到运动学部分。

本文的朝向表示方法采用绕固定轴旋转的  $XZX$  欧拉角，即末端坐标系先沿

着 X 轴旋转 $\theta_1^\circ$ ，再沿着 Z 轴旋转 $\theta_2^\circ$ ，最后再沿着 X 轴旋转 $\theta_3^\circ$ 即可达到目标朝向。XZX 欧拉角的旋转方程可以表示如下：

$$T = \text{Rot}(x, \theta_3) * \text{Rot}(z, \theta_2) * \text{Rot}(x, \theta_1) \quad (4-5)$$

$$\text{Rot}(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

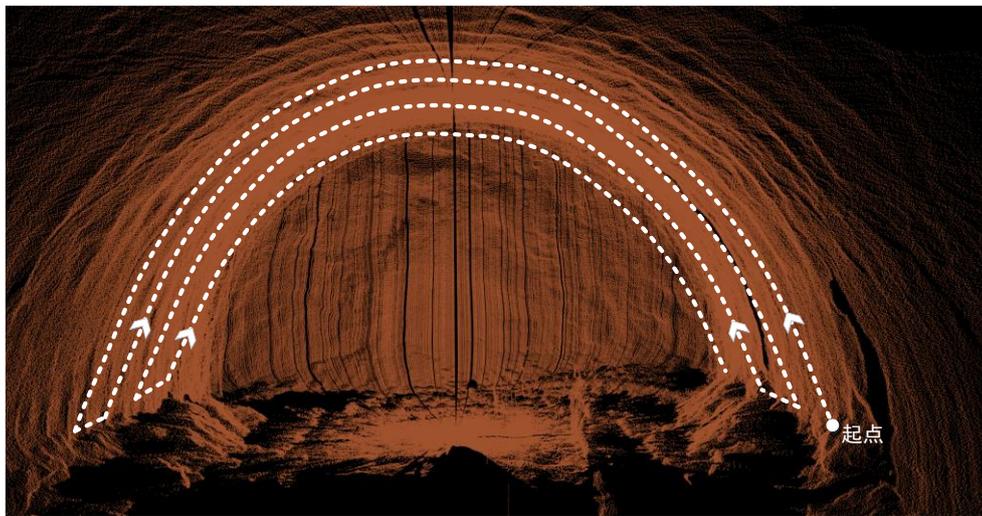
$$\text{Rot}(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-7)$$

其中，旋转角 $\theta_3^\circ$ 可以通过表面单位法向量计算得到。设表面单位法向量为  $b(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ ，则

$$\theta_3 = 180^\circ - \arcsin(-\theta_z) \quad (4-8)$$

$\theta_2^\circ$ 根据不同的位置设定不同的角度。在两个工字钢之间的隧道面部分采取垂直喷浆，将 $\theta_2^\circ$ 设定为  $90^\circ$ ；在靠近工字钢部分采取斜喷，以第一根钢拱为例，靠近已喷面的方向为外侧，靠近下一个钢拱的方向为内测，方向，将其转为从左至右，钢拱垂直于此内测设定为  $105^\circ$ ，外侧设定为  $75^\circ$ 。 $\theta_1^\circ$ 的角度大小不做限定，此角度作为逆运动学解算的冗余部分，可选取合适的角度保持舒适的机械臂姿态。据此得到朝向矩阵。

根据操作手在实际隧道中喷浆的经验，本文采用 s 形轨迹进行喷浆。如图 4-7 所示，从图右侧底部起喷，白色点表示喷枪末端轨迹的位置点，褐色部分为真实隧道壁面。喷枪在隧道两侧来回运动，层层递进，走 s 形轨迹进行喷浆。



4-7 S 形轨迹示意图

至此，轨迹规划部分的研究完成。轨迹规划接收三维隧道数据，规划完成后输出一系列的位置数据 X, Y, Z 与角度数据 $\theta_2, \theta_3$ 值，转换为规划点基于基坐标系的变换矩阵，并调用运动学模型进行解算。轨迹规划部分传输数据如表 4-1 所示。

表 4-1 轨迹规划输出数据表

序号	X/mm	Y/mm	Z/mm	$\theta_3/^\circ$	$\theta_2/^\circ$
1	9175.918	-3831.831	2187.038	127.307	75
2	9175.189	-3768.656	2275.960	126.960	75
3	9174.422	-3702.175	2321.279	126.153	75
4	9173.967	-3662.730	2364.890	125.695	75
5	9173.531	-3625.044	2403.777	125.073	75
6	9172.417	-3528.524	2453.670	124.410	75
7	9171.726	-3468.579	2535.995	123.939	75
8	9170.822	-3390.332	2595.692	123.527	75
9	9169.688	-3212.954	2641.148	122.592	75
10	9168.775	-3150.233	2690.228	121.822	75
11	9168.051	-3150.233	2726.958	121.149	75
12	9167.242	-3080.187	2761.823	120.290	75
13	9166.022	-2974.496	2817.621	118.832	75
14	9165.426	-2922.825	2845.153	118.215	75
15	9164.377	-2831.943	2878.881	117.327	75
16	9163.639	-2767.940	2926.017	116.652	75
17	9162.953	-2708.594	2952.982	116.081	75
18	9161.980	-2624.305	2999.400	115.111	75
19	9161.334	-2568.261	3027.534	114.820	75
20	9160.058	-2457.674	3095.819	113.557	75
...	...	...	...	...	...

### 4.3 本章小结

本章主要阐述了如何利用隧道三维点云数据规划出喷枪末端的位置和朝向，进而转化为位姿矩阵传输给运动学部分解算。首先，介绍了将隧道三维点云数据转化到基座标的坐标转化方法；其次，将点云切片技术和临近点匹配法结合应用于隧道点云数据，获得喷枪末端的空间位置坐标；最后，利用隧道的表面法向量规划不同位置的喷枪朝向，在钢拱位置采用斜喷，符合实际工况操作要求，轨迹规划为轨迹跟踪控制提供了目标轨迹。

## 5 喷浆机器人八自由度机械臂的轨迹跟踪控制

在完成了运动学建模、环境感知及重建和轨迹规划的研究工作后，需要实现最终的轨迹跟踪控制根据末端位置的期望目标轨迹数据，结合各关节传感器实时传回的实际数据，通过正向运动学解算和控制算法获得末端位置相应时刻的实际位置和朝向等，经轨迹跟踪控制算法输出调整过的各关节变化量数据，控制机械臂末端实现期望轨迹。本章将从底层控制、轨迹跟踪算法、轨迹跟踪仿真和轨迹跟踪控制效果四大方面展开阐述。

### 5.1 喷浆机器人底层控制

底层控制为整个运动控制的基础，目标在于使机械臂所有关节的控制精度达到实际施工的要求。运动控制器与机械臂原有驱动系统之间采用 CAN 总线的通信方式，关节传感器的数据也在 CAN 总线上获取。底层控制部分的输入为关节实时误差，输出为对应关节驱动系统的实时驱动量。为了取得最理想的控制效果，本文对经典 PID、模糊 PID 和动态自适应 PID 控制方法进行了研究比较。

#### 5.1.1 基于经典位置式 PID 的单关节控制

对于单个控制对象，PID 控制方法常见于工业机器人控制系统，效果较好[70]。PID 控制器具有稳定性高、参数调节简单、鲁棒性好的特点。位置式 PID 的表达式如下：

$$Out(Dq) = Kp[e(t) + \frac{1}{Ti}e(t)dt + Td \frac{de(t)}{dt}] \quad (5-1)$$

其中  $Out(Dq)$  代表输出关节驱动量， $Kp$  代表比例系数，是主要调节参数，其值越大对用的系统响应速度越快、关节调整精度越高，但过大的  $Kp$  设定值会导致系统、控制效果不稳定； $e(t)$  为关节设定值与测量值的差值：

$$e(t) = Pd - Pa \quad (5-2)$$

其中  $Pd$  为目标位置， $Pa$  为当前实际位置； $Ti$ 、 $Td$  分别代表积分周期、微分周期。 $Ki$  代表积分系数，调整合适  $Ki$  值可较好的消除系统稳态误差带来的控制误差， $Ki$  越大，对应系统稳态误差的消除越快，但过大的  $Ki$  值会导致在系统再响应的初期产生积分饱和现象，导致较大的超调量，过小  $Ki$  会导致难以消除系统静态误差，使得控制精度降低。其表达式如公式 5-3：

$$Ki = \frac{KpT}{Ti} \quad (5-3)$$

其中  $T$  为采样周期，其取值在程序中写定，参考系统周期， $Ti$  值于  $T$  的取值。

微分系数  $Kd$  的作用是改善系统的动态特性，其表达式如公式 5-4：

$$Kd = \frac{KpT}{Td} \quad (5-4)$$

其中  $T$  为采样周期,  $T_d$  为微分周期,  $K_d$  代表微分系数, 其作用提前预估偏差变化并进行抑制, 但过大的  $K_d$  会导致系统调节时间边长, 降低控制性能。

机器人的单关节控制是多关节轨迹跟踪控制的基础。适用经典 PID 控制方法进行单关节的控制时, 需要先对初始控制参数进行整定, 然后在实际关节运动测试中调整适合的控制参数, 使其控制精度达到理想状态。对于机械臂单关节的初始控制参数整定, 可以先排除重力和多关节惯量耦合等影响因素。对于单关节 PID 位置控制参数整定的闭环控制结构框图如下:

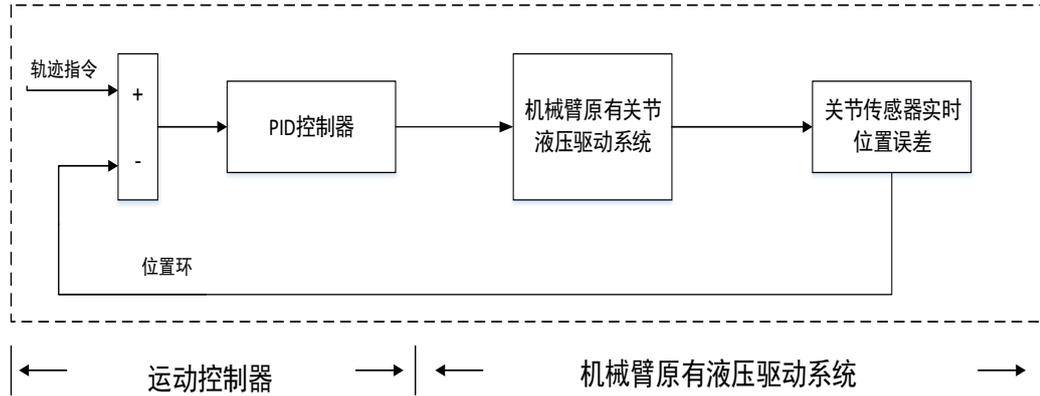


图 5-1 闭环控制结构框图

首先通过人工操控测出该驱动系统各关节的驱动步长, 即当驱动系统在一个控制周期给每个关节最小驱动量点动时的单关节运动步长, 经过多组测试, 测试精度表如下图 5-1 所示, 作为控制算法效果的参考对比。

表 5-1 单关节点动精度表

关节号	关节类型	传感器类型	单关节点动精度
1	旋转关节	编码器	0.1°
2	俯仰关节	倾角传感器	0.1°
3	伸缩关节	拉绳位移传感器	1mm
4	俯仰关节	倾角传感器	0.1°
5	旋转关节	拉绳位移传感器	1mm
6	伸缩关节	拉绳位移传感器	1mm
7	旋转关节	编码器	0.1°
8	旋转关节	编码器	0.1°

使用经典 PID 进行单关节控制时, 参数调整比较麻烦, 尤其是  $K_p$  参数的设置; 由于各关节的关节驱动特性不一, 故其适用的控制参数也不同。设定关节目标位置, 通过传感器获取关节实际到达位置, 两者数值相减并取绝对值, 获得单个关节控制误差, 对每个关节进行 50 组实际控制测试, 对误差取绝对值即为关节控制精度。各关节的单关节控制精度如表 5-2 所示, 旋转关节的控制误差约为 1°, 平动关节的控制误差小于 10mm。控制效果不是非常理想, 对比表 5-1 所示

的单关节点动精度相差较大。

表 5-2 基于经典 PID 控制的单关节控制精度表

关节号	关节类型	传感器类型	单关节控制精度
1	旋转关节	编码器	1°
2	俯仰关节	倾角传感器	0.9°
3	伸缩关节	拉绳位移传感器	10mm
4	俯仰关节	倾角传感器	0.8°
5	旋转关节	拉绳位移传感器	9mm
6	伸缩关节	拉绳位移传感器	10mm
7	旋转关节	编码器	1°
8	旋转关节	编码器	1.1°

### 5.1.2 基于模糊 PID 的单关节控制

经典 PID 算法的  $K_p$  值是根据人工调试给定且不变的，该控制对象驱动系统为液压驱动，其驱动稳定性很差，经过实际调试发现，在运动范围不一样时，驱动能力也会受到一定影响，控制参数应根据关节误差或误差变化率进行调整，使得驱动量也随之调整，使得控制精度进一步提升。

模糊 PID 控制与经典 PID 控制不同，模糊 PID 控制通过计算误差及误差的变化率，通过模糊规则进行模糊推理便可获得控制参数调整量并实时调整更新 [71]，其代表式与参考公式 5-1。模糊 PID 控制方法的关键是根据机械臂实际控制测试和隧道施工人员的实际经验，建立适用于本机械臂的模糊规则表和误差和误差的变化率范围，最后形成调整  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  控制参数的模糊控制表 [71]。针对不同的误差和误差变化率， $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  的整定原则为：当关节误差的绝对值较大时， $K_p$  的取值应较大而  $K_d$  的取值应较小， $K_i$  取 0 以避免系统产生较大的超调；当关节误差和误差变化率的绝对值大小比较适中时，采用较小的  $K_p$  值，由于此时  $K_d$  的取值对系统的影响较大，采用较小的  $K_d$  值，取适中的  $K_i$  值以使的系统超调较小；在关节误差的绝对值较小的情况下，取较大的  $K_p$  和  $K_i$  值，使得系统稳定性提升，当在关节设定值处出现震荡情况时，若误差的绝对值较大，则  $K_d$  取小值，若误差的绝对值较小，则  $K_d$  取大值。

针对本文的控制对象，其中关节误差和误差变化率的绝对值大小根据实际调试得出，调节  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  的模糊规则如下表所示：

表 5-3  $\Delta K_p$  模糊规则表

$\Delta K_p$	ERROR						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NB
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 5-4  $\Delta K_i$  模糊规则表

$\Delta K_i$	ERROR						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	NS
NS	NB	NM	NM	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 5-5  $\Delta K_d$  模糊规则表

$\Delta K_d$	ERROR						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

其中, ERROR 表示偏差, NB 为负方向大的偏差, NM 为负方向中的偏差, NS 为负方向小的偏差, ZO 为近于零的偏差, PS 为正方向小的偏差, PM 为正方向中的偏差, PB 为正方向大的偏差; 根据已经整定过的经典 PID 参数, 得到误差和误差变化率的变化范围, 模糊控制器的解模糊方法为面积中心法[71]。

经过多次调试后发现, 使用模糊 PID 进行单关节控制的控制效果优于经典 PID。各关节的单关节控制精度如表 5-6 所示, 精度测算方法与单关节经典 PID 控制的精度测算相同, 其中, 旋转关节的控制误差约为  $0.5^\circ$ , 平动关节的控制误差约为 4mm, 但与表 5-1 中的精度仍有一定差距。

表 5-6 单关节控制精度表

关节号	关节类型	传感器类型	单关节控制精度
1	旋转关节	编码器	$0.3^\circ$
2	俯仰关节	倾角传感器	$0.4^\circ$
3	伸缩关节	拉绳位移传感器	4mm
4	俯仰关节	倾角传感器	$0.4^\circ$
5	旋转关节	拉绳位移传感器	4mm
6	伸缩关节	拉绳位移传感器	3mm
7	旋转关节	编码器	$1^\circ$
8	旋转关节	编码器	$1.1^\circ$

### 5.1.3 基于分段 PID 的单关节控制

经过前两种 PID 控制方法的实际测试后, 熟悉了各关节的具体驱动特性, 模糊 PID 控制方法的可控制精度较经典 PID 有所提高, 证明跟根据单关节误差大小及误差变化率进行控制参数调整是可行的。对于模糊 PID 的控制精度达不到理想情况, 原因可能是对于各参数模糊规则表的设定不够合理, 对于偏差的分段不够细致。

首先, 通过关节传感器进行各关节的实际运动范围测试, 测试结果如下表 5-7 所示:

表 5-7 各关节实际运动范围测试表

关节号	关节类型	实际运动范围	传感器类型
1	旋转	$-180^\circ \sim 90^\circ$	编码器
2	俯仰	$-25^\circ \sim 75^\circ$	倾角传感器
3	伸缩	0mm ~ 1900mm	直线位移传感器
4	俯仰	$-25^\circ \sim 75^\circ$	倾角传感器
5	旋转 (伸缩转换)	0mm ~ 750mm	直线位移传感器
6	伸缩	0mm ~ 2200mm	直线位移传感器
7	旋转	$0^\circ \sim 360^\circ$	编码器
8	旋转	$0^\circ \sim 240^\circ$	编码器

经实际测试，各关节在运动范围不同，偏差不同时，对应的驱动量的变化也不同。据此，进行了单关节细分不同运动范围时的驱动量测定，并基于此设计了基于分段 PID 的单关节位置控制方法，各关节控制参数根据误差大小及运动范围进行自适应调整。

以关节 1 为例，关节 1 的运动范围是  $-180^\circ$  至  $90^\circ$ ，有正负两个方向，分为  $-180^\circ$  至  $0^\circ$  和  $0^\circ$  至  $90^\circ$  两个区间，为了方便参数的调整，先进行基于 PI 算法的分段测试，PI 算法公式如下：

$$Out(Dq) = Kp[e(t) + \frac{1}{Ti}e(t)dt] \quad (5-5)$$

其中  $Out(Dq)$  代表输出关节驱动量，其中  $Out(Dq)$  代表输出关节驱动量， $Kp$  为比例系数， $e(t)$  为关节设定值与测量值的差值， $Ti$  为积分周期。分段区间采用人工测试的方式，对于每个不同的区间，调整控制参数，记录下可以达到接近单关节点动精度的  $Kp$  和  $Ti$  数值。在此基础上参考式 5-1，就加入微分系数及进行测试。

测试过程中，发现不同分段之间的驱动量会产生跳变，为了使控制更加平滑，对驱动量进行斜坡函数处理，使其变化平缓。经过多次测试后，控制精度测算方式与单关节经典 PID 控制的测算方式相同，单关节控制精度如表 5-8 所示，除 7、8 两个关节外，旋转关节的控制误差小于  $0.1^\circ$ ，平动关节的控制误差小于 1mm。

表 5-8 基于分段 PID 单关节控制精度表

关节号	关节类型	传感器类型	单关节控制精度
1	旋转关节	编码器	$0.1^\circ$
2	俯仰关节	倾角传感器	$0.1^\circ$
3	伸缩关节	拉绳位移传感器	1mm
4	俯仰关节	倾角传感器	$0.1^\circ$
5	旋转关节	拉绳位移传感器	1mm
6	伸缩关节	拉绳位移传感器	1mm
7	旋转关节	编码器	$0.9^\circ$
8	旋转关节	编码器	$0.8^\circ$

7、8 两关节的控制误差较大的原因是关节驱动特别灵敏，驱动量如果按每个控制周期连续给的话很难达到点动控制精度。基于此，对于 7、8 关节的控制采用闭环分段点动控制，在控制周期内按次发送驱动量数据。经过多次测试，单关节控制精度如表 5-9 所示，控制精度测算方式与单关节经典 PID 控制的测算方式相同，可见其控制精度与单关节点动精度基本一致。

表 5-9 修改后的分段 PID 单关节控制精度表

关节号	关节类型	传感器类型	单关节控制精度
1	旋转关节	编码器	0.1°
2	俯仰关节	倾角传感器	0.1°
3	伸缩关节	拉绳位移传感器	1mm
4	俯仰关节	倾角传感器	0.1°
5	旋转关节	拉绳位移传感器	1mm
6	伸缩关节	拉绳位移传感器	1mm
7	旋转关节	编码器	0.2°
8	旋转关节	编码器	0.2°

## 5.2 八自由度机械臂轨迹跟踪算法

### 5.2.1 轨迹跟踪算法概述

本文的控制对象为隧道喷浆机的八关节机械臂，对于其轨迹跟踪算法的设计，需要考虑的因素很多。其关节驱动系统复杂，关节数较多且运动方向类似的导致了关节驱动系统之间相互耦合、相互影响；重力因素导致末端关节驱动能力下降、控制精度降低；控制算法如何对接轨迹数据等。针对以上问题，基于单关节的控制方法并结合关节联动的驱动限制等因素的考虑，加入了一些认为限定条件，如二四耦合关节在需要同时运动使，先运动近端关节再运动远端关节；进行了负载测定实验，对重力产生的控制偏差进行分段补偿；对于轨迹规划给出的末端轨迹点数据进行实时运动学解算，在运动学模型选解的基础上加入轨迹跟踪控制仿真，找出异常点并及进行取代。最终设计了基于分段 PID 控制的多关节耦合控制算法。

控制算法流程如图 5-2 所示：初始化完成后，判断是否获取到轨迹规划所给出的目标轨迹数据；然后经由运动学模型解算出每个位置点的各驱动关节数据；将数据传至加入分段重力补偿的基于分段 PID 的多关节耦合控制算法得出各关节驱动控制量。将驱动控制量传至各执行关节结合实时的传感器数据进行自适应调整；最后使得位置点误差（位置、朝向由正向运动学模型解出）控制在允许范围内。实际控制过程中，为了使轨迹更加圆滑，控制过程连续，在设置位置点误差允许范围时调至理想误差的 1.5 倍，在走轨迹时，若某点的控制误差达不到允许范围，在安全范围内则对其进行舍弃，直接进入下一点。

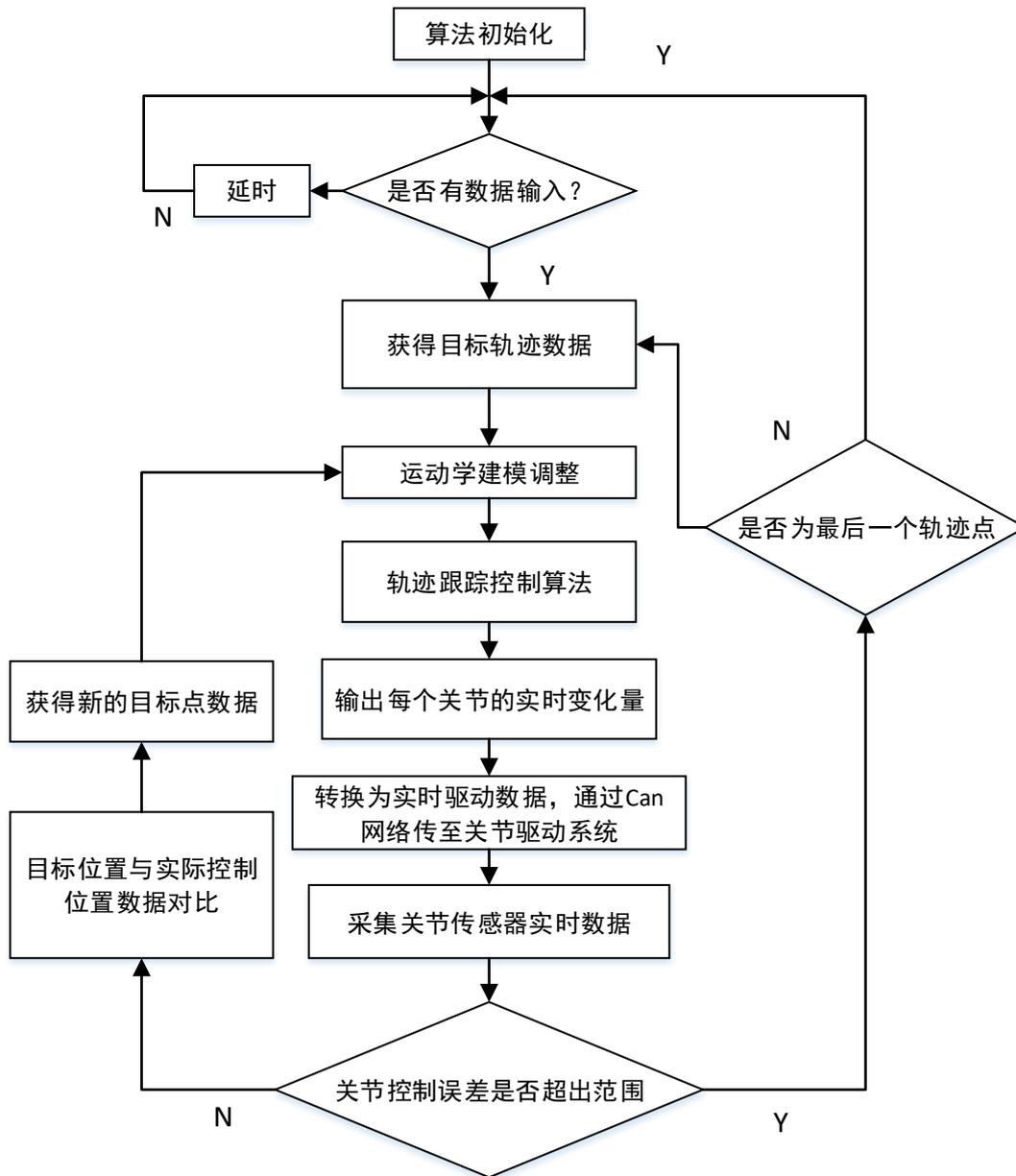


图 5-2 控制算法流程图

### 5.2.2 机械臂抖动抑制

本系统机械臂由八自由度组成，每个关节的驱动都会造成末端关节或多或少的抖动，抖动不可避免，但是需要抑制影响施工精度的大抖动，抖动影响因素归结如下：

- (1) 机械臂自身驱动特性为液压驱动，驱动时的急停急起容易产生较大抖动；
- (2) 对于关节驱动的控制不平缓，短时间大范围的移动会使机械臂自身产生较大抖动；
- (3) 关节的移动，距离末端越远的产生抖动相对越大；

(4) 喷浆时由于喷出的混凝土经由机械臂喷出，会改变机械臂的负载进而产生抖动；

(5) 施工情景下，机械臂自身任何物理上的接触都会产生一定程度的抖动；

针对抖动产生原因的 (1) (2) (3)，本文所采用的解决途径有：

(1) 在完成轨迹规划以后的调用逆向运动学求解的过程中，应尽量避免驱动离末端位置远的关节，减少关节位置的跳变；

(2) 在进行机械臂的运动控制时，通过实时位置误差进行驱动关节的驱动量的调整时应注意驱动量数值的连续性，本文采用了斜坡函数进行连续性处理，使得不同关节的驱动量在不同设定范围内的数值曲线为斜率各不相同的直线。

(3) 对于不同油温下的机械臂的启动与停止进行驱动量测试，得出驱动量的经验范围，然后根据 CAN 总线收到的油温温度进行驱动量的自适应调整。

针对抖动产生原因 (4)，本文所采用的解决方法是：a、进行多次恒定负载实验，其中负载的测算根据实际施工时喷射管道中所带混凝土的重量得出，机器人喷射管道长度 15 米，内径 80mm，喷料密度 2.4 吨每立方米，得出恒定负载约为 181 千克，我们采用在机械臂上分段加重的形式进行测试以进行初步的控制补偿。B、进行多次动态负载试验，先从喷水实验开始，对于不同泵送量所引起的负载不同，先结合实际喷射情况对泵送量进行分挡，本文分为中高低三档，不同的挡位进行多组测试，得出最优的控制参数，然后对控制算法的各项系数进行调整，进行重力补偿，在不同分段直接增加不同的常量 a 进行驱动量的补偿，公式如式 5-5 所示，减少由负载变化引起的机械抖动与控制误差。

$$Out(Dq) = Kp[e(t) + \frac{1}{Ti}e(t)dt + Td\frac{de(t)}{dt}] + a \quad (5-6)$$

针对抖动产生原因 (5)，本文所采用的解决方法是：

(4) 碰撞检测，以避机械臂与施工场地产生碰撞，利用轨迹跟踪的仿真进行碰撞检测。对于超出特定范围的点采用其临近范围内点插值的方法进行取代。

### 5.3 目标控制轨迹仿真

根据期望轨迹给出的数据，进行运动学解算，得出各个位置点的关节变化量，在模拟仿真环境中转化为各个位置及之间的传感器数据并绘制出运动曲线。为实际控制调试打下基础。

#### 5.3.1 目标控制轨迹仿真目的

由于机械臂结构复杂，具有一定的静态误差，对于机械臂的精准控制非常困难，运动轨迹跟踪需考虑实际情况，为确真机测试的稳定性，需对轨迹跟踪进行基于 Matlab 工具箱的软件仿真，其目的如下：

- 与运动轨迹规划给出的期望运动轨迹进行更加直观的对比，测试控制效果；
- 根据与运动轨迹规划给出的期望运动轨迹的比较，方便调参与调整算法，以实现更优的运动控制；

### 5.3.2 目标控制轨迹仿真步骤

在已有的机械臂运动学建模的基础上，结合运动轨迹规划所给出的运动轨迹以及机械臂运动传感器实时回传的位置建立仿真平台进行轨迹跟踪的仿真，以便于根据实际控制效果进行算法参数优化。步骤如下：

- 运动轨迹规划给出目标运动轨迹，包括末端喷头初始位置点、结束位置点以及若干个中间位置点、和各个关节的对应的运动变化量，将期望运动轨迹导入仿真平台；
- 将期望运动轨迹的各关节运动变化量经由控制算法（加入控制误差）转化为实际各关节的运动变化量和驱动量，给到喷浆机器人，按控制周期记录所有关节传感器的数值；
- 根据传感器回传的实际各关节的运动变化量代入正向运动学解算模型，得出每个期望点对应的实际喷头末端位置，勾勒出实际轨迹运动曲线并与期望控制曲线进行对比；

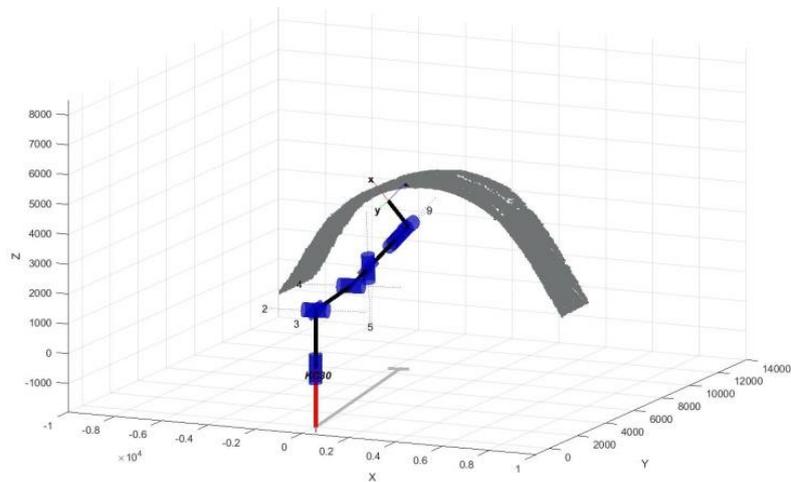


图 5-3 机械臂目标控制轨迹仿真图

## 5.4 实际控制效果测试

完成上述所有部分的研究工作后，本部分进行了算法实际控制效果测试。实验测试分为两个部分，一为测试控制机械臂走点（达到特定位置）时的关节控制误差最大值，总共选择了不同位置的 50 组点位进行测试；二为测试控制机械臂

走轨迹时各关节的控制误差, 设定多条期望轨迹, 记录实际运动轨迹的各关节传感器数据, 将期望数据与实际数据进行对比得出各关节出现的误差最大值。各节带负载的综合联动控制精度(平均值)如下表 5-10 所示:

表 5-10 关节联动控制精度表

关节号	关节类型	控制误差最大值	控制精度
1	旋转关节	0.51°	0.29°
2	俯仰关节	0.49°	0.32°
3	伸缩关节	8.83mm	5.89mm
4	俯仰关节	0.56°	0.24°
5	旋转关节	9.45mm	5.23mm
6	伸缩关节	7.52mm	4.38mm
7	旋转关节	0.89°	0.43°
8	旋转关节	0.98°	0.48°

通过正向运动学解算结合运动学模型固有误差可得到末端喷枪的实际位置误差绝对值(对比末端在空间中实测的位置得出)的最大值是: X 方向约为 23mm、Y 方向约为 55mm、Z 方向约为 90mm(施工允许的臂架喷嘴的各方向误差约为 100mm), 造成机械臂末端不同方向的误差大小不同的原因主要有两点, 一是由于各关节的控制精度各不相同(伸缩关节精度相对高于旋转关节精度), 二是由于机械结构原因(如机械臂自身重量会导致 Z 方向存在较大误差); 在规定末端喷枪垂直于待施工隧道壁面的情况下, 末端喷头的最大朝向误差(在末端加装激光测距传感器, 通过三角变换得出)约为 4.5°(臂架喷嘴朝向施工面的角度要求为:  $90^{\circ} \pm 5^{\circ}$ ); 轨迹跟踪控制所达到的位置精度和朝向精度都满足了喷浆机器人施工的实际要求。

## 5.5 本章小结

本章首先简要介绍了底层控制部分, 主要研究了单关节控制, 单关节的控制精度接近实际点动精度, 为轨迹跟踪控制算法打下了坚实的基础; 在这基础之上设计了基于动态 PID 控制的多关节联动的轨迹跟踪控制算法, 基本实现了控制效果, 但存在一定抖动误差; 在分析抖动误差产生原因后, 对算法进行调整, 如在驱动关节时系统给出的驱动量中加入了斜坡函数等, 使得抖动产生的误差减少; 最后的进行的实际控制效果测试, 通过多组实际数据的验证, 证明了轨迹跟踪控制可满足实际工况要求。

## 6 自动喷浆机器人的系统集成及模拟隧道实验

在完成了运动学建模、环境感知及重建、轨迹规划和轨迹跟踪控制的研究工作后，需要在模拟隧道环境下的实验将对机器人的各部分进行整合，将实际轨迹运动情况与基于实际工况的期望轨迹进行对比，验证本文所介绍的智能喷浆机器人的性能。本章将从系统集成、模拟隧道实验及模拟隧道实验分析三部分展开阐述。

### 6.1 自动喷浆机器人系统集成

#### 6.1.1 硬件改装

硬件的改装主要包括三大部分：加装工控机、加装运动控制器以及加装各类传感器。

硬件改装完成之后的喷浆机器人如图 6-1 所示：



(a) 改装后的喷浆机

(b) 各部分传感器安装情况

图 6-1 硬件改装示意图

工控机负责上层运算，采用研华系类工控机；其防护等级达到工业级，满足施工环境要求；稳定性高，运算能力强；接口丰富，支持 CAN 网络通信和以太网通信。

运动控制器负责运动控制以及与原机驱动系统的通信，采用易福门系列控制器；其防护等级达到工业级，满足施工环境要求；稳定性高，运算能力较强；支持 CAN 网络通信。

传感器部分主要是三维建模设备和关节传感器，前文已做过简单介绍，总结所需传感器类型有如下四类：

- 角度传感器——测量臂杆的旋转角度；
- 倾角传感器——测量臂杆的俯仰角度；

- 直线位移传感器——测量臂杆的伸缩长度；
- 二维激光雷达——环境感知与重建；

### 6.1.2 软件开发

软件开发包含两大部分内容：一是各研究模块的软件实现，包括运动学规划、三维重建、轨迹规划和轨迹跟踪控制；二是通信网络的搭建，包括工控机与运动控制器的数据通信、运动控制器与原机控制系统的通信以及传感器与各控制器之间的通信。

本文设计开发了基于改装机型的上位机控制平台——ASCRCP（Automatic Shotcrete Robot Control Platform）。操作手打开该系统，就会进入主界面，系统界面如图 6-2 所示：



图 6-2 ASCRCP 界面示意图

操作模式分为全自动和半自动喷射，全自动模式不需要人为介入，系统从建模到最后的喷射施工全自动化；半自动模式很大程度上简化了传统隧道施工操作的难度，可通过操作手直接控制喷头末端进行施工作业。打开上位机，可选择操作模式；系统状态反馈模块显示平台当前状态；半自动模块显示系统在半自动操作模式下的机械臂末端运动情况；全自动模块显示系统在全自动操作模式下的机械臂末端运动情况；关节位置控制模块显示各关节实时位置与误差情况。

在全自动模式下，先点击关节归零按钮，机械臂将运动至扫描位姿；点击识别解算按钮，系统将自动进行三维重建、轨迹规划以及运动学解算三部分操作，每个部分完成后都会有弹框提示；点击读取数据按钮，轨迹跟踪控制模块将自动读取关节运动序列数据；点击运动至初始点，机械臂将运动至预设好的目标起始

位置（右端底部）；点击开始运动按钮，机械臂末端开始按期望轨迹运动。

在半自动模式下，先点击关节归零按钮，机械臂将运动至扫描位姿；点击识别解算按钮，系统将自动进行三维重建、轨迹规划以及运动学解算三部分操作，每个部分完成后都会有弹框提示；点击读取数据按钮，轨迹跟踪控制模块将自动读取关节运动序列数据；点击运动至初始点，机械臂将运动至距离机械臂末端最近的规划点位置；点击开始运动按钮，此时可通过摇杆直接控制机械臂末端，在规划好的轨迹中进行移动，移动方向由拨动摇杆的方向确定，移动速度根据拨动摇杆的力度自适应调整；与全自动模式相比，半自动模式的喷射量是人工调整的；由于全自动喷射模式存在的不确定因素较多，半自动模式更加成熟。

出现意外情况，可点击紧急停止按钮，系统将退出全自动或半自动模式，此时可通过人工操作进行干预；点击退出平台按钮可正常退出操作系统。

## 6.2 模拟隧道实验

### 6.2.1 实验目的

在完成了系统整合之后，需对自动喷浆机器人的性能进行测试。由于进行实际隧道测试存在一定难度和安全问题，故选择进行模拟隧道环境下的全自动模式实验。模拟隧道仿造实际隧道搭建，其大小相近，钢拱等隧道特征结构兼具；通过在模拟隧道下的真机测试可验证自动喷浆机的各部分性能，为之后的真实隧道测试打下坚实的基础。实验分为不带负载的轨迹运动实验与带负载的喷水运动轨迹实验，分别测试其末端喷头的位置角度误差以及在模拟隧道钢拱位置时的位姿。

### 6.2.2 不带负载的运动轨迹实验

不带负载的轨迹运动实验的目的是验证系统各部分功能以及在不喷射情况下的末端喷头位姿是否符合实际施工要求，其实验步骤如下：

1. 实验准备：喷浆机器人在搭建好的模拟隧道实验中，将所有关节恢复到初始位置。模拟隧道、原机停放位置如图 6-3 所示：



图 6-3 实验准备图示

1. 打开自动喷浆机器人上位机控制平台，选择全自动模式，开始雷达三维建模，由于模拟隧道尺寸、特征结构与实际隧道存在一定差别，参数有所调整，模拟隧道三维模型如图 6-4 所示，识别出的模拟隧道特征信息如图 6-5 所示。

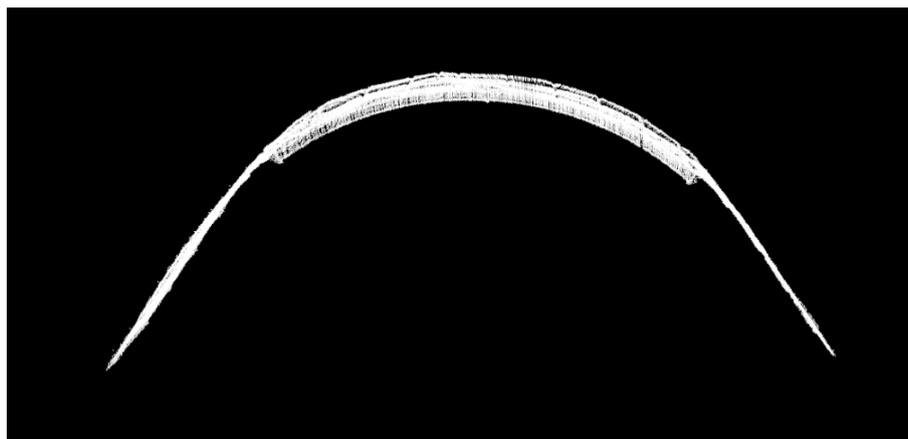


图 6-4 模拟隧道三维模型

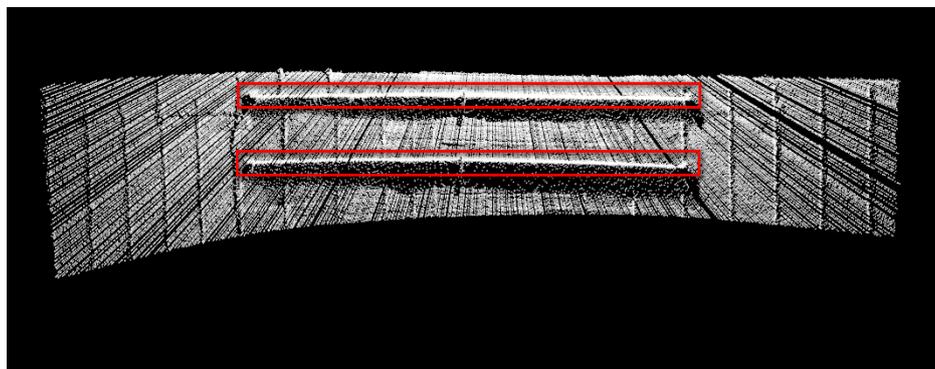


图 6-5 钢拱结构三维识别

2. 其次，针对三维重建结果，规划出末端喷枪运动沿隧道面走弧形轨迹，末端轨迹示意图如图 6-6 所示，其中白色短线为带朝向的喷头轨迹表示，喷头垂直朝向图中橙色待喷面区域。

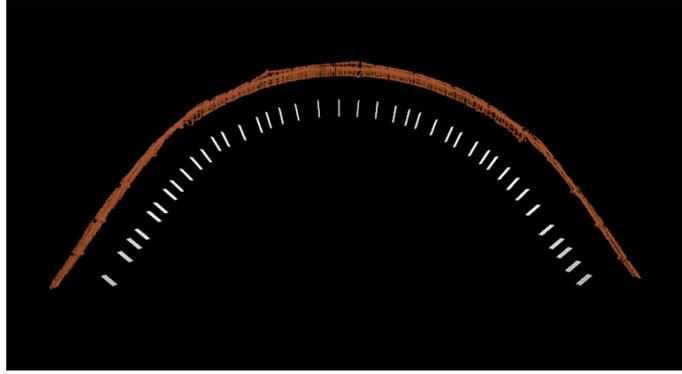


图 6-6 喷枪轨迹图

3. 通过逆向运动学得到关节序列，传输给底层控制部分；所有数据将会代入仿真系统进行测试，以确保数据合理。
4. 底层控制根据收到的关节序列对喷浆机进行联动控制，在模拟隧道下实现期望轨迹运动。
5. 对于不带负载的运动轨迹实验，每隔 20ms 采集一次关节传感器实时数值，对比期望轨迹与实际轨迹的位置与朝向误差，观察末端喷头在隧道钢拱位置时的位姿，实验结果见实验分析。

### 6.2.3 带负载的喷水运动轨迹实验

考虑到实际喷射时将会带来负载上的改变，而实际喷射混凝土难度较大，故先进行带负载的喷水运动轨迹实验。在喷射混凝土时，机械臂喷射管道长度 15 米，内径 80mm，喷料密度 2.4 吨每立方米，得出负载约为负载约为 181 千克。在喷水时，由于水的密度为 1 吨每立方米，得出负载约为 76.7 千克。为了模拟实际喷射混凝土时的负载改变情况，在喷水的同时喷射管道上均匀加重，补偿由于水的密度较小而引起的负载欠缺量，约 105 千克。实验步骤如下：

1. 准备共计 105 千克的可悬挂重物。
2. 将喷浆机置于空地，将负载均匀挂载喷射管道上，如图 6-7 所示：



图 6-7 带 105 千克负载的机械臂图示

3. 打开自动喷浆机器人上位机控制平台，选择全自动模式。通过设定一条目标轨迹使机械臂开始运动，如图 6-8 所示：



图 6-8 带负载喷水实验示意图

4. 对于带负载的喷水运动轨迹实验，每隔 20ms 采集一次关节传感器实时数值，对比期望轨迹与实际轨迹的位置与朝向误差，观察末端喷头喷水时运动的连续性和稳定性。

#### 6.2.4 实验分析

在进行多组不带负载的轨迹运动实验和带负载的喷水轨迹运动实验后，做出实验分析如下：

对于不带负载的轨迹运动实验，从三维重建到机器人开始运动期间的系统运行时间约为 2 分钟，其中三维重建部分占大约 1 分钟。通过 Matlab 仿真可以直观的看到机械臂的实际运动情况与期望运动情况的对比，如图 6-9 所示。为了更加直观的体现轨迹跟踪控制效果，通过正向运动学模型对所采集的关节传感器数据进行结算，可得到末端喷头的实时位置并通过 Matlab 绘制出其运动曲线，与目标运动轨迹的对比图示如图 6-10 所示，其中红色曲线代表实际运动轨迹，绿色曲线代表期望运动轨迹。

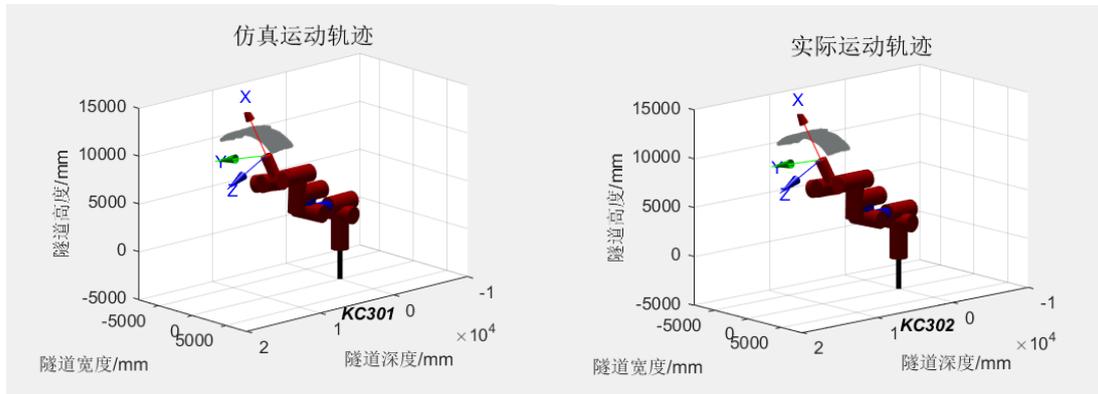


图 6-9 matlab 轨迹仿真图

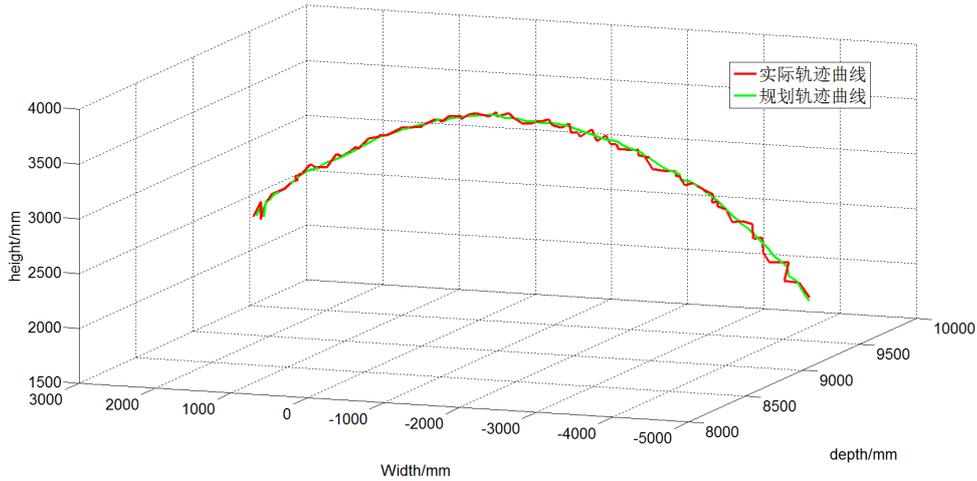
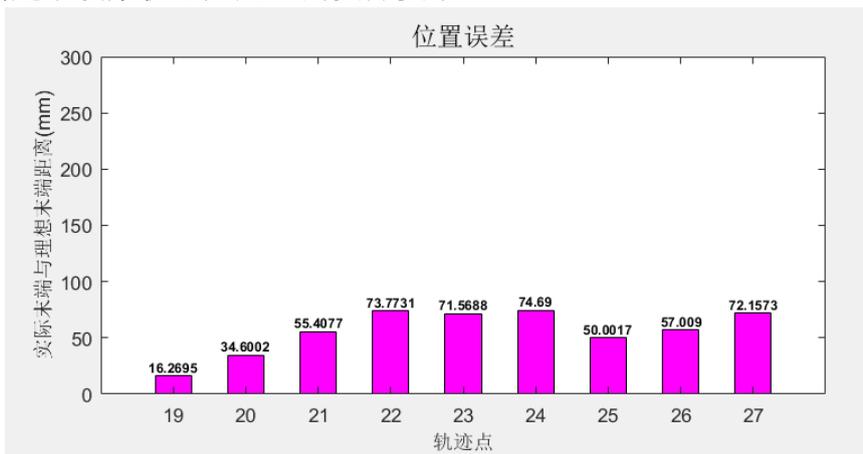


图 6-10 实际轨迹与规划轨迹对比图

通过 Matlab 仿真可以直观的看到机械臂的末端实时的位置和角度误差，如图 6-11 所示。以每组 80 个轨迹点为例，计算得出的末端喷头总体位置误差如图 6-12 所示。位置误差 Error 的计算公式如下：

$$Error = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (6-1)$$

其中 X、Y、Z 代表末端喷头坐标系三个方向的误差值。自动喷浆机器人末端喷嘴的位置误差总体在 80mm 以内，平均误差在 36mm 左右（臂架喷嘴位置误差要求为 100mm）；以每组 80 个轨迹点为例，计算得出的喷头总体角度误差如图 6-13 所示，在规定末端喷枪垂直于待施工隧道壁面的情况下，末端喷头的角度误差总体在 5°以内，平均误差 2°左右（臂架喷嘴朝向施工面的角度要求为：90°±5°）；可以看出自动喷浆机器人在模拟隧道环境下所达到的位置精度和朝向精度都满足了喷浆机器人施工的实际要求。



(a)

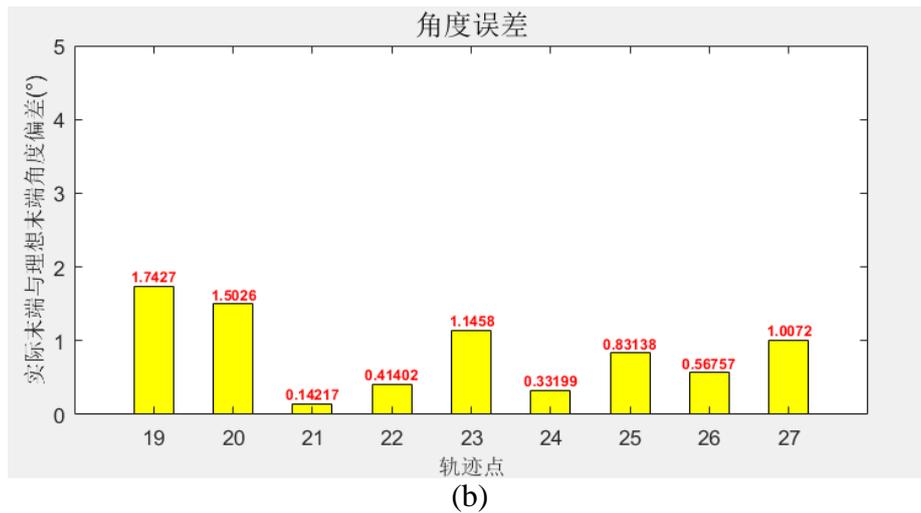


图 6-11 (a)机械臂末端实时的位置误差示意图(b) 机械臂末端实时角度误差示意图

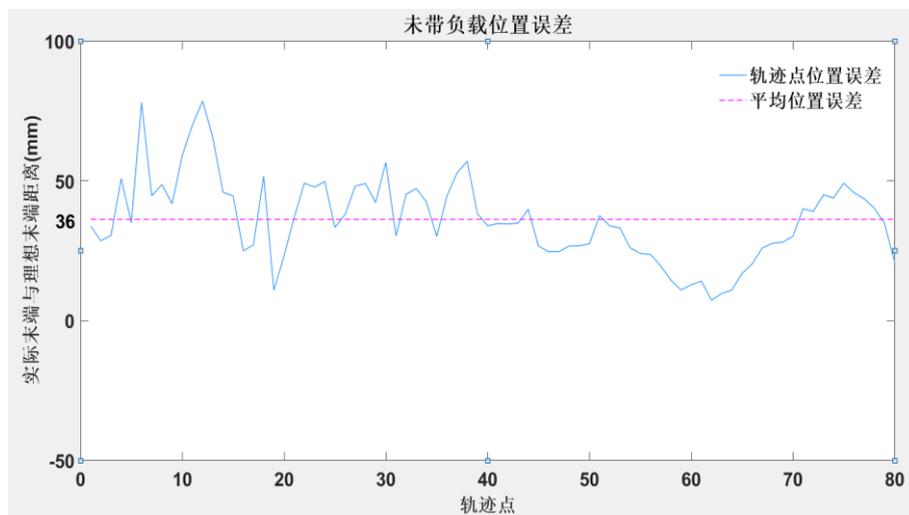


图 6-12 未带负载末端位置误差图

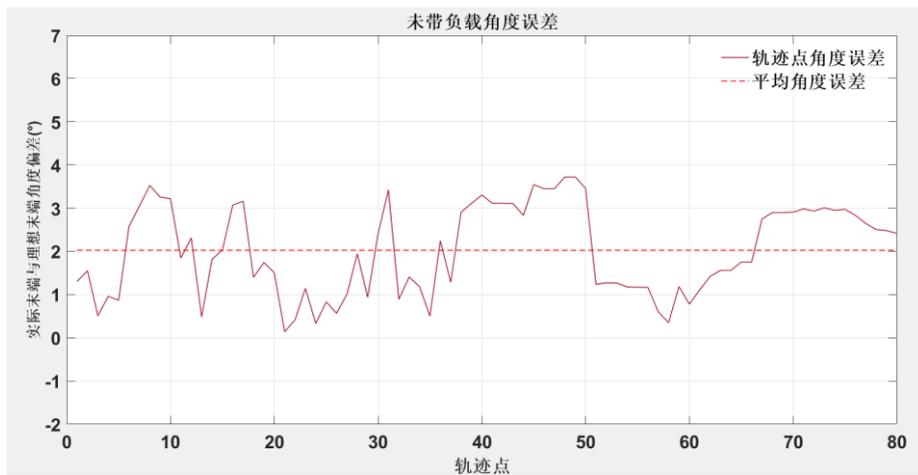


图 6-13 未带负载末端角度误差图

自动喷浆机器人末端喷头在模拟隧道中特殊位置的情况如图 6-14 所示,在正常待喷位置垂直于待喷面;在钢拱位置时,内侧与外侧都有一定角度的偏差;可以看出自动喷浆机器人在模拟隧道环境下的位姿基本符合实际喷射时的情况。



(a) 隧道左中右三个位置的喷枪位置图



(b) 在钢拱位置的喷枪斜喷示意图

图 6-14 模拟隧道中特殊位置图

对于带负载的喷水轨迹运动实验，从三维重建到机器人开始运动期间的系统运行时间约为 2 分钟，其中三维重建部分占大约 1 分钟。可通过 Matlab 仿真直观的看到机械臂的实际运动情况与期望运动情况的对比以及机械臂末端实时的位置及角度误差。通过正向运动学模型对所采集的所有规划点的关节传感器数据进行结算，可得到末端喷头在所有目标点的实时位置，并通过 Matlab 绘制出其运动曲线，与目标运动轨迹的对比图示如图 6-15 所示，波动稍大于未带负载时的轨迹对比曲线，但总体来说效果也比较理想。

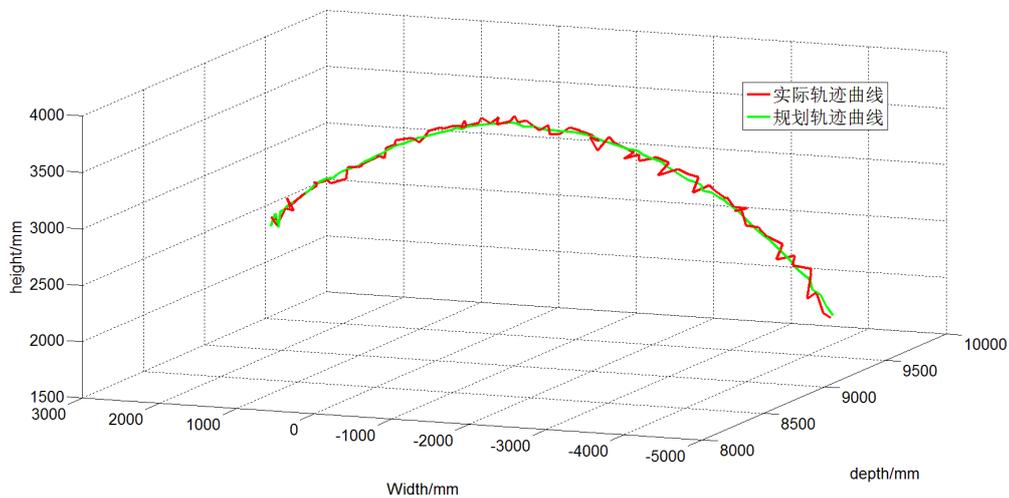


图 6-15 实际轨迹与规划轨迹对比图

具体的，同样以 80 个轨迹点为一组，计算得出的末端喷头位置误差如图 6-16 所示。自动喷浆机器人末端喷嘴的位置误差总体在 120mm 以内，误差计算方式公式同公式(6-1)。平均误差在 53mm 左右(臂架喷嘴位置误差要求为 100mm)；计算得出的末端喷头角度误差如图 6-17 所示，在规定末端喷枪垂直于待施工隧道壁面的情况下，末端喷头的角度误差总体在 6°以内，平均误差 2.7°左右(臂架

喷嘴朝向施工面的角度要求为： $90^{\circ} \pm 5^{\circ}$ )；通过模拟实际喷浆的实验得出的结果，进一步说明了自动喷浆机器人所达到的位置精度和朝向精度满足喷浆机器人施工的实际要求。

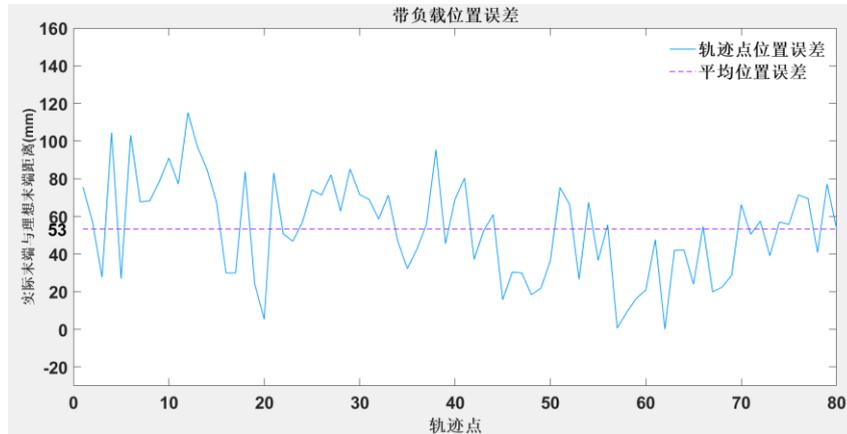


图 6-16 带负载末端位置误差图

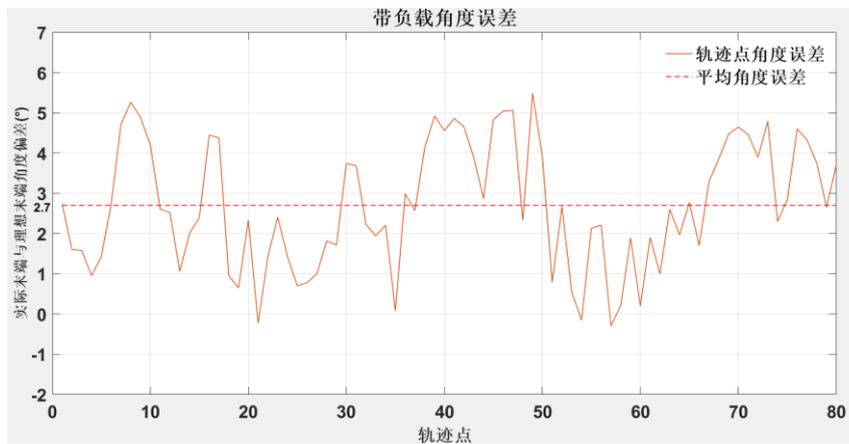


图 6-17 带负载末端角度误差图

综上，本文设计的自动喷浆机器人性能完善，稳定性强，基本符合实际施工要求，将来可用于隧道实际施工。

### 6.3 本章小结

本章首先简要介绍了系统集成部分，完成对于原有机型的硬件改装是实现自动喷浆机器人的基础；在硬件基础之上设计开发了基于改装机型的自动喷浆控制平台，平台操作简单（支持全自动模式与半自动模式），集成性高（运动学建模、三维重建、轨迹规划、运动轨迹跟踪控制、通信网络等一体化）。最后进行了模拟隧道实验测试，分为两部分，一是不带负载的轨迹运动实验，二是带负载的喷水轨迹运动试验。通过多组实际数据结验证，对比实际施工要求，证明了本文设计的自动喷浆机器人性能可满足实际工况要求且鲁棒性高，本文设计的自动喷浆机器人具有一定的学术价值和社会意义。

## 7 工作总结与展望

### 7.1 论文总结

目前隧道支护作业中的隧道初喷施工主要由人工操控多自由度的喷浆机器人完成。由于隧道环境恶劣和工作劳动强度大,该工作对施隧道施工人员身体伤害极大。而现阶段国家建设隧道的需求量极大,长期以来,我国自主研发的喷射机在智能化、自动化、信息化控制等性能方面与国外设备相比,仍存在较大差距。而智能工业是未来的发展方向,对于隧道自动喷浆机器人的研究具有极大社会意义。

目前,由于研发条件限制,对于隧道自动喷射机器人的相关研究内容少之又少。已经出现的一些关于智能机械臂架和自动喷射机器人仿真系统等研究,但是能够运用到隧道的在世界范围并未发现。主要有以下几个难点:1)隧道环境复杂恶劣,研究测试困难;2)喷浆设备智能程度低,改造困难;3)自动喷浆机器人所涉及的研究内容广泛,每部分都具有一定的难度,而当前可参考基于实际工况环境的方法过少。故对于隧道自动喷浆机器人的研究具有重大学术价值。

本文的主要研究内容如下:

#### 1) 运动学模型:

给定各个关节变量值,通过正向运动学模型,可以得到机械臂末端喷头的实时位姿;给定末端喷头的位姿,通过基于固定角法的逆向运动学模型的求解,可以得到各个机械臂的各个关节需要到达的变量值;对于多解优化问题,根据实际操作情况设定筛选条件,最终从16组解中选出最优解。

#### 2) 环境感知及重建:

通过三维重建装置对环境进行扫描并重建,在扫描得到的隧道点云数据上进行去噪、采样、隧道中轴线提取及隧道特征面特征识别等三维数据处理,最终得到待施工面所覆盖的点云区域信息,包含点云位置信息及其法向量。

#### 3) 运动轨迹规划:

根据三维重建得到的隧道特征信息,以完成隧道面喷浆支护任务为目的,在喷浆机械臂的可达运动范围内规划出一系列基于极坐标系的末端喷枪具体位置和朝向,首先利用正向运动学模型进行点云坐标到基坐标系的转换,其次进行基于点云切片的喷浆轨迹规划。

#### 4) 运动轨迹跟踪控制

根据末端位置的期望目标轨迹数据,获得末端位置相应时刻的实际位置和朝向等,通过正向运动学解算得到各关节的变化量。本部分包含基于单关节分段PID控制算法、多关节轨迹跟踪控制算法以及机械臂抖动抑制;轨迹跟踪算法输

出的各关节变化量数据，结合各关节传感器实时传回的实际数据进行实时调整，控制机械臂末端实现期望轨迹。

本文设计的自动喷浆机器人通过了模拟隧道环境的测试实现，该机器人实现了在实际工况下所需功能的整合；从环境感知到轨迹规划再到最后的轨迹跟踪控制，自动喷浆机器人在模拟隧道中能够自主走出类实际喷浆的轨迹，在一些隧道特征结构部位也有相应的末端喷头位姿，在控制精度上也满足了实际工况的需求。由于对实际喷射混凝土的相关研究还不够成熟，在实际应用中，先开发了一套半自动喷射系统，极大程度减轻了隧道喷射的操作难度，系统设制两个摇杆，可直接控制末端喷头的位置（取代传统操作八个关节），操作手只需控制喷射量；对于一个经验不够的操作手来说，可以通过该系统进行隧道施工，且效率也高于传统施方式；全自动的喷射系统现阶段还剩喷射量的规划未完成，但在模拟隧道中已经可以实现除喷浆以外的所有功能性测试。尽管，距离全自动隧道喷浆还有一定的距离，但是基于现有的基础，相信通过努力在不久的将来，肯定能够达到这样的水平，打破传统，为智能工业奉献一份力量。

## 7.2 工作展望

本文阐述了一款可适用于复杂隧道的自动隧道喷浆机器人，目前喷浆机器人处于模拟隧道实验阶段，实验结果显示，结合模拟隧道的喷浆机器人控制精度符合工业要求，并且三维重建系统不受隧道恶劣环境的影响，证明了喷浆机器人完成隧道喷浆任务的可行性。接下来的任务是结合混凝土喷射在真实隧道中测试喷浆情况进行进一步实验并对方法进行改进，结合喷浆轨迹的优化实现最终的隧道实际全自动喷射作业。接下来的工作大概为以下几个方面：

- 1) 尝试进行原机驱动特性建模，将不可控的因素参数化，以完成更好的控制效果；
- 2) 尝试更多的控制方法，如将位置控制转换为轨迹控制，使得轨迹跟踪曲线更加平滑，提高实际施工效率；
- 3) 进行混凝土喷射实验，实际测试混凝土的附着系数以及给控制部分带来的影响；
- 4) 根据混凝土的喷射实验给出的测试数据完成对于实时喷射量结合实时位置的轨迹规划，完成所有隧道特征结构的一体化喷射；
- 5) 结合传统的施工喷射，可尝试使用深度神经网络直接进行八自由度的正逆向运动学解算；
- 6) 进行实际工业考核，检验喷浆机器人实际喷射性能，进行系统参数优化和方法改进，使得自动喷浆机器人完全适用于隧道施工；
- 7) 由于现有原机的机械限制，使得一些方法无法运用，可考虑根据需求对

机型进行机械结构改造，使软件和硬件的贴合度更高，进一步提高喷射效率。

## 参考文献

- [1] 刘辛军, 于靖军, 王国彪,等. 机器人研究进展与科学挑战[J]. 中国科学基金, 2016(5):425-431.
- [2] 周强. 地下隧道及工程监测用移动式机器人的相关问题研究[D]. 吉林大学,2017.
- [3] Rubinstein A , Erez T . Autonomous robot for tunnel mapping[C]// Science of Electrical Engineering. IEEE, 2017.
- [4] Loupos K , Doulamis A D , Stentoumis C , et al. Autonomous robotic system for tunnel structural inspection and assessment[J]. International Journal of Intelligent Robotics and Applications, 2017.
- [5] Protopapadakis E , Stentoumis C , Doulamis N , et al. AUTONOMOUS ROBOTIC INSPECTION IN TUNNELS[J]. 2016.
- [6] Menendez E , Victores J G , Montero R , et al. Tunnel structural inspection and assessment using an autonomous robotic system[J]. Automation in Construction, 2018, 87:117-126.
- [7] 韦帅. 六自由度涂胶工业机器人控制系统设计与研究[D]. 华南理工大学, 2015.
- [8] 王海果. 基于 EtherCAT 通信协议的多自由度机器人控制仿真系统[D]. 山东大学, 2017.
- [9] Hanh L D , Lin C Y . Combining stereo vision and fuzzy image based visual servoing for autonomous object grasping using a 6-DOF manipulator.[C]// IEEE International Conference on Robotics & Biomimetics. IEEE, 2012.
- [10] Liu T, Guo Y, Yang S, et al. Monocular-Based 6-Degree of Freedom Pose Estimation Technology for Robotic Intelligent Grasping Systems[J]. Sensors, 2017, 17(2):334.
- [11] Luo R C, Kuo C W. Intelligent Seven-DoF Robot With Dynamic Obstacle Avoidance and 3-D Object Recognition for Industrial Cyber-Physical Systems in Manufacturing Automation[J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(5):1102-1113.
- [12] Kadir M A , Chowdhury M B , Rashid J A , et al. An autonomous industrial robot for loading and unloading goods[C]// 2015 International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV). IEEE, 2015.
- [13] Jazar R N . Forward Kinematics[M]// Theory of Applied Robotics. Springer US, 2010.

- [14] 万凯歌. 多自由度机械臂轨迹跟踪控制[D].天津大学, 2017.
- [15] 杨淞. 一种六自由度机械臂的运动控制系统设计[D]. 上海交通大学,2014.
- [16] Barakat A N, Gouda K A, Bozed K A. Kinematics analysis and simulation of a robotic arm using MATLAB[C]// International Conference on Control Engineering & Information Technology. 2017.
- [17] 姜立. 多关节机器人运动学与轨迹规划及仿真研究[D].吉林大学, 2016.
- [18] 王其军, 杜建军. MOTOMAN 机器人逆运动学新分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010(3):451-454.
- [19] Xie J, Yan S, Qiang W. A method for solving the inverse kinematics problem of 6-DOF space manipulator [C]// Systems and Control in Aerospace and Astronautics, 2006. ISSCAA 2006. 1st International Symposium on. IEEE, 2006:4 pp.-382.
- [20] Liu S, Zhu S. An Optimized Real Time Algorithm for the Inverse Kinematics of General 6R Robots [C]// Control and Automation, 2007. ICCA 2007. IEEE International Conference on. IEEE, 2007:2080-2084.
- [21] 刘松国, 朱世强, 李江波,等. 6R 机器人实时逆运动学算法研究 [J]. 控制理论与应用, 2008, 25(6):1037-1041.
- [22] 李向东. 基于自运动的七自由度机械臂运动规划研究[D].吉林大学, 2017.
- [23] Xin P , Rong J , Yang Y , et al. Inverse Kinematics Analysis of a 7-DOF Space Manipulator for Trajectory Design[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2017, 26(3):285-291.
- [24] REN, Zi-wu. A hybrid biogeography-based optimization method for the inverse kinematics problem of an 8-DOF redundant humanoid manipulator[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2015, 16(7):607-616.
- Kucuk S, Bingul Z. Inverse kinematics solutions for industrial robot manipulators with offset wrists [J]. Applied Mathematical Modelling, 2014, 38(s 7–8):1983–1999.
- [25] Whitney D E. Resolved Motion Rate Control of Manipulators and Human Protheses[J]. IEEE Transactions on Man-Machine Systems, 2007, 10(2):47-53.
- [26] Zhang P, Mu X, Ma Z, et al. A PSGO-based method for inverse kinematics analysis of serial dangerous articles disposal manipulator[J]. Information Japan, 2011, 15(12):979-982.
- [27] Xu F , Li S C , Zhang Q Q , et al. A new type support structure introduction and its contrast study with traditional support structure used in tunnel construction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 63:171-182.

- [28] Agnisarman S , Lopes S , Chalil Madathil K , et al. A survey of automation-enabled human-in-the-loop systems for infrastructure visual inspection[J]. *Automation in Construction*, 2019, 97:52-76.
- [29] Feketea S . Geotechnical and operational applications for 3-dimensional laser scanning in drill and blast tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2010, 25.
- [30] Daraei A , Zare S . Prediction of overbreak depth in Ghalaje road tunnel using strength factor[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2018, v.28(04):134-139.
- [31] Oggeri C , Costamagna E , Segarra P , et al. Assessment of contour profile quality in D&B tunnelling[J]. *Tunnelling & Underground Space Technology*, 2018, 75:67-80.
- [32] Zhua N , Jiaa Y , Luo L . TUNNEL POINT CLOUD FILTERING METHOD BASED ON ELLIPTIC CYLINDRICAL MODEL[J]. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016, XLI-B1:735-740.
- [33] Yuhui Z , Shaohua W , Xi M , et al. Railway Tunnel Clearance Inspection Method Based on 3D Point Cloud from Mobile Laser Scanning[J]. *Sensors*, 2017, 17(9):2055-.
- [34] Mostafa A . Automated As-Built Model Generation of Subway Tunnels from Mobile LiDAR Data[J]. *Sensors*, 2016, 16(9):1486-.
- [35] Charbonnier P , Chavant P , Foucher P , et al. Accuracy Assessment of a Canal-Tunnel 3d Model by Comparing Photogrammetry and Laserscanning Recording Techniques[J]. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2013, XL-5/W2(5):171-176.
- [36] Puente, Iván, Akinci B , González-Jorge, Higinio, et al. A semi-automated method for extracting vertical clearance and cross sections in tunnels using mobile LiDAR data[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 59(Complete):48-54.
- [37] Kang Z, Tuo L, Zlatanova S. Continuously Deformation Monitoring of Subway Tunnel Based on Terrestrial Point Clouds[J]. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012, XXXIX-B5(2):199-203.
- [38] Mendes R , Araújo, E, Oliveiira A , et al. Planar projection of mobile laser

- scanning data in tunnels[J]. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2012, XXXIX-B3:109-113.
- [39] Gikas, Vassilis. Three-Dimensional Laser Scanning for Geometry Documentation and Construction Management of Highway Tunnels during Excavation[J]. Sensors, 2012, 12(12):11249-11270.
- [40] Lai P, Samson C. Applications of mesh parameterization and deformation for unwrapping 3D images of rock tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 58:109-119.
- [41] Zhen W, Zhang L, Tian F, et al. A Structure-Aware Global Optimization Method for Reconstructing 3-D Tree Models From Terrestrial Laser Scanning Data[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2014, 52(9):5653-5669.
- [42] 田西勇. 机器人轨迹规划方法研究[D]. 北京邮电大学, 2008.
- [43] Zeng M, Yang X, Wang M, et al. Application of Angle Related Cost Function Optimization for Dynamic Path Planning Algorithm[J]. Algorithms, 2018, 11(8).
- [44] 张润峰, 刁燕, 陈是扞, 等. 手术机器人高阶多项式插值的轨迹规划[J]. 机械设计与制造, 2013(12):161-163.
- [45] Wen W B, Yao K, Lei H S, et al. A High-Order Numerical Manifold Method Based on B-Spline Interpolation and its Application in Structural Dynamics[J]. International Journal of Applied Mechanics, 2017, 08(08):665-674.
- [46] 赵皓, 刘满禄, 张华. 基于三次非均匀 B 样条的 6DOF 机械臂轨迹规划[J]. 机器人技术与应用, 2016(6):43-48.
- [47] Zhang W, Xu D, Meng X, et al. An improved algorithm of three B-spline curve interpolation and simulation[J]. 2017.
- [48] 林威, 江五讲. 工业机器人笛卡尔空间轨迹规划[J]. 机械工程与自动化, 2014(5):141-143.
- [49] Jiang X, Barnett E, Gosselin C. Dynamic Point-to-Point Trajectory Planning Beyond the Static Workspace for Six-DOF Cable-Suspended Parallel Robots[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2018:1-13.
- [50] Chen D, Zhang B, Wang M. Cartesian space trajectory planning on 7-DOF manipulator[C]// IEEE International Conference on Robotics & Biomimetics. 2015.
- [51] Lu H, Zhou X, Rui L. An optimization algorithm for trajectory planning of a 7-DOF redundant manipulator[C]// Guidance, Navigation & Control Conference.

- 2017.
- [52] Pi Y, Wang X. Trajectory tracking control of a 6-DOF hydraulic parallel robot manipulator with uncertain load disturbances[J]. Control Engineering Practice, 2011, 19(2):185-193.
- [53] Jinkun Liu. 机器人控制系统的设计与 MATLAB 仿真[M]. 2008.
- [54] Cho S H. Trajectory tracking control of a pneumatic X-Y table using neural network based PID control[J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing, 2009, 10(5):37-44.
- [55] Yoo B K , Ham W C . Adaptive control of robot manipulator using fuzzy compensator[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2002, 8(2):186-199.
- [56] 余秋蕾. 七自由度冗余机械臂轨迹规划与跟踪技术研究[D]. 华中科技大学, 2016.
- [57] Rezazadegan F , Shojaei K , Sheikholeslam F , et al. A novel approach to 6-DOF adaptive trajectory tracking control of an AUV in the presence of parameter uncertainties[J]. Ocean Engineering, 2015, 107:246-258.
- [58] Lombai, Szederkenyi. Trajectory tracking control of a 6-degree-of-freedom robot arm using nonlinear optimization[C]// IEEE International Workshop on Advanced Motion Control. IEEE, 2008.
- [59] Ai Q, Yang Q, Min L, et al. Implementing Multi-DOF Trajectory Tracking Control System for Robotic Arm Experimental Platform[C]// International Conference on Measuring Technology & Mechatronics Automation. 2018.
- [60] 朱明超. 可重构模块机器人运动学、动力学与控制方法研究 [D]. 吉林大学, 2006.
- [61] Guo Y. Active vibration isolation based on model reference adaptive control[J]. International Journal of Systems Science, 2014, 45(2):97-108.
- [62] 赵翀. 车载柔性机械臂轨迹跟踪和补偿控制方法研究 [D]. 吉林大学, 2015.
- [63] 谢斌, 蔡自兴. 基于 MATLAB Robotics Toolbox 的机器人学仿真实验教学[J]. 计算机教育, 2010(19):140-143.
- [64] Yan W, Sun L. An optimization method for inverse kinematics of a 7-DOF redundant manipulator[C]// Control Conference. 2015.
- [65] Rusu R B . Semantic 3D Object Maps for Everyday Manipulation in Human Living Environments[J]. KI-Kunstliche Intelligenz, 2010, 24(4):345-348.
- [66] Øystein Skotheim, Lind M , Pål Ystgaard, et al. A Flexible 3D Object

- Localization System for Industrial Part Handling[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2012.
- [67] Puente, Iván, Akinci B , et al. A semi-automated method for extracting vertical clearance and cross sections in tunnels using mobile LiDAR data[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 59(Complete):48-54.
- [68] Oggeri C , Costamagna E , Segarra P , et al. Assessment of contour profile quality in D&B tunnelling[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2018, 75:67-80.
- [69] 基于点云切片技术的喷涂机器人自编程技术研究[D].哈尔滨工业大学,2016.
- [70] Clitan I , Muresan V , Abrudean M , et al. Position control of an industrial robot using fractional order controller[C]// International Conference on Robotics & Machine Vision. International Society for Optics and Photonics, 2017.
- [71] 王述彦, 师宇, 冯忠绪. 基于模糊 PID 控制器的控制方法研究[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(1):166-172.

## 攻读硕士期间主要研究成果

### 论文成果

- [1] An Automatic Tunnel Shotcrete Robot. The 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2019), 在审。本人第三作者。
- [2] 八自由度全自动隧道喷浆机器人系统设计, 2019 第十四届中国智能机器人大会, 在审。本人第二作者。
- [3] 一种基于 FSR 压力传感器和电极片的触觉传递控制系统。2018 年中南大学信息科学与工程学院研究生学术年会论文集, 收录。本人第二作者。

### 专利成果

- [1] 一种基于多尺度卷积神经网络的静态手势识别方法, 已公开。本人第二作者
- [2] 一种基于 3D 卷积神经网络的动态手势识别方法, 在审。本人第二作者

### 主要科研创新项目

- [1] 企业合作研究课题: 隧道全自动喷浆机器人, 2017.10-至今, 项目组长。
- [2] AIMADS (智能医疗辅助诊断系统), 2018.5-2018.10, 项目组长。
- [3] 华为车载语音与手势识别控制系统, 2016.03-2016.09, 项目组主要成员。
- [4] 华为触觉互联网, 2016.10-2017.01, 项目组主要成员。
- [5] 无人车底层开放平台, 2017.04-2017.11, 项目组主要成员。
- [6] 锂电池远程升级烧录系统, 2018.10-2018.12, 产品经理。

### 创新创业竞赛

- [1] 2018 第四届中国“互联网+”大学生创新创业大赛全国总决赛银奖。团队负责人。
- [2] 2018 高校计算机大赛人工智能创意赛一等奖 (一等奖排名第一)。团队负责人。

## 致谢

子在川上曰，逝者如斯夫，不舍昼夜。回首这三年在麓山南路 932 号的日子，有太多的感触，想到别离便怅然若失，心头有片羽毛滑过。

与朋友一起登山，我见证了岳麓山四季的美景；与实验室同学度过的每一个严谨却又不失活泼的日子，我学到了许多理论知识；与小伙伴一起健身的傍晚，我挥汗如雨；不时与师兄师弟一起奋战做研究的深夜，我见过了凌晨四点静谧的升华路与观云池；每一次谢老师主持的例会，我们严肃认真的总结；每一次团建活动，我们的欢声笑语等。太多的画面在脑中回放，我这充实又充满意义的研究生阶段的学习生活马上就要划上句点了，在这里，我想真诚的感谢一路陪伴我成长的师长和同学们，感谢中南大学。

首先，我要感谢我的研究生导师——谢斌老师！能师从谢老师，我为自己感到庆幸。三年来，导师渊博的专业知识，严谨的治学态度，精益求精的工作作风，诲人不倦的高尚师德，朴实无华、平易近人的人格魅力对我影响深远。还记得第一次与谢老师沟通是保研的时候，我从山东大学来到中南大学面试，经学长推荐，我怀着忐忑的心情给谢老师发了一条自荐短信，谢老师回复了我并邀请我去他办公室谈谈。一见面就觉得谢老师思想很新潮、很有创新意识而且非常非常注重培养学生自己的兴趣，谢老师很仔细的询问了我的想法与规划并表示了尊重，我下定决心一定要跟着谢老师读研。入学后，谢老师从来没有把自己的想法强加在我身上，取而代之的是经常在学术上给我专业的指导，培养我的创新意识，全方位的锻炼我的能力。还记得谢老师一遍又一遍的帮我修改项目申请书和论文；记得谢老师帮我修改互联网+比赛的演讲稿，告诉我要有自信；记得谢老师帮忙润色高校人工智能创意赛的 PPT；记得谢老师告诉我可以坚持自己的想法去做一名产品经理；记得谢老师组织的很多次团建活动。感谢的话说不完，在我攻读硕士研究生期间，深深受益于谢老师的关心、爱护和谆谆教导。在这里希望谢老师未来的路越走越好，团队影响力越来越大。

感谢蔡自兴老师、王勇老师、余伶俐老师、陈白帆老师、刘丽珏老师、李仪老师、邹逸群老师、雷琪老师、唐璘老师、高琰老师、肖晓明老师等老师在研究生期间给我的指导和帮助，谢谢各位老师，衷心祝愿老师们工作顺利，身体健康！

感谢尤作师兄，带我真正走进了这个互联网行业，手把手教我做项目写代码，谢谢您的培养。感谢已经毕业的喻仲斌师兄在手势识别方向的指导。感谢李沁学姐，有任何学习生活上的问题找沁姐总能给我安排，沁姐等于亲姐。感谢栋栋哥在项目上的帮助，一起通宵，一起在华为测试的日子真的很珍贵。还要感谢已经毕业的别的师兄师姐们的照顾。

感谢我的同门兄弟宇哥，三年来，我们可以说是不是亲兄弟，却胜似亲兄弟了，每一个项目都有我和你，我们一起学习、一起玩耍、一起出差、一起通宵搞事情，真的感谢三年来你的陪伴和给我的帮助，非常感谢，也祝你，宇哥，拥有光明的未来。

感谢同届的其他同学们，舒雷、周聪、黄余、薛涛略、孔德成、夏旭梅等，我们一起参加秋招一起战斗，一起参加智能所的活动一起欢乐，谢谢能遇见你们这群好同学。感谢师妹张文婷、师弟林学斌、秦觅、文杰、徐勇、新宇、程清、彭哲等，我们一起做项目、参加比赛、写申请书，感谢你们的付出和对我的包容。同时也感谢智能所其他学弟学妹如春蓉、王润宇、朱立军、建清、致远等平时的陪伴和帮助。

感谢同届的余俭、刘懿、王欣，感谢你们三年的陪伴，我们一起复习考试，互帮互助；我们一起走遍了长沙好吃的角落，打打闹闹；我们一起唱歌，一起开心也会分担彼此的难过；我们一起过生日，一起吃蛋糕；谢谢你们让我感受到了温暖和友谊的珍贵。我牢牢记住你的脸，我会珍惜你给的思念，这些日子，在我心中，永远都不会忘记。

最后，真心感谢我的父母！感谢你们含辛茹苦供我上学；感谢你们从小对我的培养、教育；感谢你们二十多年来对我的关心；感谢你们对于我未来道路的指导；儿子长大了，你们脸上却多了许多岁月的痕迹。在学校的日子告一段落了，进入社会，我将带着你们的期望，努力闯出一番名堂，实现自己的理想。

2019年5月10日星期五

于中南大学升华楼