

基于点云的补漆机器人系统^①



刘 春, 尹章杰

(湖北工业大学 计算机学院, 武汉 430068)

通讯作者: 刘 春, E-mail: 251207905@qq.com

摘 要: 汽车补漆机器人需要面对各种不同大小的车型, 适配各种造型曲面和颜色, 这种高度自适应要求使得补漆机器人在目标跟踪、路径规划、运动空间等方面的设计难度远超汽车厂的喷漆机器人. 因此需要重新规划喷漆路径, 首先对汽车的点云数据进行分部位切割, 然后以八邻域法计算封闭曲面轮廓, 最后以切片法在曲面上生成光栅轨迹, 形成了每一个补漆面的关键路径. 设计了八轴桁架机器人系统, 用蚁群算法计算生成八轴联动时的路径规划, 再通过倍福的 ADS 协议将路径数据和梯形曲线的加速度下发到 PLC 运动控制程序, 完成各关节轴的联动协同补漆运动. 实测表明, 该系统能针对不同汽车, 自动控制机器人工具轴心以法向量对准任意曲面, 并以联动方式驱动八轴平稳跟踪曲面运动. 该系统可广泛应用于各种曲面的机器人加工.

关键词: 三维建模; 路径规划; 补漆机器人; TwinCAT3; 点云切片

引用格式: 刘春, 尹章杰. 基于点云的补漆机器人系统. 计算机系统应用, 2021, 30(11): 106-111. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/8130.html>

Paint Repairing Robot System Based on Point Cloud

LIU Chun, YIN Zhang-Jie

(School of Computer Science, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: The paint repairing robot for cars needs to face vehicles in different sizes and adapt to a variety of modeling surfaces and colors. This highly adaptive requirement makes the design of the paint repairing robot far more difficult in target tracking, path planning, motion space, and other aspects than the painting robot in the automotive manufactory. Therefore, the painting path re-planning is necessary. First, a large amount of point cloud data is segmented by parts, and then the eight-neighborhood method is used to calculate the contour of the closed surface. Finally, the grating path is generated on the surface by the slicing method, and the critical path of each surface is formed. The eight-axis truss robot system is designed and manufactured, and the path planning of the eight-axis linkage is generated by the ant colony algorithm. Subsequently, the generated path and trapezoidal curve acceleration are sent to the PLC-based motion control program through the ADS protocol of the Beckhoff controller to complete the linkage and collaborative paint repairing movement of each joint axis. The experimental results show that the system can automatically control the axis of the robot tool to align the arbitrary surface with the normal vector for different vehicles and drive the eight axes to track the surface motion smoothly. The system can also be widely applied to the robot machining of various surfaces.

Key words: 3D modeling; path planning; paint repairing robot; TwinCAT3; point cloud slice

1 引言

随着汽车的普及, 为了提高喷漆的效率, 人们对喷

漆机器人的轨迹进行了大量的研究. 传统工业机器人大多采用人工示教法^[1], 由于汽车曲面复杂难以精确控

① 收稿时间: 2021-01-17; 修改时间: 2021-02-07; 采用时间: 2021-02-23; csa 在线出版时间: 2021-10-22

制喷枪轨迹,影响喷漆质量.为了克服这种不足,2005年,Sheng等人^[2]使用优化目标函数的方法优化复杂曲面的喷漆轨迹,为复杂曲面喷枪轨迹规划奠定基础.Chen等人^[3]采用三角网格划分法对工件进行分片,优化了相邻轨迹的喷涂距离,得到了喷枪的轨迹,此方法对曲率变化较小区域的喷涂轨迹有较好的功效.缪苏毅等人^[4]对于曲面的CAD模型的快速轨迹生成提供了思路,提出喷枪轨迹可以通过自由曲面的点云数据得到.由于构建待喷工件的CAD模型的过程繁琐,并且使用CAD软件操作员的熟练程度会影响模型的精度,直接影响喷涂效率和质量.孙义东^[5]提出采用曲面分割的方法并对曲面拟合简化了喷涂轨迹所用到的模型.但是曲面分割得到的面片边界具有不规则性,虽然可以通过曲面拟合得到规则面片,不过仍存在轨迹长度不一致的情况,在交界处的轨迹也具有不规则性.由于工件表面的喷枪轨迹是由一系列等距路径构成,对点云数据进行均匀切片处理,可以获得等距的切片轮廓.因此本文采用点云切片技术,直接对工件的点云数据进行计算,自动生成喷枪的轨迹.

2 汽车的三维点云重建与数据处理

汽车曲面空间跨度大,机械臂的运动空间有限.若使用对所有车型曲面打点进行轨迹规划,就存在坐标定位、任务接续、奇异点等问题.所以本文采用对汽车三维点云建模的方法,对整个曲面进行统一的路径规划,能够完成补漆操作.

2.1 基于运动恢复法 SFM 的汽车三维重建

本文是基于运动恢复法 SFM^[6]对汽车进行三维重建,该算法可以基于各种收集到的无序图片进行三维重建.本文采用大疆精灵4无人机对汽车分为上中下3层进行10度间隔环绕拍照,再用运动恢复法得到汽车的点云数据.效果如图1所示.



图1 汽车建模获得三维点云

2.2 曲面路径生成

补漆时大多数情况下只需要对汽车某个曲面喷漆,

因此需要将整车按曲面分割,得到每个曲面的三维点云数据.以汽车前引擎盖为例,如图2所示.

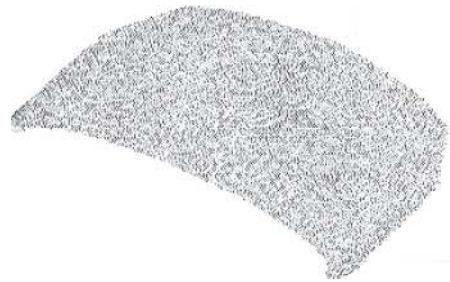


图2 汽车前引擎盖三维点云

通过三维建模获得的点云数据分布不均匀且无序,但是机械臂的喷漆运动轨迹要求是有序的,如“弓”字形或“之”字形,因此需要对点云数据预处理,将无序点云数据转为有序轨迹点,并提取出三维曲面点云的关键轮廓曲线.

1) 首先确定三维点云中曲面的起始点:对于右边缘且闭合的点云曲面,通过计算每两个点之间的欧几里得距离,然后选择距离最大两个点中的一个点设为起始点 P_0 .

2) 八邻域法提取轮廓:点 P 确定为边缘点后,通过点 P 找出点云边缘轮廓起始点,得到点云的有序数据.以 P 点为球心,求解包含八邻域点在内的半径最小的球,由于点云不均匀分布,点云的疏密程度会影响球的半径,且直接影响边缘点的求解.

采用如下定义邻域:在点云中随机选取 N 个点,在每个点 P_i 邻近的8个点中计算距离 P_i 最远的点与 P_i 的距离 d_i .对所有的 d_i 求平均得到点云邻域半径的平均值.再计算 d_i 的标准差,最终得到点云的邻域半径 $R_0 = \bar{R} + \delta$,计算公式如下:

$$\bar{R} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i \quad (1)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{R})^2} \quad (2)$$

半径是一个统计平均值,考虑到点云的疏密程度不同,为了减少这种不均匀的影响,所以对半径额外叠加一个标准差,确保在这个半径下,多数点的邻域内有8个点.确定邻域半径后,以起始点为圆心,以为半径出圆内的所有点.假设三维空间中,点与点之间存在像“弹簧”一样的拉力^[7],那么每个点受到邻域内其他点的拉力的合力会有大小和方向,边缘上的点只有一边有

其他点,所以受拉力的合力较大,而非边缘上的点受到周围其他点的拉力,所以受拉力的合力较小.即可以用某点所受周围点拉力的合力大小判断该点是否为边缘点.非边缘点与边缘点的受力情况如图3所示.

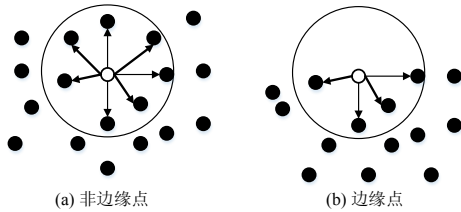


图3 非边缘点和边缘点的受力情况

由于点云分布散乱且不均匀,因此点与点之间的距离的长度会不同,因此只考虑点与点之间的受力而不考虑点与点之间的距离判断一个点是否为边缘点是不准确的.因此我们将每个点对圆心点的拉力进行了归一化之后再累加,再取平均值,能很有效的消除点云之间不均匀带来的影响.公式如下:

$$F = \frac{1}{k} \left| \sum_{i=1}^k \frac{\vec{P_0P_i}}{|P_0P_i|} \right| \quad (3)$$

当通过起始点作为边缘种子点 P_0 提取边缘时,将该种子点邻域中拉力最大的一个点作为下一个种子点,循环此过程直到提取完毕.算法流程如图4所示.

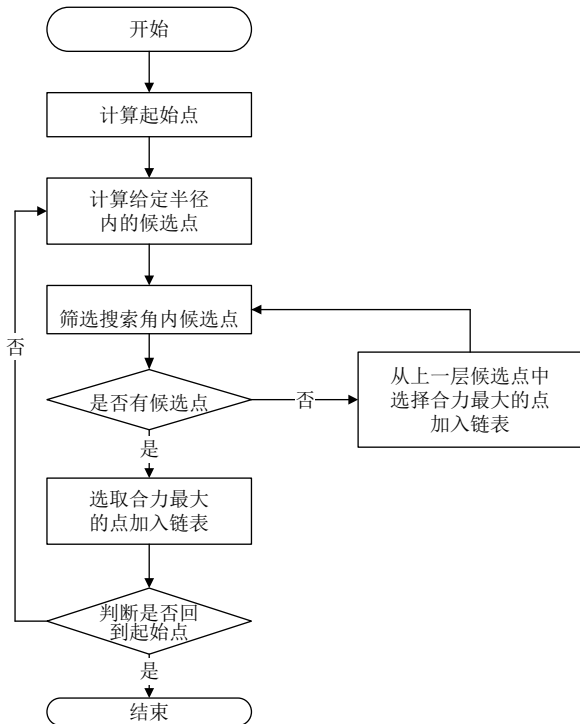


图4 有序化流程图

通过上面的算法,以汽车前引擎盖为例,得到外圈轮廓,然后删除最外圈,继续使用上述算法,可以得到整个的有序数据.如图5是最外圈轮廓.

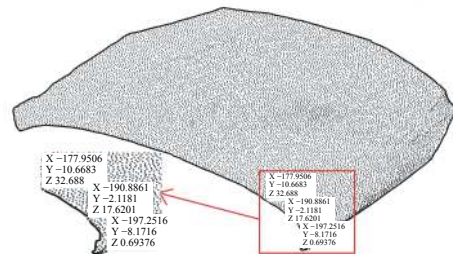


图5 汽车前引擎盖外圈轮廓

3) 生成曲面轨迹:目前最常用的喷漆机器人喷涂轨迹规划方法分为光栅形和回字形两种.回字形路径规划方法在路径规划中易出现奇异点,所以本文采用光栅形的轨迹规划.

通过对物体进行三维建模得到物体的三维点云,然而现实中的物体表面大多是不规则的曲面,所以本文采用了基于切片法的轨迹规划方法^[8].本文将点云曲面用 C 表示,切面用 L 、 L_r 和 L_l 表示,切距用 δ 表示,如图6所示^[9].

以下为轨迹生成的具体步骤:

步骤1. 首先确定切片的方向,切片的方向决定着轨迹的走向.一般的,优先选择投影面积最大曲面进行规划,然后将曲面的最大长宽计算出来,选择从长度较小的地方开始切,这样能够使机器人可能一次性走完一条路径.在进行切片时,先插入切面 L ,然后在平行平面 L 分别向左和向右移动 $\delta/2$ 的位置插入切片 L_l 和 L_r ,此时,将 L_l 切面和 L 切面之间的点放入集合 Q_l 中,将 L 切面和 L_r 切面之间的点放入集合 Q_r 中,此时完成一次切片.每次处理好切片数据后只需要将切面 L 向左或者向右移动 δ 并重复插入切面 L_l 和 L_r 操作,直到点云中的数据被全部切完.如图7所示.

步骤2. 通过步骤1将得到切片好的数据,接下来进行匹配处理,这一步是最重要的一步,如图7所示, Q_l 和 Q_r 分别代表切面 L 左侧和右侧的点的集合.这一步的具体步骤如下:

步骤2.1. 从集合 Q_l 开始,一次遍历每个点 P_{li} ,通过立方体包盒法求出在 Q_r 中距离 P_{li} 最近的点记为 P_{ri_min} .立方体包盒法能够快速判断点是否在盒子内,如果在盒子外就不需要计算距离,这样节约了很多时间.

立方体包盒法的方法如下:以遍历点为盒子中心,盒子的初始边长 $a = \delta/4$,然后遍历 Q_r 中的点是否在盒子内,如果盒子内未找到点,则将 a 按步长 $t = a$ 进行递增查找.

步骤 2.2. 同样的,依次遍历 Q_r 中的点 P_{ri} ,通过立方体包盒法遍历找出 Q_1 中距离 P_{ri} 最近的点记为 P_{li_min} .如果 P_{li} 对应的最近点为 P_{ri_min} ,且将 P_{ri_min} 作为 P_{ri} ,其对应的 P_{li_min} 与 P_{li} 为同一点,则称 P_{li} 与 P_{ri} 构成匹配点对,并将这两点分别存入链表 $ListL$ 和 $ListR$ 中,并且从集合 Q_1 和 Q_r 中去掉.

步骤 2.3. 重复步骤 2.1 和步骤 2.2,直到 Q_1 中的数据遍历完结束.

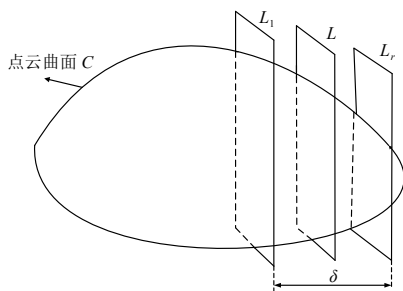


图 6 曲面切片法

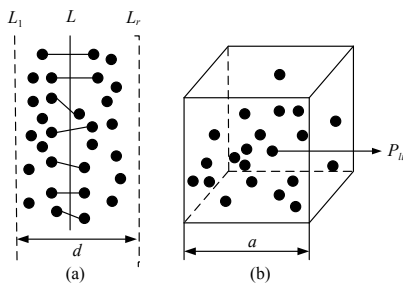


图 7 求交发计算过程

步骤 3. 匹配后的点需要解方程组,求出每组点对与直线相连与切面 L 的交点,交点为轨迹上的点.设交点 P_i 的坐标为 (x_i, y_i, z_i) ,计算方程如下:

$$\frac{X - X_{ri}}{X_{li} - X_{ri}} = \frac{Y - Y_{ri}}{Y_{li} - Y_{ri}} = \frac{Z - Z_{ri}}{Z_{li} - Z_{ri}} \quad (4)$$

若切面沿 X 轴方向,则交点的解为:

$$\begin{cases} X_i = X_{\min} + (0.5 + k)\delta \\ Y_i = t(Y_{li} - Y_{ri}) + Y_{ri} \\ Z_i = t(Z_{li} - Z_{ri}) + Z_{ri} \end{cases} \quad (5)$$

其中, X_{\min} 表示全部数据坐标 X 分量的最小值, k 为对应切面.

通过上述算法,以汽车前引擎盖为例,得到了前引擎盖的光栅轨迹,如图 8 所示.

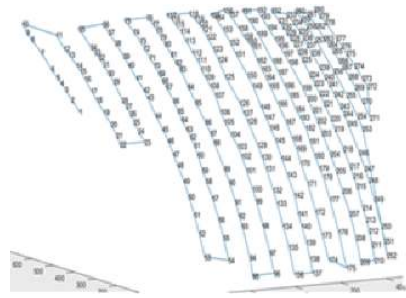


图 8 光栅型轨迹

3 补漆机器人系统设计

在硬件方面,本文采用了龙门式运动平台吊装 6 轴机械臂的方案^[10].平台模型图如图 9 所示.

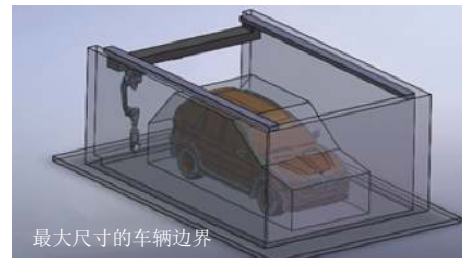


图 9 运动平台模型

机械臂是由 6 个 RJS 系列机器人关节模组组成,机械臂底座悬挂式安装在龙门框架的桁架滑台上,在机械臂末端安装喷涂装置,喷涂装置包括喷枪、喷壶和连接件.控制箱安装在喷漆房外面,由电源、控制元件和气动元件组成.控制元件包括机械臂的控制元件和框架电机的控制元件,将机械臂信号与框架电机信号进行了串联.

软件框架采用 QT 作为集成开发平台,包括了 QT、Matlab、TwinCat3 和 Visual Studio (VS) 的联合开发. QT 用来编写人机交互界面,由于 QT 是 C++ 图形用户界面应用程序的开发框架,在 VS 中调用 QT,只需要在 VS 中安装一个 VS 的 QT 插件,就可以在 VS 中创建和管理 QT 项目. Matlab 用来实现机械臂的仿真实验,采用的是调用 Matlab 引擎的方式实现机器人的仿真. TwinCat3 是机械臂的运动控制软件,基于 VS 平台开发.所以本文以 VS 作为集成开发平台.

4 倍福运动控制系统设计

本系统采用的是串联的 8 轴机器人,只需要通过一根总线就可以与 PC 端连接,需要控制 9 台电机,在

Y轴桁架上两个电机控制^[11]。为了控制NC轴,需要在TwinCat3中建立9个虚拟轴,建立9个虚拟轴与NC轴的联系。在PLC程序中,在全局变量中建立9个轴变量“Axis_REF”对应9个电机,这样就通过PLC程序控制轴的位置状态和运行状态。PLC中有上下使能功能、运动控制功能和手动示教功能,其中最主要的功能是运动控制功能,在运动控制模块中包含了27个数组变量,其中9个数组是用来接收机械臂的位置数据,9个数组是用来接收机械臂的速度数据,还有9个数组是用来接收机械臂的加速度数据。为了实现将本地的轨迹数据下发到PLC程序,本文使用了倍福公司定义的一种专门协议ADS^[12]。ADS用于TwinCat3设备之间的非周期性通信。ADS通信是基于TCP/IP之上的应用协议,所以当它用于控制器之间与TwinCat3设备通信时,保证控制器之间的TCP/IP通信正常,安装TwinCat3的网卡。ADS通信支持有线和无线连接。ADS通信具有实时性,应用程序与TwinCat3在一台IPC或者EPC上,响应时间为3个任务周期^[13]。ADS通信是基于C++开发的^[14],在TwinCat3中支持C++编程,可以很好地将通信模块集成在TwinCat3的工程中。轨迹规划完成后,将数据保存在本地的文本文件中,每行有8个点,每个点对应1个轴。PC端编写C++程序读取文本数据,通过ADS协议将,通过ADS协议将数据写入到PLC中对应的数组。本文采用了TwinCat3 ADS通讯方式中的同步方式,其优点在于能及时返回结果。同步方式通讯分为两种,即为读操作和写操作,针对读和写操作分别分为两种方式,即按变量名进行读写和按照地址进行读写。本文采用的是按照变量名对PLC进行读写操作。在TwinCat3的PLC程序中每个变量都有一个句柄,在对变量进行操作之前,首先要通过相关路径得到变量的句柄,然后进行读写操作,操作完毕后对句柄进行释放。数据通信如图10所示。

本文采用了PTP的运动模式,MC2.lib库中提供了命令堆栈的功能,NC轴在执行运动指令的时候,最多允许再有一个指令排队等候,所以在编写运动控制模块时,每次读取两个点,一个是正在运行的指令,另一个点是等候指令。其速度的运动模式取决于BufferMode的设置,本文采用了MC_Buffered模式,此模式即等前动作执行完成,停稳后再执行后动作。为了使八轴联动时平稳不抖动,就需要计算每个指令的速度和加速度,本文采用Matlab机器人工具箱中的LSPB函数^[15]求得各个轴的速度和加速度。每个轴的运行时间如图11所示。

表达式	类型
fbAxisPower	FB_AxisPower
fbAxisBreak	FB_AxisBreak
fbAxisReset	FB_AxisReset
fbManualMotion	FB_ManualMotion
fbHaltMotion	FB_HaltMotion
fbtest	FB_test
McsPos_X	ARRAY [1..100] OF ...
McsPos_Y	ARRAY [1..100] OF ...
McsPos_Z	ARRAY [1..100] OF ...
McsPos_A	ARRAY [1..100] OF ...
McsPos_B	ARRAY [1..100] OF ...
McsPos_C	ARRAY [1..100] OF ...
McsPos_1	ARRAY [1..100] OF ...
McsPos_d	ARRAY [1..100] OF ...
McsPos_2	ARRAY [1..100] OF ...
McsPos_e	ARRAY [1..100] OF ...
McsPos_3	ARRAY [1..100] OF ...
McsPos_f	ARRAY [1..100] OF ...
McsPos_4	ARRAY [1..100] OF ...
McsPos_g	ARRAY [1..100] OF ...
McsPos_5	ARRAY [1..100] OF ...
McsPos_h	ARRAY [1..100] OF ...
McsPos_6	ARRAY [1..100] OF ...
McsPos_i	ARRAY [1..100] OF ...

图10 数据通信

5 测试与分析

本实验环境主要分为建模环境、PC电脑环境和运动环境。建模环境是在一个平行光源的封闭环境下,使用大疆的手持云台拍照建模,尽量减少人为抖动造成的误差,本实验对汽车前引擎盖为实验对象,实际建模效果基本达到了实验的要求。PC端硬件环境是一台搭载了CPU为i7 9700k和GPU为2080ti的台式主机。软件环境包括了建模环境、仿真环境和系统框架环境。其中建模和切割使用Contest Capture和Cloud Compare软件,仿真环境使用了Matlab的机器人工具包,系统框架环境是部署在Visual Studio 2017,在VS中安装了QT插件Visual Studio Add-in和倍福的TwinCat3。运动环境包括了三轴龙门式运动平台、六轴机械臂和控制箱。本文以汽车前引擎盖实验对象,通过拍照建模的方法对汽车前引擎盖建模,得到前引擎盖的三维点云数据,使用算法对数据预处理,将三维无序数据进行有序化,得到满足实验要求的数据。应用切片法得到光栅型的轨迹,使用Matlab建立的机械臂模型对光栅轨迹仿真,验证轨迹的可行性。最后通过ADS传输协议将轨迹下

发到 PLC 控制中,调用运动程序完成对实验对象的喷涂工作.以汽车前引擎盖为例实际效果如图 12.

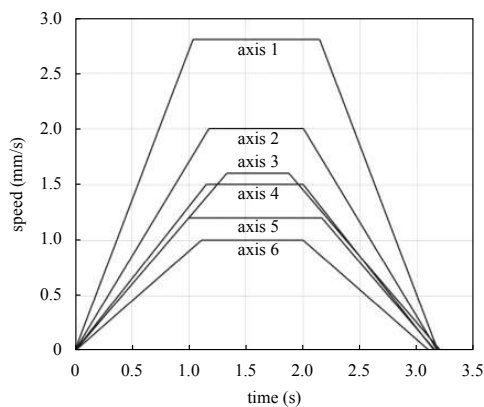


图 11 各轴的运行时间



图 12 实验效果图

6 结语

本文主要介绍了通过 TwinCat3 和 Visual Studio 设计了一个基于点云的喷漆机器人的运动控制系统.首先利用 SFM 算法为汽车建立三维模型;其次为了满足整车喷漆需求,设计了机械臂的运动平台,平台设计采用了龙门式结构;然后对汽车三维点云进行了切割,将点云数据进行有序化处理,利用切片法计算出喷枪的轨迹.在 PLC 中编写机械臂的运动控制程序,包含手动示教模式和点对点运动模式,最后编写了 TwinCat3 的 ADS 通信协议将轨迹数据下发到 PLC 程序中,包含运动轨迹点数据、速度和加速度数据 3 部分.

通过实验验证了曲面轨迹数据和联动方法.由于

汽车曲面各不相同,本方法能够对汽车各个曲面进行喷枪的轨迹规划,使得机械臂能够完成各个不同曲面的喷漆任务.

本文下一步的工作是改善汽车三维建模环境,采用更加精准的建模设备,减少建模时的误差.调整机械臂运动时的速度和加速度,使机械臂运动时更平稳减少抖动,提高运动精度.

参考文献

- 殷际英,何广平.关节型机器人.北京:化学工业出版社,2003.165-167.
- Sheng WH, Chen HP, Xi N, *et al.* Tool path planning for compound surfaces in spray forming processes. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2005, 2(3): 240-249. [doi: [10.1109/TASE.2005.847739](https://doi.org/10.1109/TASE.2005.847739)]
- Chen HP, Sheng WH, Xi N, *et al.* CAD-based automated robot trajectory planning for spray painting of free-form surfaces. *Industrial Robot: An International Journal*, 2002, 29(5): 426-433. [doi: [10.1108/01439910210440237](https://doi.org/10.1108/01439910210440237)]
- 缪苏毅.基于点云切片技术的喷枪轨迹获取方法研究[硕士学位论文].镇江:江苏大学,2009.
- 孙义东.基于曲面分割的喷漆轨迹规划方法研究[硕士学位论文].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- 李德元,曹鹏,孙朝彝,等.基于多视角立体影像匹配三维建模技术的研究. *经纬天地*, 2020, (2): 71-74. [doi: [10.3969/j.issn.1673-7563.2020.02.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-7563.2020.02.021)]
- 韩玉川,侯贺,白云瑞,等.一种基于边缘系数的闭合点云边缘提取算法. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(11): 111003.
- 周峰,卢章平,戴立玲,等.采用点云切片技术的喷漆机器人轨迹生成. *工程图学学报*, 2009, 30(6): 61-65.
- 李明珠.形状混合的理论与应用研究[硕士学位论文].镇江:江苏大学,2007.
- 李萍.龙门式双驱动系统同步运动控制方法研究[博士学位论文].武汉:华中科技大学,2019.
- 张炜岸.基于 TwinCAT 的机器人控制系统设计[硕士学位论文].武汉:武汉纺织大学,2019.
- 靳海平,赵强.基于 Ads 协议的 ZL29 滤棒成型机通讯模块的设计与实现. *通讯世界*, 2019, 26(7): 69-70. [doi: [10.3969/j.issn.1006-4222.2019.07.042](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4222.2019.07.042)]
- 庞觉锋,杜慧起,崔健.基于 TwinCAT 的机电传动控制实验平台设计. *科技与创新*, 2020, (18): 130-131.
- 李宪华,张军,阮学云. LSPB 轨迹规划方法在模块化机器人手臂运动中的应用研究. *安徽省机械工程师学会成立 50 周年论文集*.合肥:安徽省机械工程师学会,2014.402-405.
- 张根华.实时以太网 EtherCAT 网络研究及在多轴运动中的应用[硕士学位论文].南昌:南昌航空大学,2012.