

Research on the application of visual guide robot spray for automotive undercoat

Xueqian Wei

SAIC GM Wuling Automobile Co., Ltd., Liuzhou, Guangxi, 545027, China

Abstract

With the increasing demand for automation and intelligence in the automotive industry, the traditional manual mode of the automotive undercoat spraying process is facing a major challenge to improve the accuracy and efficiency. In this paper, based on the new project of UBS and UBC undercoating process in painting workshop, the application of vision guided robot spraying technology in automotive undercoating process is studied, and the key technical schemes such as visual identification and positioning technology, system design and selection, system calibration, robot spraying control strategy are described in detail. The production verification of the project shows that through the deep integration of visual guidance technology and robot spraying technology, the automation, intelligence and high precision of the complete process spraying process can be achieved, and the research also provides experience and technical reference for the subsequent robot system integration in related fields.

Keywords

automotive undercoat; UBS; UBC; Visual guidance robot; Calibration; Spraying process;

汽车底涂视觉引导机器人喷胶应用研究

韦学谦

上汽通用五菱汽车股份有限公司, 中国·广西柳州 545027

摘要

随着汽车工业对自动化与智能化需求的日益增长,汽车底涂喷胶工艺的传统人工模式面临着提升精度与效率的重大挑战。本文围绕涂装车间UBS和UBC底涂工艺新项目,对汽车底涂工艺采用视觉引导机器人喷胶技术进行了研究,详细阐述了视觉识别与定位技术、系统设计选型、系统标定、机器人喷胶控制策略等关键技术方案。项目经生产验证表明,通过视觉引导技术与机器人喷胶技术的深度融合,实现完整工艺喷胶过程的自动化、智能化与高精度,研究也为后续相关领域的机器人系统集成提供经验借鉴与技术参考。

关键词

汽车底涂; UBS; UBC; 视觉引导机器人; 标定; 喷胶工艺

1 引言

汽车底涂工艺对整车品质至关重要。传统喷胶依赖人工,效率低且质量不稳定。视觉引导机器人通过机器视觉和精确控制,提升喷胶准确性和一致性^[1]。业内关注系统设计和优化,提高复杂表面适应能力和精度,以及喷胶过程智能化,实现智能监控^{[3][4]}。本文研究3D视觉引导机器人喷胶方案,探索关键技术融合与创新,为相关领域提供借鉴。

2 汽车底涂工艺需求分析

2.1 传统工艺存在的问题

汽车底涂的传统喷胶工艺长久以来面临着诸多挑战,

这些挑战主要集中在精度和效率两大方面,严重制约了汽车制造业的高质量发展。

就精度而言,传统喷胶工艺往往受到人为因素、设备老化以及环境条件等多重影响。例如,操作工人的技能水平和经验直接决定了喷胶的精准度,然而人为操作难免存在误差和不稳定性。

在效率方面,传统喷胶工艺同样存在明显不足。首先,人工喷胶的速度受限于操作工人的体能和反应速度,无法实现高速、连续的喷胶作业。其次,喷胶过程中需要频繁地进行设备调试、胶料更换等操作。最后,传统喷胶工艺在应对复杂形状和多变喷胶需求时,显得力不从心,难以满足现代汽车制造业对高效率、高灵活性的生产要求^[1]。

2.2 传统输送系统定位问题

传统人工喷涂工位的车身输送系统定位精度远低于焊接工装。企业在实施机器人自动喷涂时,需平衡高精度要求

【作者简介】韦学谦(1981-),男,壮族,中国广西柳州人,本科,工程师,从事汽车制造业机器人自动化领域相关研究。

与改造成本^[2]。汽车底涂工艺中,车身提升高度通常为2.0m,输送采用 stop/go 方式。进入机器人区域前,PLC 系统需与输送设备连锁控制,检测车型信息。在喷涂区,空中输送吊具需夹紧定位,精度保证在 $\pm 1.5\text{mm}$ 内。本项目采用空中托盘式摩擦输送机构,与地面滚床滑橇铰接。然而,无论是滚床滑橇还是空中托盘输送机构,其定位精度累计误差均超过 $\pm 10\text{mm}$,远低于底涂机器人喷涂工艺要求的 $\pm 1.5\text{mm}$ 。若要求整体满足车身工装定位精度,需大量投入成本,且机械定位结构复杂,维护量大,整体投入不划算。



图 1 空中摩擦输送机构

因此,要消除车身定位偏差,实现精准喷胶,降低成本,研究视觉定位技术并结合控制策略,高效解决传统难题,对

提升制造业水平意义重大。

3 视觉引导机器人技术概述

3.1 视觉识别与定位技术

视觉定位技术利用三维空间信息实现物体精确识别和定位,主要依赖深度信息获取和三维重建算法。深度信息获取方法包括结构光、激光扫描和双目立体视觉。结构光通过光模式变形解算深度,激光扫描测量激光飞行时间获取深度数据,双目立体视觉则根据图像视差计算深度。获取深度信息后,通过图像预处理、特征提取与匹配、三维坐标解算等步骤,将信息转换为物体三维坐标数据,实现三维重建和定位^[4]。

3.2 数据处理

本项目采用 3D 视觉定位技术,利用 2 个高精度双目 3D 相机,每个 3D 相机是由 2 个相机和 1 个投影仪组成,其结构光是由投影仪投射出一系列条纹光,条纹光按照编码进行变换,相机拍摄到条纹后,解算物体三维点云数据,识别车身位置和姿态。先标定机器人和视觉系统,确保图像数据准确捕捉和传输^{[5][6]}。图像预处理后,提取车身关键信息,如孔、边缘等,见图 2。视觉系统识别车身特征,计算出车身位置和姿态数据,传输给机器人控制系统。机器人根据数据调整喷胶轨迹,实现精准喷涂。

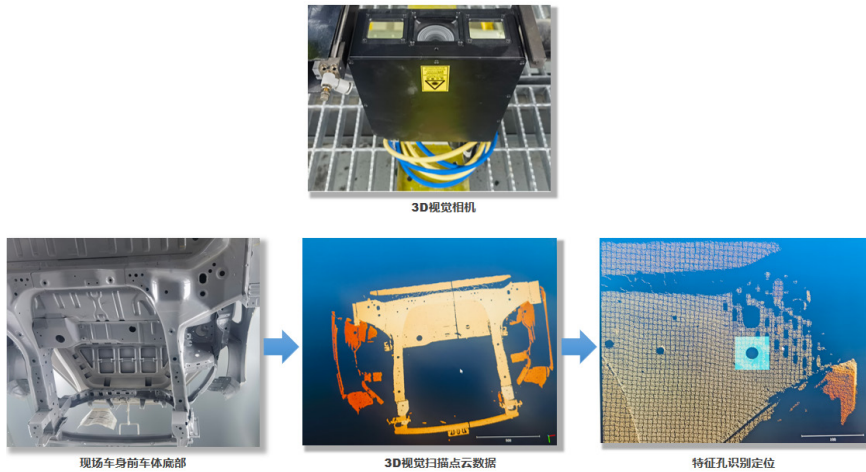


图 2 3D 视觉系统

4 视觉引导机器人喷胶系统设计与实现

4.1 系统硬件组成与选型

本项目系统方案如图 3,硬件组成与选型至关重要,需综合考虑以确保系统性能和可靠性。机器人作为核心执行机构,选型需考虑工作环境复杂性、任务繁重性及精度效率要求。现场底涂工位车身底部高 2 米,故选 6 轴工业机器人,臂展 1850mm,配置上滑移轨道轴,提高自由度和灵活性,适应不同车型。机器人刚性和稳定性良好,确保高速高负载下精确轨迹控制,满足底涂工艺要求(胶条中心与焊缝偏差 $< 1.5\text{mm}$,机器人重复精度 $\pm 0.05\text{mm}$)。采用视觉定位引导技术,两台 3D 视觉相机基于工位坐标系计算车身位置

引导机器人。生产过程每台车身停止位置相对于地面位置是变化的,为此通过 DH 参数和减速机减速比标定,控制机器人绝对精度在 0.1mm 内很有必要。

作为机器人的“眼睛”,视觉系统在选型时,需要光柱分辨率、精度、远近视场范围、采集识别时间等关键性能指标,以确保柔性识别多车型和满足精度和实时性要求。本项目 3D 视觉系统采用双目相机加结构光设计,相机参数见图 5,体积小、抗干扰、正弦结构光成像快,实现 2s 内车身底部快速扫描建模,1s 内基于点云图片数据的车身目标特征识别,快速定姿定位,位置定位精度可达 $\pm 0.1\text{mm}$,姿态定位精度 $\pm 1^\circ$,总体定位时间小于 3.5s,满足产线的节拍要求。

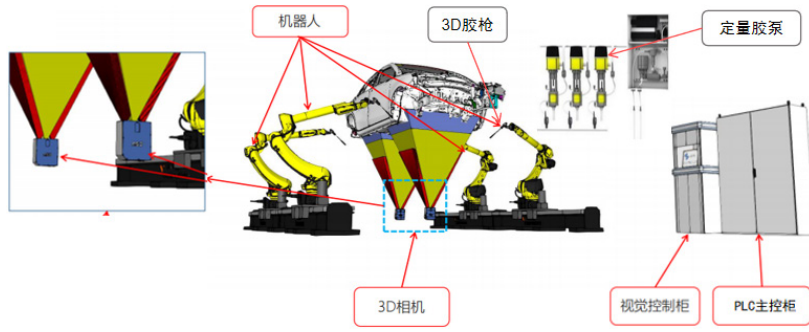


图 3 系统示意图

硬件参数	尺寸 (LxWxH)	178x198x68mm
	产品重量	2.3kg
	接口类型	M12双千兆以太网接口
	基线长度	110mm
	激光等级	Class 3R
技术参数	分辨率	1616x1240
	工作距离范围	1200-2600mm
	近端视场	460x460x200mm@1200mm
	远端视场	750x750x400mm@2000mm
	建模精度	0.04-0.08mm
	3D采集时间	0.5-1.5S
	输出结果	空间三维坐标及姿态信息X,Y,Z,A,B,C
环境参数	识别精度	目标位置坐标±0.1mm,目标姿态±0.5°
	识别速度	1-3S
	工作温度	0-50°C
	存储温度	-20-70°C
电源要求	湿度	20%-90% RH 无凝露
	防护等级	IP65
电源要求	输入	AC200-240V 50/60HZ
	输出	DC 24V 10.5A

图 4 相机技术参数

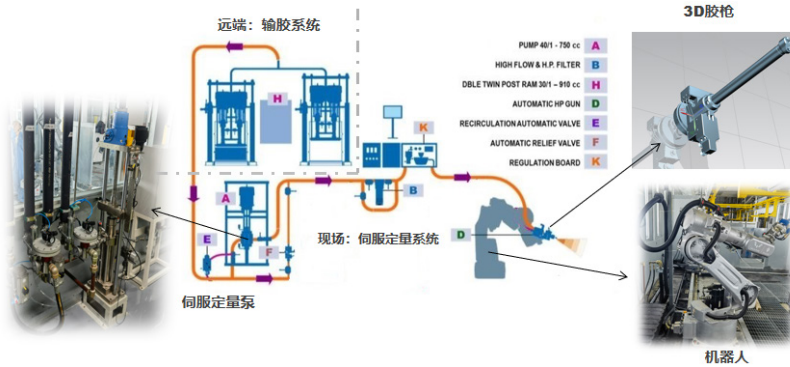


图 5 输胶架构

喷胶设备选型，见图 6，需要考虑胶量控制、喷涂压力、速度等，使用伺服定量泵精确控制流量，压力监控和调压阀控制输胶压力，3D 胶枪提供三向胶嘴，易于受限空间使用，

这些核心设备应用，使得喷涂扇幅不稳定、胶型褶皱、喷胶拉丝等喷胶问题得到很好的控制，提升轨迹柔性和喷涂效率，满足汽车底涂工艺要求。

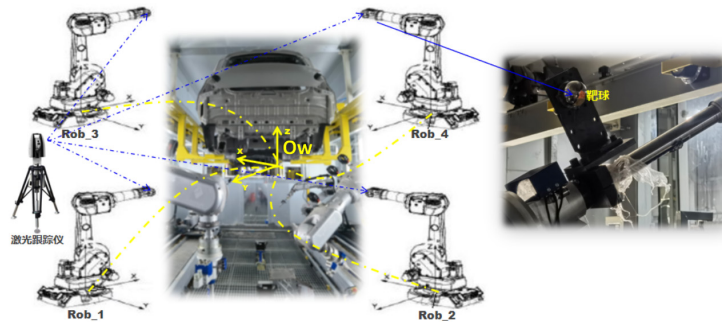


图 6 系统建标

4.2 系统建标

在本项目中，系统坐标系建标是至关重要的一环。它涉及车身、机器人和视觉相机三方坐标系变换的测量标定，对应我们需要全局坐标系建标、多机坐标融合、手眼标定等多个关键标定工作，这几项标定测量工作是确保底涂 4 台机器人在统一的全局坐标系下能够被视觉系统精准引导协同对同一台车身进行喷涂的基础。

全局坐标系的建立为机器人提供了一个统一的参考框架，使得不同位置、不同姿态的机器人能够在这个共同框架下进行视觉引导机器人轨迹偏移规划，从而实现精确的定位、导航与协同作业。本次项目采用三坐标激光跟踪仪，配合其使用的靶球在工位两侧机器人滑移轨道上各采集 2 个点，合计 4 点利用跟踪仪软件拟合出工位平面，经过工位中心点（就是车身底部中心位置正下方）垂直于该平面的法线作为全局坐标系的 Z 轴，车身输送方向定义为 X 轴也就是轨道上 2 个采样点，Y 轴即随之确认，此时坐标系原点还在靠近地面位置，为了减少视觉数学模型误差，我们尽可能把坐标系原点定义在靠近白车身体底部的位置，通过机器人手持靶球，在靠近车身底部中心下方，取参考点位，将坐标系整体平移至参考点，见上图 7，最终锁定实际三维空间中的全局坐标系 O_w 。在实际生产过程中，车身的停止位靠近此全局坐标系原点附近，视觉系统计算出来的校正矢量应该很小，有利于机器人的喷涂轨迹引导校正。

多机坐标融合是多机器人系统协同工作的一个关键技术，它涉及将多台机器人的基座标数据进行统一处理，以得到一个全局一致的坐标系数据，以便视觉系统能够统一引导这些机器人的运动轨迹进行偏移。本项目全局坐标系建立完毕后，需要确认 4 台机器人基座标与全局坐标系之间的转换关系，为此我们继续将靶球固定在底涂机器人的第 6 轴手持的工具上，见图 7，每台机器人基于各自的基坐标系，分别带着靶球示教 18 个 Fine 精确到位的轨迹点，其中包括 10 个平移和 8 个旋转轨迹点，得到每台机器人的示教器上

18 组轨迹点的六维坐标值，在机器人依次逐个走完 18 个点位的时，激光跟踪仪基于全局坐标系也同时对应检测记录靶球 18 个三维坐标值。示教测量采集的 18 组数据后，本次项目引入一个数学工具 Orange Apps RobFit 进行相应三维空间变换矩阵计算，见图 8，得出的每台机器人坐标系变换矩阵。视觉软件中使用这个变换矩阵，就可以将世界坐标中视觉定位车身的坐标分别转换成每台机器人基座标坐标系。

手眼标定是机器人视觉与运动控制领域中的一项关键技术，其目的在于确定机器人手部（即末端执行器）与相机之间的相对位置和姿态关系。这种关系的准确标定对于实现机器人的精确抓取、操作以及与环境的有效交互至关重要。在手眼标定过程中，基本原理涉及多个坐标系的转换与对齐。首先，需要明确机器人基坐标系、机器人手部坐标系以及相机坐标系之间的关系。机器人基坐标系是整个机器人系统的参考坐标系，而机器人手部坐标系则与机器人末端执行器固连，随其运动而变化。相机坐标系则是以相机为中心建立的坐标系，用于描述相机观测到的环境信息。手眼标定的核心在于求解手部坐标系与相机坐标系之间的变换矩阵，这通常包括旋转矩阵和平移向量两部分^{[4][5][6]}。为了求解这一变换矩阵，需要在视觉相机近端和远端视场范围以及工作距离内采集多组机器人手部在不同位置下的标定板图像数据，见下图 10，拍照后的图像数据导入本次项目智能 3D 引导系统软件中，将标定板特征点进行匹配与对齐计算，得到最终标定结果文件。本次项目 4 台机器人已经通过坐标融合统一到全局坐标系中，因此手眼标定的工作只需要在其中 1 台机器人进行，相应标定结果通过视觉系统关联其余各台机器人。

以上标定工作完成后，由控制系统获取车身输送到位信息，触发 3D 相机拍照识别特征进而视觉软件计算出车身在全局坐标系下的准确位置，经过标定阶段得出坐标转换矩阵计算，分别得出 4 台机器人坐标系偏移的喷胶轨迹，最终实现车身精准喷涂。

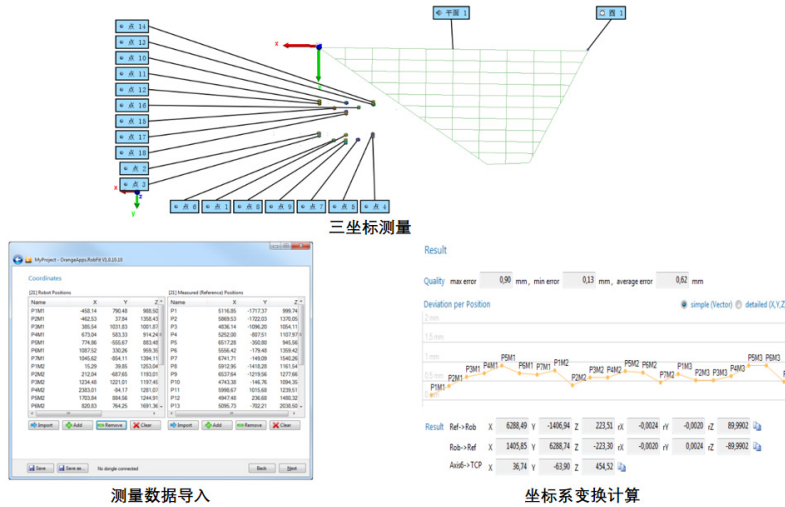


图 7 坐标转换计算

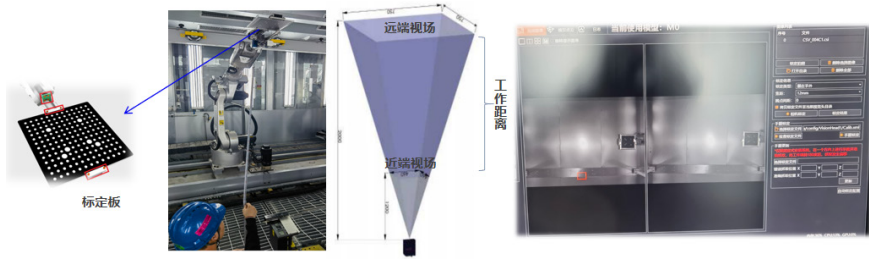


图8 手眼标定



图9 实验验证

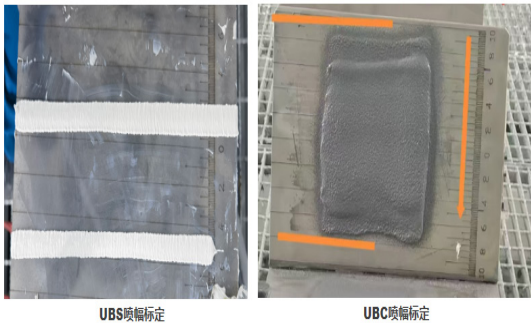


图10 喷胶参数标定

4.3 系统实验验证与实车喷涂

系统设计与实现后，我们进行了实验验证与性能评估。此过程包括车身位置偏移模拟、实验参数设置、数据收集与分析，以及性能评估。车身偏移模拟中，人为调整台车定位，多次测试统计偏差，确保实验条件与生产环境契合，见图11，以准确评估系统性能，测得XYZ平均偏差范围为0.3mm~0.5mm。



图11 实车喷涂

实验参数设置根据喷胶工艺要求，调整了机器人运动速度、喷涂压力、喷幅及视觉系统识别精度等关键参数，这对后续结果的准确性和可靠性至关重要。在控制策略上，关联控制输胶系统与机器人运动速度是关键，通过调整枪距、速度、涂胶流量和压力控制胶型变化，固定值通过标定板标定。通常UBS枪距(20±2)cm，UBC枪距(25±5)cm，枪速(400~600)mm/s，建议统一车型吐出量参数，避

免炸枪、胶型不一、起枪点堆胶等问题，确保喷幅稳定。

在实验数据收集与分析环节，我们记录了机器人喷胶轨迹、喷胶量、均匀性等数据，评估系统表现，找出问题与改进方向。最终性能评估阶段，综合实验数据，评价视觉引导机器人喷胶系统，指标涵盖精度、效率、稳定性。与传统工艺相比，系统显著提升精度与效率，保持稳定。大批量生产验证，喷涂质量见图13，证明其在汽车底涂应用中的可行性和有效性。

5 结论

本次研究，基于项目成功实现了汽车底涂视觉引导机器人喷胶应用，详细分析了系统硬件的组成选型和视觉系统建标过程，确保各子系统的协调高效运作，3D视觉引导技术实现了图像处理、识别定位、高效控制等关键功能，为喷胶过程的自动化与智能化提供了有力支持。截至目前，系统在实际生产中已通过长期实践验证和完善，该系统在实际应用中具有良好的可行性和稳定性，能够满足汽车底涂喷胶工艺需求。未来，在关注行业动态和技术发展趋势的同时，我们将探索更为先进的视觉识别算法和机器人控制策略，进一步提升整体系统性能，以期对相关领域研究实践提供借鉴参考。

参考文献

- [1] 孙小忠. 汽车PVC密封线生产过程中产生的问题分析. 现代涂料与涂装. 2010
- [2] 李振房. 关于UBC喷涂自动化设备的研究. 现代涂料与涂装. 2024
- [3] 周宝仓. 机器视觉技术研究现状及发展趋势. 河南科技. 2021
- [4] 张明文. 工业机器人视觉技术及应用. 人民邮电出版社. 2020
- [5] 郭源. 基于3D相机的拆垛机器人手眼标定方法研究. 组合机床与自动化加工技术. 2024
- [6] 茅靖峰. 工业机器人手眼标定综合实验设计. 实验室研究与探索. 2024