

上海交通大学

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

毕业设计项目报告

SENIOR DESIGN COURSE PROJECT REPORT



项目名称: Opencv PVC 胶条居中度检测

学生姓名: 王宇睿 顾恩霖 江志恒

指导教师: 裴景玉

企业导师: 王子平

企业名称: 上汽大众汽车有限公司

机械与动力工程学院

2024.05

摘要

本项目针对汽车制造中 PVC 胶条涂胶质量检测问题，提出了一种基于机器视觉的自动化检测方法。针对现有人工检测效率低、主观性强等缺陷，本项目旨在开发一套基于 Opencv 的自动化检测系统，实现高精度、高效率的 PVC 胶条居中度检测。

通过对 PVC 胶条检测的关键问题进行分析与分解，确定了反光去除与胶条识别、胶条边缘与车缝识别、胶条偏移量计算三个核心问题。针对各问题提出多种备选方案，并通过加权决策矩阵法对方案进行评估与优选。最终确定采用基于 HSV 色彩空间的高光去除算法，使用传统图像处理技术进行胶条区域识别；车缝识别采用 Canny 等传统边缘检测方法；对于居中度计算，通过对车缝曲线进行参数化拟合，计算胶条中线的法向距离作为偏移量。

算法实现后，针对胶条区域提取、车缝识别与居中度计算分别进行了测试。结果表明，所提出的算法具有较好的鲁棒性，可以适应不同车型与不同位置，实现毫米级的检测精度，基本满足企业需求。本方案在保障汽车涂胶质量的同时，提高了检测效率，降低了人工成本。

关键词：机器视觉；PVC 涂胶；边缘检测；偏移量计算；胶条识别

目录

1 简介.....	1
1.1 问题描述.....	1
1.2 项目目标.....	2
2 团队和项目管理.....	2
2.1 项目预算和采购信息.....	2
2.2 项目管理.....	3
2.3 风险管理.....	4
2.4 与项目资助企业的沟通和协调.....	4
3 项目需求评估.....	5
3.1 项目需求调研.....	5
3.2 项目需求描述.....	5
4 文献综述.....	6
4.1 专利及文献介绍.....	6
4.1.1 高光去除与胶条识别算法.....	6
4.1.2 车缝识别与胶条边缘识别.....	9
4.1.3 居中度评估.....	12
4.2 现有产品介绍.....	14
5 工程规格制定.....	14
6 概念设计.....	15
6.1 问题描述.....	15
6.2 概念设计生成.....	16
6.3 概念设计选择.....	17
6.3.1 胶条区域识别.....	17
6.3.2 车缝识别.....	19
6.3.3 居中度计算.....	20
7 详细设计.....	21
7.1 工程分析.....	21
7.2 工艺规划.....	21

7.2.1 胶条区域识别	21
7.2.2 车缝识别	22
7.2.3 居中度计算.....	23
7.3 材料选择.....	23
7.4 组件选择.....	23
7.4.1 胶条区域识别	23
7.4.2 车缝识别	25
7.4.3 居中度计算.....	27
7.5 测试评估.....	29
7.6 经济性分析.....	31
8 设计变更记录（中期答辩后的变更）	31
9 结论和建议.....	32

1 简介

简介中包含毕业设计项目的背景信息，以及企业的简要说明。

汽车工业作为全球制造业的支柱产业，对经济发展和技术进步产生了深远影响。汽车产业不仅占据广阔的消费市场，还提供了大量就业机会，同时推动了钢铁、化工、电子等相关产业的发展。作为重要的交通运输工具，汽车的普及极大改变了人们的生活方式。

在汽车生产制造过程中，质量控制是确保整车安全性能、可靠性和耐用性的关键环节。面对日趋激烈的市场竞争，汽车企业不断引入先进质量控制技术，实现生产制造全过程的精细化管理。其中，车身 PVC 胶条喷涂是重要的生产环节，需在车身缝隙处喷涂 PVC 防水密封胶以防渗漏锈蚀。随着机器人技术的应用，PVC 胶条喷涂实现了自动化，但难免出现胶条位置偏离焊缝中心线等质量缺陷，影响整车防水防锈性能。传统的 PVC 胶条质量检测方法为人工抽检，这一方式存在效率低、覆盖面窄、主观性强等缺陷。机器视觉技术作为自动化检测的常用方法，能够高效精确地监控喷涂质量。在 PVC 胶条喷涂前后，可通过图像采集和处理算法，对车身焊缝和喷涂胶条位置进行分析，评估胶条居中度，实现自动化检测。本研究将针对 PVC 胶条居中度检测的实际需求，探讨基于机器视觉的相关检测算法和系统实现方案。

本项目赞助企业为上汽大众汽车有限公司。上汽大众汽车有限公司是一家中德合资企业，由上汽集团和大众汽车集团合资经营，中德双方投资比例各为 50%。公司于 1984 年 10 月签约奠基，是国内历史最悠久的汽车合资企业之一。公司总部位于上海安亭，并先后在南京、仪征、乌鲁木齐、宁波、长沙等地建立生产基地。目前公司已形成 6 大生产基地、2 个动力总成厂、1 个电池工厂、1 个技术中心的生产布局，累计产销量超 2700 万辆，员工人数近 2.8 万人。

1.1 问题描述

描述毕业设计项目所需解决的主要问题。

对于 PVC 涂胶工序中可能出现的胶条偏移缺陷，本项目旨在提出一种基于机器视觉的 PVC 胶条居中度自动检测方法，取代传统人工抽检形式，提升 PVC 胶条质量检测环节的效率与准确性。

汽车的生产制造过程涉及多道复杂工序，其中车身 PVC 胶条的喷涂作业是一个重要的生产环节。随着汽车生产制造的自动化水平日益提高，PVC 胶条喷涂工序逐步完成了从人工操作到机器人自动化喷涂的转变，但仍难以完全避免喷涂质量缺陷的发生。其中最常见的一种缺陷是胶条位置偏离焊缝中心线的不居中现象。机器人末端位置偏移、车身振动位移、PVC 胶

料性能不稳定、喷嘴堵塞等多种因素都可能导致喷涂胶条无法精准对准焊缝中心线。PVC 胶条喷涂质量的优劣直接决定了整车的防水防锈性能，进而影响车辆的使用体验和使用寿命，相关的质量缺陷也会给企业带来较高的返修成本。因此，PVC 胶条喷涂质量的检测作为车辆质量控制的重要组成部分，具有十分重要的意义。

传统的胶条喷涂质量检测主要依赖人工抽检的方式，这种方法不仅效率较低、覆盖范围较窄，而且由于存在人为主观判断的因素，检测结果的客观性和稳定性较差。随着自动化和智能化技术的不断发展，胶条喷涂质量的自动化检测成为了可能。自动化的在线检测系统能够实现高效、精确和实时的质量监控，有效提高生产效率、减少人为判断的失误，同时还能够减轻人工的劳动强度，改善作业环境，提升生产作业的安全性和舒适度。机器视觉技术作为自动化检测的常用方法，能够高效精确地监控喷涂质量。在 PVC 胶条喷涂前后，可通过图像采集和处理算法，对车身焊缝和喷涂胶条位置进行分析，评估胶条居中度，实现自动化检测。本研究将针对 PVC 胶条居中度检测的实际需求，提出一种基于机器视觉的相关检测算法和系统实现方案。

1.2 项目目标

对期望完成的内容，以及打算采用何种技术手段完成毕业设计项目做出说明。本节还应包含对毕业设计工作的范围定义。

本项目旨在提供一套基于机器视觉的 PVC 胶条居中度自动检测系统，用于检测汽车涂胶过程中胶条喷涂的居中度。项目将基于 Opencv 进行算法开发，解决胶条区域识别、车缝线识别与居中度评估问题，并提供用户友好的操作界面。

该项目的工作范围主要集中在算法研发方面，硬件设备与相关数据信息由企业提供。最终将交付一套基于机器视觉的自动化检测解决方案，以替代目前的人工抽检方式，提高汽车涂胶质量检测的效率和准确性。

2 团队和项目管理

2.1 项目预算和采购信息

列出项目资金支出，应包含主要支出类别，例差旅费、加工成本、所需购买的材料成本等。

2.2 项目管理

需要提供一个包含里程碑、任务和责任分工的甘特图，并用简要介绍甘特图。

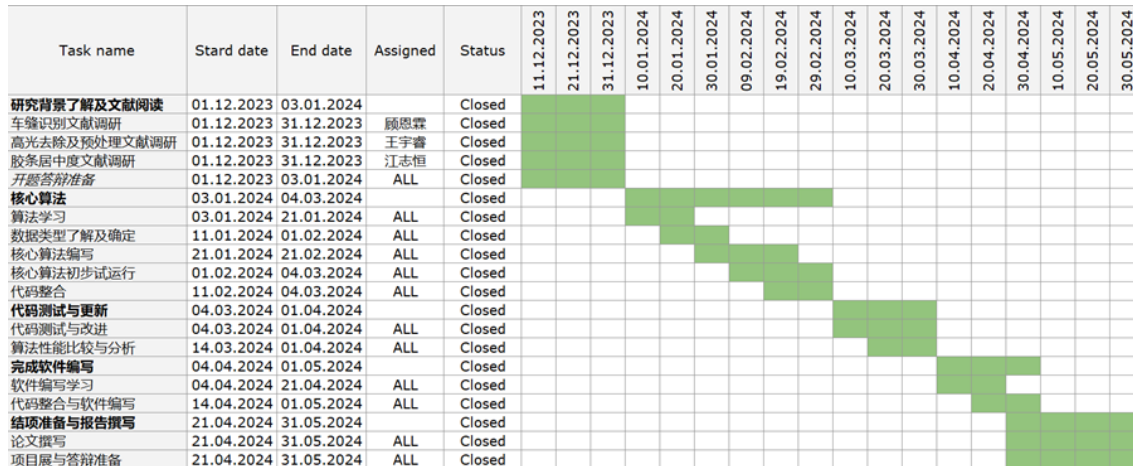


图1. 项目进度甘特图

项目主要分为如下几个阶段：

（1）项目启动和准备阶段（2023 年 12 月）

全面了解研究背景和相关文献，为整个项目奠定理论基础。这个阶段涉及大量的文献检索和分析工作。通过车缝识别、高光去除及胶条居中度文献调研，确保每个成员对项目的关键技术点有深入的理解，使得项目的方向和方法得到充分论证和批准。

（2）核心研发阶段（2024 年 1 月至 4 月）

核心算法学习与编写：在这一阶段，主要工作为核心算法开发。这一工作包括算法的学习、编码和初步的试验运行。

数据类型了解及确定：由于三位成员负责研究的问题是承接关系，确定传递的数据类型这对于算法的有效性至关重要。

代码整合、测试与更新：随着各自算法的形成，将进行代码的整合工作，并对算法进行综合测试。

（3）项目优化和集成阶段（2024 年 4 月）

算法性能比较与分析：由于采取了多种技术路线，此时将比较和分析不同算法的性能，以确定最有效的方法。

完成软件编写和代码整合：这一阶段将完成软件编写工作，并进一步整合和优化代码。

（4）项目收尾和展示准备阶段（2024 年 4 月至 5 月）

项目接近尾声，开始准备结项所需材料，撰写最终报告，为项目的展示和答辩做准备。

2.3 风险管理

风险因素包括技术风险、加工风险、进度风险或财务风险等。用如下表格对项目潜在风险进行分类及提出应对措施。

表1. 项目风险管理

风险	水平	应对措施	补救策略
产品不能按预期运行	中	1.增强技术团队实力，进行充分的前期测试。 2.提前进行技术验证和小规模试点测试。	1.建立应急技术支持小组，快速响应技术问题。 2.引入第三方技术支持，必要时寻求外部专家帮助。
顾客不满意	高	1.定期与客户沟通，了解需求并进行调整。 2.设立客户反馈机制，及时处理客户意见。	1.提供售后服务，快速响应客户问题。 2.针对客户反馈进行产品改进。
设备故障	中	1.定期维护和校准设备，确保设备稳定运行。 2.购置备用设备，以备不时之需。	1.设立专门的维修团队，快速修复设备故障。 2.与设备供应商建立紧密联系，获取及时支持。
计划延迟	中	1.制定详细的项目计划和进度表，明确各阶段的时间节点和责任人。 2.建立进度监控机制，定期审查项目进展情况。	1.在计划中预留一定的时间缓冲，以应对不可预见的延迟。 2.一旦发现进度滞后，及时调整资源配置，加快关键任务的进度。
客户需求发生变化	高	1.定期与客户保持沟通，及时了解需求变化。 2.灵活调整项目计划，快速响应客户需求变化。	1.建立变更管理流程，确保需求变化得到及时处理。 2.增加项目的弹性资源配置，应对需求变化。
预算超支	高	1.制定详细的预算计划，严格控制项目开支。 2.寻求多种融资渠道，确保资金充足。	1.建立财务预警机制，及时发现和应对财务问题。 2.如遇资金不足，提前与投资方或银行沟通，寻求资金支持。
现金流紧张	高	1.进行详细的现金流预测，保持适当的资金储备。 2.寻求短期融资渠道，确保资金流动性。	1.建立紧急融资预案，应对突发现金流问题。 2.减少不必要的开支，保持财务稳定。

2.4 与项目资助企业的沟通和协调

详细说明与项目资助企业之间的互动，提供时间表和沟通形式列表（访问或电话会议等）。

表2. 企业沟通记录表

沟通时间	沟通形式	沟通内容
2023 年 11 月 15 日	线上会议	初次和企业指导老师沟通，了解项目背景和企业需求。
2023 年 11 月 23 日	线上会议	1. 同学们进行了初步文献阅读汇报，关注点在两个问题：反光的处理方法 + 两条边缘线距离的计算方法； 2. 进行了项目内容的讨论。由于每个学生需要一个研究内容，结合上次会议的需求分析，初步确定为：金属表面反光的处理 + 三维车缝的自动识别 + 三维胶条与车缝偏移量的计算。
2023 年 12 月 18 日	线上	沟通确定企业提供数据的内容和数量。
2023 年 12 月 26 日	线上	咨询企业初步方案的算法技术，请求企业提供原始数据。
2024 年 3 月 7 日	线上	请求企业提供更多车型的图片数据，询问检测精度要求。
2024 年 3 月 14 日	线上	与企业指导老师交流相关技术方法，确认方案可行性
2024 年 4 月 5 日	线上	与企业指导老师讨论原始图像数据的相机参数和软件界面搭建问题。
2024 年 4 月 9 日	线上	与企业指导老师讨论毕业设计项目提供给企业的数据格式问题。

3 项目需求评估

3.1 项目需求调研

介绍企业调研过程，以及企业需求（客户需求）的收集方式。

在项目初期，通过线上会议讨论与和企业指导老师的单独沟通，确定了企业需求。

3.2 项目需求描述

详细描述企业提出该项目的需求，创建客户需求清单。

针对企业需求，形成客户需求表如下。需求重要程度按照 1-5 打分，5 为非常重要，1 为不重要。

表3. 客户需求表

需求编号	需求内容	重要程度
R1	算法全自动识别车缝与胶条区域	5
R2	算法区域识别准确度高	5
R3	算法耗时短	1
R4	算法对环境光源要求低	3
R5	算法居中度计算精确度高	4
R6	算法适用于多种车型	4
R7	算法能够仅基于单目相机	1
R8	算法能够指出胶条不合格位置	5
R9	算法能够给出最大偏差值	5
R10	算法基于现有算法的 OpenCV 环境	4
R11	算法能够判别胶条开裂	5
R12	算法适用于各种材料反光照片	2
R13	软件能够长期稳健运行	4
R14	算法能够考察局部区域的偏移情况	4

4 文献综述

通过专利检索、文献阅读确定项目拟采用的关键技术。了解已上市产品，并进行基准测试，基准测试的结果应总结在表格中。

4.1 专利及文献介绍

五种主要类型信息来源包括：网站、期刊论文、书籍、会议文章，以及专利。

4.1.1 高光去除与胶条识别算法

在车间现场拍摄的车缝和胶条照片中，车身金属反光较为严重。若直接采用机器视觉识别车缝和胶条边缘，会将部分反光区域误判为胶条，对后续分析计算带来干扰。因此，要首先解决图像中金属反光及胶条识别问题，得到准确识别出车缝和胶条对象的图片。

金属高光去除及胶条识别算法的文献综述调研结果汇总如下：

表4. 高光去除与胶条识别算法文献调研结果

问题	方法	优势	局限性	参考文献
高光去除	基于二色模型	简单直观，计算量较轻，适用于实时图像处理和嵌入式系统	性能高度依赖于选择的通道类型，在包含多种光照条件和复杂材质的场景中性能欠佳	[1][2][3]
	基于偏振设备	在特定光照条件下，偏振设备可以更好地适	效果高度依赖于光线的入射方向和偏振方向，难以去除多个方向的反光；	[4]

		应去除反光的需求，例如户外拍摄、水面反光等场景	需要额外安装设备，成本昂贵	
	基于像素点强度值	简单直观，计算效率高，不需要光源的额外信息	对于图像对比度敏感，难以处理复杂纹理表面，在光照强度和方向变化大时可能产生误判	[5][6][7]
	基于 HSV 颜色空间	简单有效，适用于金属物体表面的高光去除	尚不清楚是否适用于复杂曲面及复杂纹理表面	[8]
	基于 SIFT-flow	可分离得到高光区域与背景区域的图像	需要不同视角下多张照片，对拍摄条件要求较高	[9]
胶条识别	基于颜色、形状、纹理的传统数字图像处理技术	操作简单，处理速度快，原理较为直观	基于颜色的算法对光照较为敏感，基于形状的算法会收到遮挡和聚类的影响，基于纹理的算法会受到背景复杂度的影响	[10][11][12][13]
	基于机器学习的图像分割与分类器	得出不能通过原理分析总结出的规律，适应性强，能够处理复杂目标识别与分割	依赖标注数据，计算资源消耗较大，对数据质量敏感	[14][15][16]

早期去除高光主要基于二色模型。Shafer 提出的二色模型将图像的光点分解为镜面反射分量和漫反射分量的线性叠加^[1]，在不同区域，两个分量的比重不同，高光区域是镜面反射分量占比较高的区域。^[2]将高光图像建模为物体本身图像与高光图像的线性组合，在哑光区域和高光区域的过渡区提取信息，用以删除高光分量。与基于阈值强度的二元方法相比，这种高光的观点为定量的形状分析开辟道路。这种算法需要已知的相机模型，并且由于形状边界和纹理信息的噪声，在实际应用中可能无法准确提取两个分量的分布。Mallick^[3]提出的方法涉及使用角度量 θ 和 φ 对 RGB 颜色空间中的向量进行旋转和重新参数化以获得部分分离。作者通过周边相同色调而无反光的像素点信息，估计 φ 角度图像中各点的漫反射占比。他们使用非线性偏微分方程来拟合 2D 信号，产生 φ 图像中的漫反射占比并确定每个图像点的 RGB 漫反射分量。但是，该方法的局限性在于需要光源的先验信息。Nayar 等人^[4]提出了一种从图像中分离镜面反射和漫反射成分的技术。该算法利用反射光的偏振率来获得镜面分量颜色的局部和独立的估计值。然而，二色模型一般不适用于金属，因为金属的反射模型不同于电介质，它们很少产生与照明不同的光谱分布的漫反射。此外，该方法需要使用额外的偏振滤光器，成本高昂。使用偏振镜去除高光仅对特定反射方向的反光有效，当相机或光源位置变化时，需要重新调节偏振镜；当环境光源较为复杂时，偏振镜的效果也将欠佳。

另一类高光去除技术基于像素点的强度值。Shen 等人^[5]提出的方法基于漫反射像素最大值和范围值（最大值减去最小值）的强度比与表面几何形状无关这一现象，因此，图像像素的镜面反射分数可通过强度比计算得出。与现有技术不同的是，所提出的方法是以像素为单位进行工作的，没有镜面像素识别和任何局部交互。这种方法的优势在于兼具实时性和准确性，但是

对于非彩色的图像效果不佳。Bai 等人^[6]提出的方法首先获取 4 幅同一角度不同光源设置下的照片，然后得到一幅高光初步削减的图片。接着用 Total Variation Inpainting 算法去除最小化的光点。该方法需要获取同一物体的 4 幅照片，且对光源布置有较高要求。Ortiz 等人^[7]介绍了一种利用单张图片实现高光区域自动检测和去除的方法。该方法使用二维结构图，将彩色图像的消色差和饱和度信号联系起来，并识别内部亮度。为了消除检测到的亮点，该方法通过数学形态学的连接矢量滤波器，使用了一种图像修复方法，仅在高亮区域使用，大大减少了运算成本。但是这一方法对于复杂纹理表面效果欠佳。

一种较新的方法讨论了在 HSV 颜色空间中消除高光的可能。Yu 等人^[8]提出的算法主要应用多项式校准和图像修复手段，它建立在一个基本前提上：时空中具有相似强度的相邻像素应该具有相似的颜色。该方法系统主要由四个部分组成。首先，根据改进的去高光模型识别高光候选区域，将这些候选区域在 HSV 颜色空间中表示出来。然后，利用亮度多项式校准公式重新计算颜色通道 V。接着，基于一种新的绘制方法恢复 H 和 S 颜色通道中的高光区域。最后，通过将积分结果从 HSV 转换回 RGB 颜色空间，得到恢复后的图像。这种方法简单有效，适用于金属物体的高光去除。

利用多幅图像视角的细微变化消除高光是一种新颖的思路，Li 等人^[9]利用了在一组以略微不同的视角拍摄的小图像中，反射相对于背景的细微变化来消除高光。这个想法的关键是使用 SIFT-flow 来对齐图像，这样就可以跨输入集进行像素级的比较。假设在整个图像集中有变化的梯度属于反射场景，而假设恒定的梯度属于所需的背景场景。通过正确地标记属于反射或背景的梯度，可以将背景场景与反射干涉中分离出来。

识别胶条区域属于机器视觉中的图像分割问题，常见的方法包括：

- 1) 传统数字图像处理技术,如基于颜色(RGB,HSV,Lab,HSI)、纹理、形状等特征的提取识别;
- 2) 基于机器学习的图像分割技术与分类器。

使用传统数字图像处理技术的算法中，常见手段可分为基于颜色的分割，基于纹理的分割，和基于形状的分割。基于颜色的分割依靠目标与背景图像之间的色差来分割水果。其优点是操作简单、处理速度快，但对光照变化比较敏感。李长勇等^[10]提出了一种复合动态阈值分割法，将 RGB 图像转换为 OHTA 颜色空间中的灰度图像，在 I₁ 和 I₂ 通道上采用随光强变化的动态阈值对图像分割，再利用 BLOB 滤波算法滤除图像噪声。

彭红星等^[11]提出了一种双次 Otsu 分割算法对多类色彩目标进行识别。在 YCbCr 颜色模型下处理荔枝图像，获取原始图像 Cr 分量下的直方图。使用两次 Otsu 算法进行粗细分割，可获

得三个目标的分割图像。对比 K-means、FCM、Otsu 和 K-means 结合算法、Otsu 和 FCM 结合算法，双次 Otsu 算法的质量、运行时间、稳定性均较优。

基于形状的分割利用圆度和长宽比等几何特征来分割目标。其优点是对光照变化不敏感，但会受到遮挡和聚类的影响。Hannan 等人^[12]采用基于形状的分析技术来检测和定位复杂环境中的圆形水果，重点介绍了在不同光照条件和遮挡情况下检测聚类水果的形状分析方法。

基于纹理的分割使用光滑度和粗糙度等纹理特征来分割目标。优点是对光照变化的鲁棒性，但会受到背景复杂度的影响。Kurtulmus 等人^[13]利用圆形 Gabor 滤波器进行纹理分析，以提高检测精度。

机器学习能从一些样本数据中得出不能通过原理分析总结出的规律,因此也常用于目标检测识别。K 均值聚类算法根据固定值自动将输入数据划分为聚类，无需预定义标签。其优点是处理速度快，聚类性能好，但对异常值和 K 值的选择比较敏感。Wang 等人^[14]使用 K-means 聚类算法进行荔枝识别。该算法涉及预处理、K-means 聚类、特征提取和分类步骤。该算法能够较好地抵抗光照变化的影响,对有遮挡和不同光照条件下的识别都能保持较高的精度。KNN 聚类算法精度较高、对异常值不敏感，但是需要设置合适的 K 值，其大小对识别精度影响较大。基于颜色、基于形状和基于大小的三种特征分析方法，以提高识别的精度。Seng 等人^[15]利用 KNN 聚类算法，根据得到的特征值对水果图像进行分类和识别，识别准确率达到 90%。支持向量机（SVM）算法对二元分类任务很有效，可以处理高维特征空间。不过，它对缺失数据比较敏感，需要仔细选择核函数。Lyu 等人^[16]采用形态学运算成功的多类支持向量机（SVM）来同时分割水果和树枝。柑橘类水果的识别率为 92.4%，可以识别直径大于 5 像素的树枝。结果表明，该算法可用于自动收割机器人的果实和树枝检测。

4.1.2 车缝识别与胶条边缘识别

随着汽车制造业的不断快速发展，确保涂胶工艺的准确性和效率对于保持生产线的顺利运行至关重要。与此同时，由于人工检测存在一定的限制，研究人员一直在致力于开发车缝涂胶的自动检测技术。

在过去的研究中，季甜甜等^[17]采用改进的 Canny 算法进行边缘检测，并结合支持向量机（SVM）模型进行缺陷分类和识别，以实现高效的边缘检测和准确的缺陷分类。然而，该方法对光照条件和图像质量要求较高，可能需要特定的硬件和算法调整，以适应不同的生产环境。陈滋化等^[18]采用类似的技术路线，将图像采集、数据传输和图像处理集成为自动监测系统，但也具有一些相似的优点和局限性。于一深等^[19]采用 KNN 分类方法开发了一种涂胶质量检测算法，提供了高准确率的检测结果（达到 97.85%），并显著提高了检测效率（每个零件平均检测时间为 98ms），尽管如此，该方法仍然对复杂的光照条件有一定限制。

任双超等^[20]利用 UBC 大数据提高了检测的准确性和效率，实现了高度自动化和智能化，但需要大量数据用于训练和优化系统，这可能在现有车厂快速迭代模型的情况下面临数据质量和获取的挑战。何新宇等^[21]使用 BP 神经网络进行图像处理和特征提取，达到了高成功检测率（99.5%），但需要定期更新和维护神经网络模型以适应不同的生产环境。乔宇等^[22]建立了基于 WT-OSELM 算法的标定结果数据库模型，实现了实时检测，然而，该算法需要经常调整，且对硬件和环境要求较高。王爽等^[23]通过使用特定 LED 光源和光学镜头进行图像采集，实现了超过 99% 的准确率，但这需要复杂的系统配置和针对不同应用环境的优化。

马天慧等^[24]使用深度学习算法（如 VGGNet）进行图像检测，具有简单的硬件配置、低成本和高精度等特点，但深度学习模型的训练需要大量的数据集和时间。李肖静等^[25]则采用了改进的 Faster-RCNN 算法进行缺陷检测，提高了汽车涂胶缺陷检测的准确率（达到 97.79%）和速度（每张图像耗时 0.06 秒），适用于实时检测，然而，同样需要大量的数据集用于模型训练。焦健等^[26]通过使用线阵相机对涂胶进行图像采集，并在 Halcon 软件中实现涂胶质量的相关检测，以满足机器人涂胶操作的实时检测需求，具有更高的精度和速度，但系统配置相对复杂，难以适用于实际生产环境。李宇等^[27]采用了基于改进的 YOLOv3 模型的深度学习方法进行涂胶缺陷检测，减少了人为因素的影响，但同样由于深度学习大模型需要大量数据训练模型，对计算资源的要求较高。

表5. 车缝识别与胶条边缘识别文献调研结果表

算法类型	具体算法	优势	劣势	参考文献
边缘检测	canny	高效准确，适合实时质量检测	光照条件及图像质量要求高；应对不同环境需要硬件与算法调整	[17][18][21][23]
	SVM	需求样本少，精度出色	大样本训练效益低、耗时长	[17]
	Faster-RCNN			[24]
深度学习	VGGnet	极高检测精度，全自动化检测	需要长时间系统学习调整与大量的数据集；不同场景需要重新训练模型	[26]
	YOLOv3			[27]
	KNN			[19]
	WT-OSELM			[22]
大数据统计	UBC	准确高效检测	需要大量的数据集；对数据质量要求高	[20]

上表是对过往研究中，以算法开发为主的文献总结。可以看出，在过往研究中，使用学习时数据量要求极高，很难适应当今车厂快速迭代、同一车型数据量小的问题。而如果需要做到极高精度则对系统有非常高的要求，但非常复杂、需要经常调整的系统不适合工业流水线的生产氛围。同时，不同算法的时间效率也不一样。可以看出，对各指标进行取舍非常重要。因此，我们需要分析各具体算法的利弊。

在 PVC 胶条边缘识别与车缝识别中，可以使用的算法包括边缘检测如 **canny** 算法，阈值分割如 **otsu** 法，形态学中的膨胀与腐蚀，机器学习中的 **SVM**、**CNN** 与深度学习等。

Canny 边缘检测算法，由 John F. Canny 在 1986 年首次提出，是一种多级边缘检测算法，旨在寻找图像中的最优边缘解或标记出灰度强度变化最明显的位置^[28]。该算法的目标是实现高准确性和低误差率的边缘检测，同时保持对实际边缘的尽可能接近，因此定位精度很高。然而，**Canny** 算法对噪声敏感，可能会误将噪声识别为边缘，并且需要手动设置高低阈值，自适应性有限。

Otsu 法是一种用于确定图像二值化分割阈值的算法，由日本学者大津于 1979 年提出^[29]。该方法也被称为最大类间方差法，因为它通过求解使前景和背景之间的类间方差最大化的阈值，实现图像的二值化分割。尽管大津法计算简单、方便，不受亮度影响，在双峰场景中快速分割有效，但其容易受到噪声干扰，不适用于非典型的图像分割情况，特别是在多峰图像中失效。

图像形态学中的膨胀和腐蚀是两种基本的操作，其中膨胀操作可以增大图像中的白色区域（前景），而腐蚀操作则相反，减小白色区域。通过将原始图像进行膨胀和腐蚀操作，可以得到边缘信息。尽管这一算法简单易用，但由于操作依赖于邻域，可能在图像边界处产生不希望的效果，且腐蚀操作可能导致细节信息的丢失。

支持向量机（**Support Vector Machines, SVM**）^[30]是一种用于二分类的机器学习模型，其学习策略是最大化间隔。在边缘检测中，**SVM** 可以通过计算每个样本点与超平面之间的距离来确定决策边界。虽然 **SVM** 在小样本情况下表现出色，但在处理大量观测样本时效率较低，并且仅支持二分类。

卷积神经网络（**Convolutional Neural Networks, CNN**）可以通过学习卷积核来识别图像中的边缘信息。**R-CNN**^[31]是首个开创性的算法，它接受输入图像并生成一组边界框作为输出，每个边界框包含一个对象和其类别。然而，该方法耗时较长。**Faster R-CNN**^[32]将 **RPN** 和 **Fast R-CNN** 合并为一个网络，速度较快但精度稍逊。**Mask R-CNN**^[33]通过添加用于对象掩码预测的分支，与用于边界框识别的分支并行，实现了更精确的分割。

而对于车缝识别也可以使用 **Hough** 变换算法，它可以在图像处理中从图像中识别几何形状，比如车缝。**Hough** 变换的基本原理在于利用点与线的对偶性^[34]，将原始图像空间的给定的曲线通过曲线表达形式变为参数空间的一个点，这样就把原始图像中给定曲线的检测问题转化为寻找参数空间中的峰值问题。它抗干扰能力强，对残缺、噪声不敏感；但是时间复杂度和空间复杂度高，会占用大量的内存与时间，同时在检测过程中只能确定直线方向，丢失了线段的长度信息。

在本项目中，面对的图像具有较高的复杂度，这导致了传统的 Otsu 阈值分割方法在处理上显得力不从心。Otsu 方法在面对具有明显双峰直方图的图像时表现出色，但对于本项目中的复杂图像，其表现可能不足以满足精确分割的需求。此外，由于胶条位置可能偏离图像中心，图像边缘区域的信息对于完整的胶条识别同样至关重要。这种场景下，传统的形态学操作，如膨胀与腐蚀，虽然在某些情况下有助于强化图像特征，但也可能导致边缘区域的信息丢失，从而影响胶条识别的准确性。

同时，考虑到项目的效率要求和实用性，使用时间和空间复杂度较高的算法，如霍夫变换（Hough Transform），可能不是最佳选择。霍夫变换虽然在特定条件下能够准确检测形状和线条，但在处理复杂图像时，其高昂的计算成本和潜在的低效率使其不适合本项目。

Canny 算法、CNN 和 SVM 因其在边缘检测、图像识别和分类方面的出色表现以及相对合理的计算成本，成为本项目中值得考虑的算法选择。通过综合运用这些方法，我们可以实现对胶条的有效识别，同时保持项目的实用性和效率。在多变的工业环境中，Canny 算法对噪声有较强的抵抗力，能够有效处理不同光照条件下的图像，故可以作为初始阶段的边缘检测方法，用于从复杂背景中准确提取胶条边缘。而卷积神经网络（CNN）能够从大量的训练数据中学习胶条的多样性，适应不同车型和胶条样式的变化，可以用于深度学习胶条的特征，尤其在复杂或模糊的情况下识别胶条的具体位置和形状。支持向量机（SVM）在有限的样本数据下，SVM 能提供准确的分类结果，适用于在特定条件下的精细识别。

4.1.3 居中度评估

对于居中度评估问题，主要有三方面问题需要考虑：偏移量计算，三维曲线重建与相机成像畸变校正。偏移量计算是居中度评估的主要指标，三维曲线重建与相机成像畸变校正则是考虑二维图像深度信息的丢失与成像畸变对计算结果的影响。针对各个问题，对相关方法的研究现状进行了调研，结果如下：

表6. 居中度评估文献调研结果

关键问题	方法	优势	局限性	文献
偏移量计算	Hausdorff 距离	算法简单高效	信息不完整	[35]
	Fréchet 距离	算法简单高效	信息不完整	[36]
	曲线拟合	完整曲线信息	算法复杂	/
三维重建	焦距法	硬件成本低	算法复杂	[37]
	光度立体法	信息完整	需多个光源	[38]
	双目立体成像	算法简单、精度高	硬件成本高	[39]

通过特征识别提取车缝与胶条边缘的信息，便可根据这些信息进行居中度的评估。通过取中点的方法，可利用胶条边缘信息计算得到胶条的中线位置。将胶条中线与车缝曲线进行对比，即可使用两条曲线的相似程度反映胶条偏移的程度。

为了评价两条曲线的相似程度，在两条曲线上选取若干采样点，直接计算两点集的欧式距离是最直接简便的算法。但点的选取会影响计算结果，在采样点的数目与选取位置上均有要求，无法确保结果的准确性。

Belogay 等^[35]介绍了两条曲线之间 Hausdroff 距离的算法。Hausdroff 距离可用于衡量两个集合之间的相近程度，其计算的是一个集合中的点到另一个集合中各点最小距离的最大值。该算法可用于元素数量不同的集合，同时经过了两个集合的整体比较，一定程度上可以保证结果的准确性。

Eiter 等^[36]介绍了平面曲线之间的 Fréchet 距离计算方法，这一方法可以衡量两条空间路径的相似性，可直观地表达一条曲线相对另一条在空间上的偏移程度。

上述方法都可以作为胶条中线相对车缝的偏移程度的评估指标，但它们都是考虑整条曲线的总体评估，对局部的偏移情况不能很好地反应。在 PVC 胶条喷涂的实际应用场景中，为了考虑车身后后续的安装，部分区域的胶条需要特意进行一定的偏移，防止覆盖部分安装点位。对于这些局部区域，需要对偏移程度建立不同的衡量标准。因此在应用上述方法时，需要预先划分不同区域，对其一一进行分析，增加了工作量。

除了使用离散点表示曲线之外，还可以通过曲线拟合方法，获得曲线的完整参数表达。参数曲线包含完整的曲线信息，同时也可通过参数域的划分进行局部分析，但计算复杂度会提高。

考虑算法复杂性与实际需求场景，目前存在的方案是：在车缝曲线上选取若干参考点，计算各点到胶条中线的法向距离作为偏移程度的评估指标。针对不同区域的参考点，可设置不同的偏移量参考阈值，如对需要进行偏移操作的区域设置更高的阈值。这一方法可以实现对不同的车缝区域的局部分析，但是仅仅利用了所选参考点的信息，对整条车缝曲线整体的信息未作分析，可能存在关键信息的遗漏。

上述的偏移量计算方法得到的结果以像素为单位，而为了满足工程应用需求，需要进行实际长度的换算。由于相机拍摄的二维图像不包含深度信息，因此在图像分析处理时，可能会导致换算结果的偏差。

为解决这一问题，可使用三维重建的方法，利用二维信息反求三维信息，最终得到研究对象的三维模型。Rajagopalan 等^[37]利用相机焦距变化产生的视差，提出了一种深度信息恢复算法。Woodham^[38]提出了光度立体法，通过改变光源获得不同图像，重建物体表面的三维结

构。霍等^[39]介绍了一种基于双目视觉的三维重建技术，利用三维视差图像进行空间三维位置的求解。上述方法都需要对相机进行标定，根据各项内参与外参，建立世界坐标、相机坐标与图像坐标的关系。目前较常用的标定法由张^[40]于 1998 年提出。罗^[41]介绍了一种考虑非线性成像的双目相机标定方法，该方法首先对两台相机分别进行一般的单目相机标定，获取对应参数后再通过计算得到相对安装位置等外部参数。

4.2 现有产品介绍

提供有关当前市场上已有产品的信息及数据。

对已有的相关方法进行调研，结果如下表所示。

表7. 现有算法调研

车缝线与胶条边缘检测	编号	设计规范	算法 1	算法 2	算法 3	单位
	S1	基于 OpenCV 框架	是	否	否	/
	S2	检测精度	/	/	0.3	mm
	S3	边缘识别准确率	97.85	97.79	95	%
	S4	算法时间	0.098	0.06	/	s
反光去除	编号	设计规范	算法 4	算法 5	算法 6	单位
	S5	适用于金属反光	否	否	是	/
	S6	去除效果	3	4	3	subj
胶条区域识别	编号	设计规范	算法 7	算法 8	算法 9	单位
	S7	区域识别准确率	99	99.4	99.5	%
	S8	单目/双目	多	多	单	/
居中度计算	编号	设计规范	算法 10	算法 11	算法 12	单位
	S9	包含整体曲线信息	否	否	是	/
	S10	局部区域分析	否	是	是	/

5 工程规格制定

对项目需求的目标值制定规格。

对于企业需求与各项设计规范，制定如下的规格表。

表8. 工程规格表

规范编号	需求编号	设计规范内容	理想值	单位
S1	R10	基于 OpenCV 框架	是	/
S2	R5	检测精度	1	mm
S3	R5、R6、R8、R9	边缘识别准确率	99	%
S4	R3	算法时间	50	s
S5	R12	适用于金属反光	是	/
S6	R1、R2、R4	去除效果	4	subj
S7	R6	区域识别准确率	99	%
S8	R5、R7	单目/双目	双	/
S9	R5、R9	包含整体曲线信息	是	/
S10	R14	局部区域分析	是	/

6 概念设计

6.1 问题描述

使用功能图描述问题，对关键需求进行分解，将问题分解为子问题进行描述。

对关键需求进行分解与分析，得到若干关键问题，各关键问题又可分解为若干子问题，如下图所示。

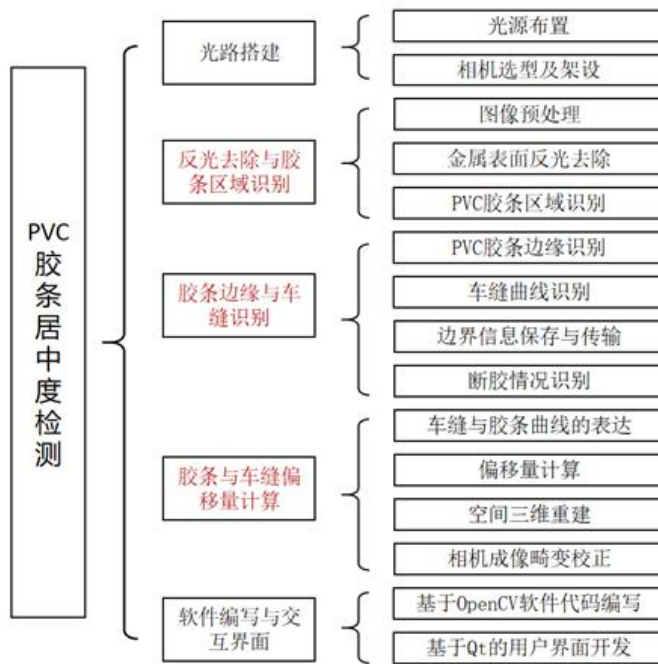


图2. 关键问题分解

针对 PVC 胶条的自动检测，总结得到五点关键问题。其中，光路搭建与软件编写由企业方参与完成，故本项目主要关注三个问题：反光去除与胶条识别，胶条边缘与车缝识别，以及胶条偏移量计算

6.2 概念设计生成

对于设计团队选择的每个方案提供设计方案图（或模型），并做出解释。

针对上述三个问题，采用如下的总体技术路线：

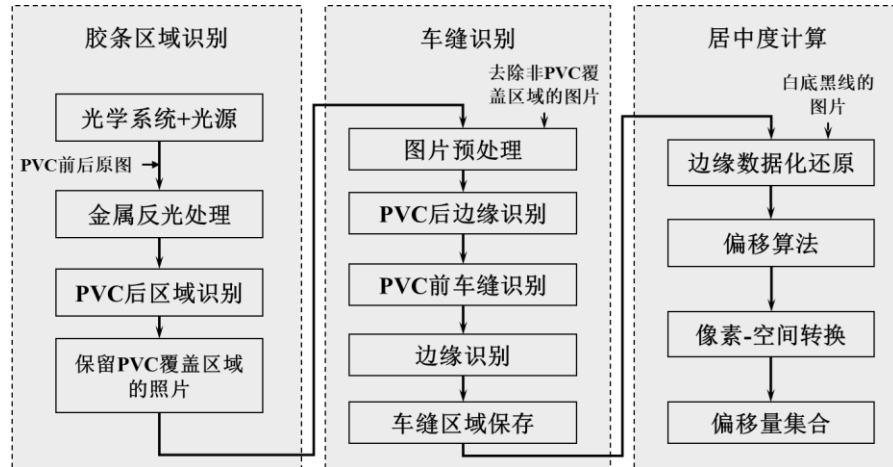


图3. 总体技术路线

该方案针对三个核心问题，分别采取三个步骤对原始图像数据进行处理，最终得到胶条相对于车缝的偏移量，以此作为居中度的评价指标。每一个步骤存在不同的具体实现方案，需要进行比较探讨。

（1）胶条区域识别

胶条区域识别主要涉及两方面的问题：高光去除与区域识别。其中，可采用的高光去除方法主要有以下五种：基于二色模型，基于偏振设备、基于像素点强度值、基于 HSV 颜色空间、基于 SIFT-flow 算法，而胶条区域识别可以使用传统数字图像处理技术和基于机器学习的算法两种方案。

（2）车缝识别

在胶条区域识别的基础上可以去除非胶条区域，缩小考察范围。在此基础上进行车缝识别，可采取如下三种方案：传统 Opencv 方法、支持向量机方法与卷积神经网络。

（3）居中度计算

根据胶条与车缝的识别结果，可计算胶条相对于车缝的偏移量。这一步骤可采取两种方法：基于离散像素点计算与基于拟合参数曲线计算。

6.3 概念设计选择

提供概念设计筛选和评分标准，用于确定最符合项目需求的设计方案，并进一步发展成为最终设计。应用三维建模软件对选定的设计方案进行系统级设计。

针对胶条区域识别、车缝识别与居中度计算三个环节各自的方案进行分析比较，得到最终方案。

6.3.1 胶条区域识别

胶条区域识别涉及高光去除与区域识别两方面问题。

对于高光去除的五种方案，使用加权决策矩阵进行概念方案决策。概念评估所依据的设计准则包括：鲁棒性、设备成本、时间成本、算力成本、车身材料适用性、光照要求、去除效果。

作目标树，确定各设计准则的权重值，计算加权决策矩阵，结果如下：

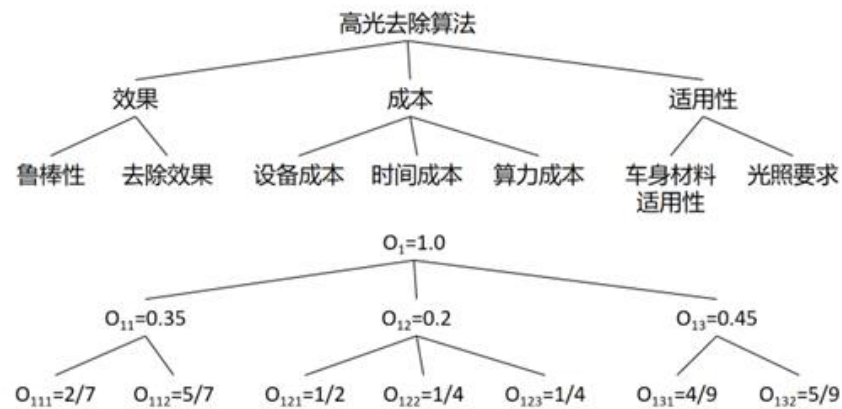


图4. 高光去除算法的目标树

表9. 高光去除算法的加权决策矩阵

设计准则	权重系数	单位	基于二色模型			基于偏振设备			基于像素点强度值			基于 HSV 颜色空间			基于 SIFT-flow		
			量级	分数	评价	量级	分数	评价	量级	分数	评价	量级	分数	评价	量级	分数	评价
鲁棒性	0.1	经验	弱	2	0.2	低	3	0.3	弱	2	0.2	一般	6	0.6	优秀	8	0.8
设备成本	0.1	经验	低	8	0.8	高	2	0.2	低	7	0.7	低	8	0.8	较高	7	0.7
时间成本	0.05	经验	低	9	0.45	低	7	0.35	低	6	0.3	低	8	0.4	高	3	0.15
算力成本	0.05	经验	低	7	0.35	低	8	0.4	中等	5	0.25	中等	6	0.3	高	3	0.15
适用于车身材料	0.2	经验	小	3	0.6	中等	5	1	弱	2	0.4	优秀	9	1.8	弱	2	0.4
光照要求	0.25	经验	高	2	0.5	高	1	0.25	高	2	0.5	低	8	2	低	7	1.75
去除效果	0.25	经验	中等	4	1	中等	4	1	良好	7	1.75	优秀	8	2	良好	6	1.5
总计	1				3.9			3.5			4.1			7.9			5.45

可见，基于 HSV 颜色空间的高光去除算法得分最高。因此选择基于 HSV 颜色空间的高光去除算法。

对于胶条区域识别的两种方案，设置设计准则为：识别准确性、设备要求、时间成本、算力成本、是否基于 OpenCV 框架，并作设计准则比较矩阵{C}如下：

表10.设计准则比较矩阵

	识别准确性	设备要求	时间成本	算力成本	基于 OpenCV 框架
识别准确性	1	3	5	5	1.25
设备要求	0.33333333	1	1.6666667	1.6666667	0.4166666
时间成本	0.2	0.6	1	1	4
算力成本	0.2	0.6	1	1	4
基于 OpenCV 框架	0.8	2.4	0.25	0.25	1

计算正则化准则比较矩阵{NormC}，并计算权重{W}：

表11.正则化准则比较矩阵

	识别准确性	设备要求	时间成本	算力成本	基于 OpenCV 框架	权重{W}
识别准确性	0.39438	0.34884	0.56075	0.56075	0.11726	0.39639
设备要求	0.13146	0.11628	0.18668	0.18668	0.03906	0.13203
时间成本	0.07888	0.06977	0.11203	0.11203	0.37500	0.14954
算力成本	0.07888	0.06977	0.11203	0.11203	0.37500	0.14954
基于 OpenCV 框架	0.31551	0.39535	0.02851	0.02851	0.09362	0.17230

对矩阵{C}进行一致性检查：

表12.一致性检查

权重综合向量	准则权重	一致性向量{Cons}
1.26864787	0.396393805	3.200473505
0.517326373	0.132031159	3.918214277
1.16719856	0.149541784	7.805166728
1.16719856	0.149541784	5.82134
2.030674731	0.172299931	11.78569669
{Cons}中的平均值 λ		6.50617824
一致性指数 $CI=(\lambda-n)/(n-1)$		0.101235648
一致性比率 $CR=CI/RI$		0.091203286
$CR \leq 0.10?$		是

{W}有效，计算正则成本，编制最终的决策矩阵：

表13.胶条区域识别算法决策矩阵

	识别准确性	设备要求	时间成本	算力成本	基于 OpenCV 框架	选项值
传统数字图像处理技术	0.1	0.193	0.204	0.197	0.113	0.807
基于机器学习的算法	0.087	0.078	0.053	0.024	0.148	0.39

比较两种方案，传统数字图像处理技术得分更高。因此，选择用传统数字图像处理技术进行胶条区域识别。

6.3.2 车缝识别

对于车缝识别的三种方案，建立如下目标树与权重：

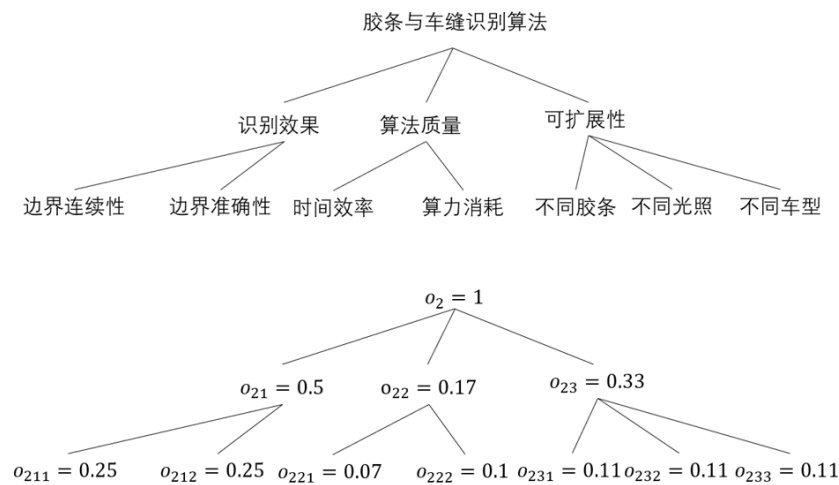


图5. 胶条与车缝识别的目标树与对应权重

再根据目标及权重，计算加权决策矩阵：

表14.胶条与车缝识别的加权决策矩阵

设计准则	权重系数	单位	Opencv 传统算法			SVM			CNN 神经网络		
			量级	分数	评价	量级	分数	评价	量级	分数	评价
边界连续性	0.25	经验	低	6	1.5	高	8	2	高	8	2
边界准确性	0.25	经验	高	8	2	低	7	1.75	低	7	1.75
时间效率	0.07	经验	高	10	0.7	中等	6	0.42	低	3	0.21
算力消耗	0.1	经验	低	10	1	中等	6	0.6	低	3	0.3
不同胶条	0.11	经验	高	8	0.88	低	4	0.44	中等	6	0.66
不同光照	0.11	经验	高	8	0.88	低	4	0.44	中等	6	0.66
不同车型	0.11	经验	高	8	0.88	低	4	0.44	中等	6	0.66
总计	1				7.84			6.09			6.24

可见在三个方案中，Opencv 传统算法的得分最高，因此采用传统的边缘检测方法。

6.3.3 居中度计算

针对居中度算法的两种方案，制定如下四条设计准则：算法准确性、算法耗时、算法鲁棒性与结果可视程度。根据上述设计准则，使用层次分析法，构造比较矩阵{C}如下：

表15.设计准则比较矩阵

	算法准确性	算法耗时	算法鲁棒性	结果可视程度
算法准确性	1.00	7.00	3.00	5.00
算法耗时	0.14	1.00	0.20	0.33
算法鲁棒性	0.33	5.00	1.00	3.00
结果可视程度	0.20	3.00	0.33	1.00

计算正则化准则比较矩阵{NormC}与权重{W}：

表16.设计准则正则化比较矩阵

	算法准确性	算法耗时	算法鲁棒性	结果可视程度	权重{W}
算法准确性	0.60	0.44	0.66	0.54	0.56
算法耗时	0.09	0.06	0.04	0.04	0.06
算法鲁棒性	0.20	0.31	0.22	0.32	0.26
结果可视程度	0.12	0.19	0.07	0.11	0.12

对比较矩阵进行一致性检查：

表17.比较矩阵一致性检查

权重综合向量	准则权重	一致性向量{Cons}
2.36	0.56	4.22
0.23	0.06	4.04
1.10	0.26	4.17
0.49	0.12	4.04
{Cons}中的平均值 λ		4.12
一致性指数 $CI=(\lambda-n)/(n-1)$		0.04
一致性比率 $CR=CI/RI$		0.04
$CR \leq 0.10?$		是

比较不同方案，构造方案决策矩阵{FRating}：

表18. 方案决策矩阵

	离散像素点	参数曲线拟合
算法准确性	0.25	0.75
算法耗时	0.75	0.25
算法鲁棒性	0.83	0.17
结果可视程度	0.25	0.75

最终计算 $\{FRating\}^T \cdot \{W\}$ ，得到各方案分值。其中，离散像素点方案为 0.43 分，参数曲线拟合方案为 0.57 分。因此，参数曲线拟合方案为最佳的方案。

综上所述，各步骤将采取如下的最终方案：在胶条区域识别中，采用基于 HSV 颜色空间的高光去除算法，并基于传统图像识别算法识别胶条区域；在车缝识别中，使用传统边缘检测算法识别车缝曲线；在居中度计算中，对识别所得曲线进行参数化拟合，在此基础上进行偏移量计算。

7 详细设计

7.1 工程分析

提供支持设计方案的分析结果，如计算机模拟及仿真结果、有限元分析、实验验证等。

7.2 工艺规划

提供加工工艺规划，描述如何实现原型的加工制造，注意 DFM 及 DFA。

7.2.1 胶条区域识别

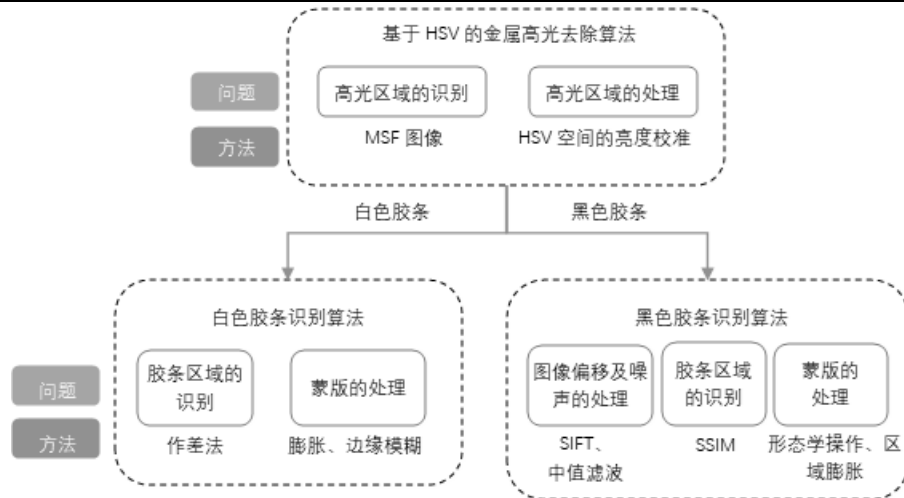
此部分内容主要包括金属表面高光去除算法和胶条区域识别算法的开发与优化。

(1) 通过 HSV 色彩空间转换和特定的亮度校准，有效去除金属表面的高光干扰，为胶条识别提供高质量的图像输入。

(2) 针对白色胶条，采用作差法模型，利用图像间的像素差异进行识别。

(3) 针对黑色胶条，引入了基于结构相似性指标 (SSIM) 的算法，通过比较亮度、结构和对比度的相似度，准确识别与车身颜色相近的黑色胶条。

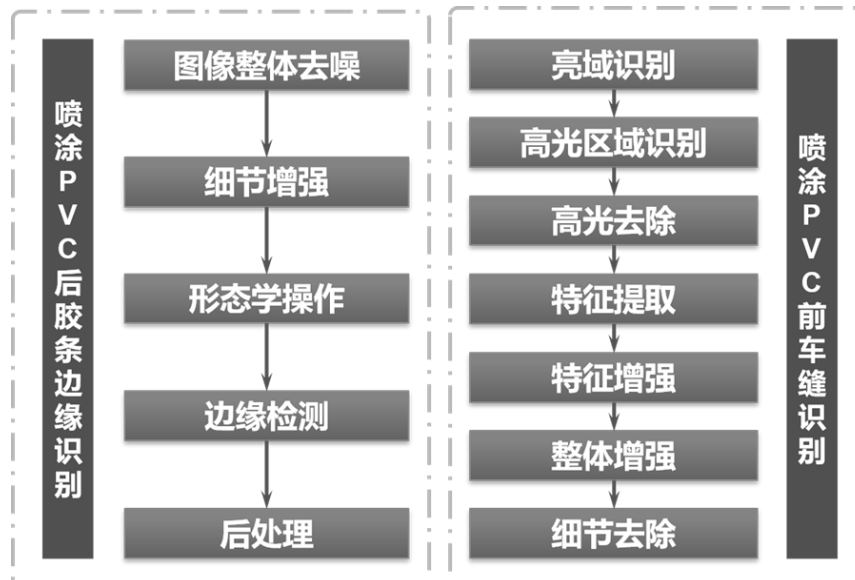
总体流程图如下图所示。



7.2.2 车缝识别

针对胶条边缘的识别，顺次包括图像滤波、特征增强、特征提取、边缘检测以及后续处理，最终确定了中值滤波、锐化、形态学梯度、Canny 算法和二值化处理作为胶条区域提取的有效方法。

针对车缝的识别，通过灰度阈值来区分亮区域，以及应用连通域分析，面积阈值和形状分析来精细筛选高光区域。然后通过拉格朗日公式，变分法和差分方法来优化高光区域的图像平滑处理，并以均值迭代来逼近。随后采取一系列特征提取与筛选方法获得车缝。



7.2.3 居中度计算

居中度计算将采取如下技术路线：

- (1) 根据车缝与胶条边缘识别结果图片，使用骨架提取算法获得胶条中心线与车缝曲线，并对车缝曲线进行拟合，获得其参数化表达。
- (2) 设计偏移量算法，计算特定位置处胶条相对于车缝的偏移量（以像素为单位）。
- (3) 进行像素-空间转换，得到以毫米为单位的实际偏移量，考虑换算过程中的误差问题。

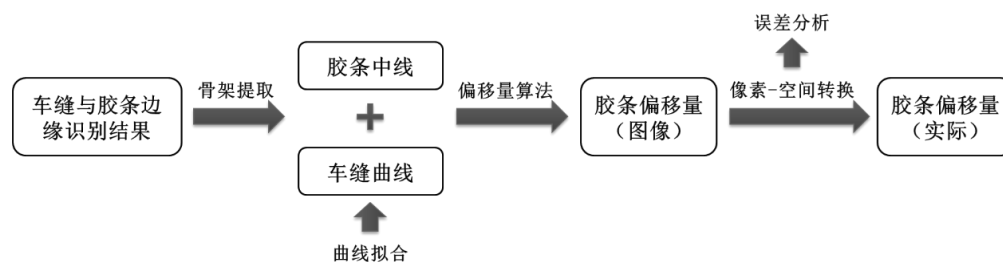


图8. 居中度计算技术路线示意图

7.3 材料选择

描述选择原型材料的过程及驱动因素（可用性，成本，强度，灵活性，可加工性，可焊性，绿色材料，可回收性等）。

本项目选用 Python 与 MATLAB 作为主要编程语言。Python 基于其广泛的库支持、简洁的语法结构以及高效的开发环境，使得编写和维护代码变得更加容易。特别地，OpenCV 库为 Python 提供了强大的图像处理功能，而 NumPy 等库则极大地简化了矩阵和数组操作。MATLAB 则擅长于数学计算、算法开发以及数据可视化，适合处理复杂的数学建模，自带的多种工具箱能够提供丰富的函数支持。同时，MATLAB 的 App 开发模块能够在算法开发的基础上进行软件界面编写，为结果展示提供了极大便利。另外，两种语言具有相似的数据格式，能够实现便捷的数据传输。

7.4 组件选择

描述选择原型中所包含的组件的过程及驱动因素（可用性，成本，人体工程学，功能，速度，尺寸，绿色材料等）。

7.4.1 胶条区域识别

此部分算法包含两部分：高光的去除和胶条区域的识别。

去高光算法基于 HSV（Hue 色相, Saturation 饱和度, Value 亮度）色彩空间，通过比较修改后的无高光图像（MSF）与原图的差异来识别高光区域。然后，利用校准函数调整图像的 V

通道数值，降低高光亮度，减少其对胶条识别的影响。其中，为了防止白色胶条被识别为大面积高光，本算法利用胶条的轮廓和面积排除了白色胶条区域。将高光区域以掩码的形式保存，适当膨胀以扩展高光区域，并将区域边缘高斯模糊处理，以使处理效果更自然柔和。去高光效果如下图所示。



图9. 车缝和胶条去高光图像

在去除高光处理后，对胶条区域进行识别。对于白色胶条，采用基于作差法的胶条识别算法来识别。该算法首先通过仿射变换对图像进行对齐，以降低拍摄角度差异带来的影响。然后，计算两幅图像的差值绝对值并进行灰度阈值二值化，得到胶条区域的蒙版。将蒙版作用于原图即可得到胶条和车缝区域，处理效果如下图所示。



图10. 车缝和白色胶条区域识别结果

对于黑色胶条，基于结构相似性指标（SSIM）的黑色胶条识别算法。由于黑色胶条与灰色车身颜色相近，传统的作差法难以准确识别，因此本研究采用 SSIM 算法，它通过比较亮度、结构和对比度来衡量两幅图像的相似度。SSIM 算法的关键在于其能够通过调整三要素的权重，更精确地识别图像差异。在本算法中，使用正交实验确定亮度和对比度的权重参数，使

用胶条识别成功率确定亮度的权重，最后确定权重参数 $(\alpha, \beta, \gamma) = (0.1, 1, 0.1)$ 。黑色胶条识别效果如下图所示。



图11.车缝和黑色胶条区域识别结果

7.4.2 车缝识别

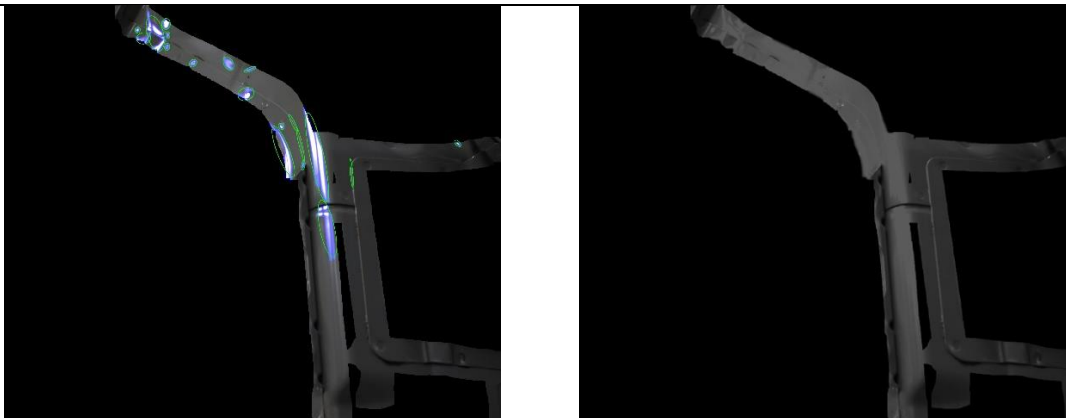
根据文献检索结果得知，一般的图像处理技术依次包括滤波去噪、图像增强、边缘检测等。

首先对胶条区域进行处理。选择双边滤波方法进行去噪，再使用锐化操作进行图像增强，最后使用形态学梯度操作提取得到胶条边缘信息。



图12.胶条区域

接下来进行车缝识别。通过设置灰度阈值、连通域分析和形状分析等操作，可筛选得到需要去除的高光区域。



(a) 需要去除的高光区域

(b) 去高光效果

图13.高光去除

完成预处理后，使用 sobel 算子处理图像，并调整图像对比度，提取得到如下的车缝特征。

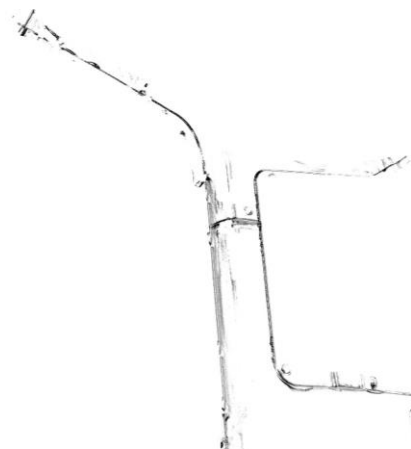


图14.车缝特征提取

最后使用形态学操作拼接车缝，并对所得结果进行二值化，最终得到如下结果：

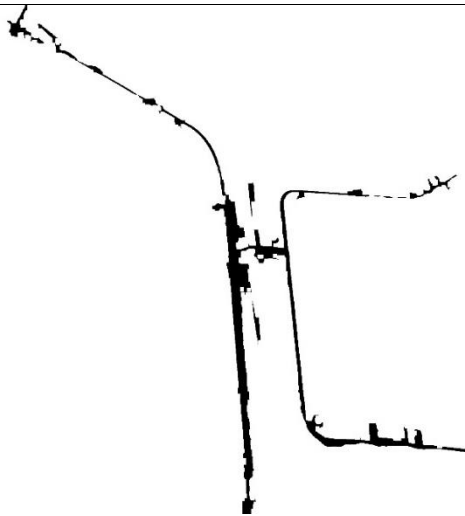


图15.最终结果

7.4.3 居中度计算

根据上述的技术路线，居中度计算主要包含四个操作：骨架提取，曲线拟合，偏移量计算与像素-空间转换。

其中，骨架提取采用细化与去毛刺算法实现，可得到胶条与车缝的骨架曲线，用于表示二者的位置信息，如下图所示。


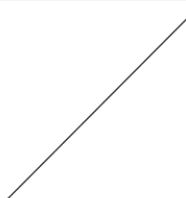
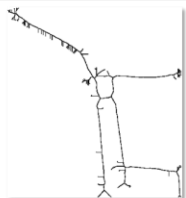





	输入图像	膨胀操作	图案细化	去毛刺
胶条骨架				
车缝骨架				

图16.骨架提取操作

对车缝骨架上的数据点进行排序，使用 B 样条方法对骨架曲线进行曲线拟合，并对交叉点进行标注，得到连续光滑的拟合曲线，平均拟合误差为 1.02 像素。

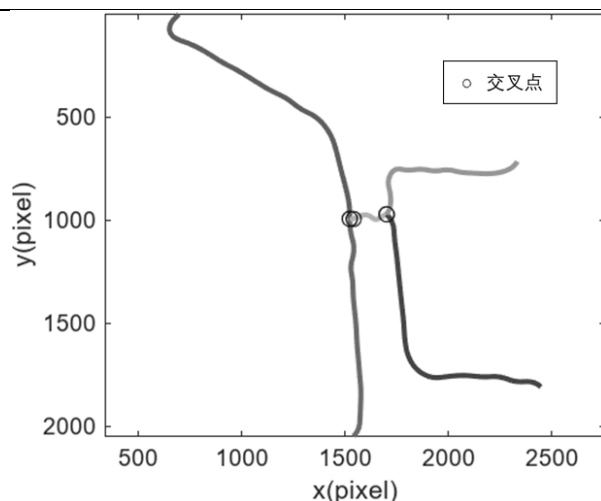


图17.B 样条曲线拟合结果

在车缝曲线上等距选取检测点，计算法线方向上车缝曲线与胶条中线的距离，以此作为胶条的偏移量。结果如下图所示。

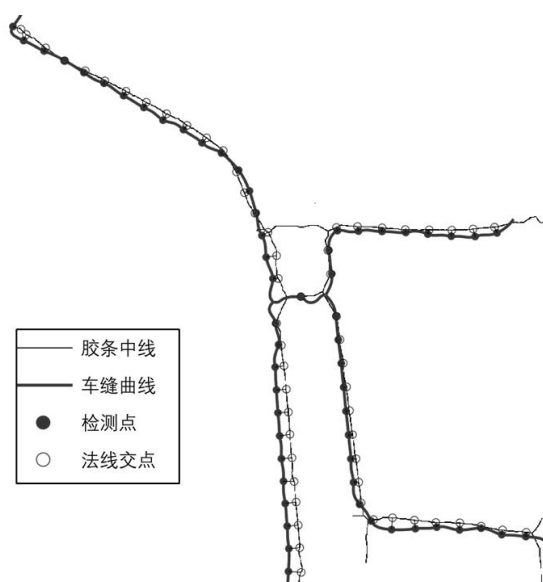


图18.偏移量计算结果

上述计算得到以像素为单位的偏移量，需要将其转换为实际长度单位。使用小孔成像的相机模型，根据相机内参与深度信息可进行像素坐标与空间坐标之间的转换。对于车身倾斜造成的误差，通过建立成像模型对其进行定量分析，得到 1mm 的容许误差范围对应的车身倾斜角度为 13° 。对于超出容许范围的情形，则通过确定车身平面的位置，插值计算图像中的深度值，以此进行误差补偿，如下图所示。这种方法可有效减少车身倾斜引起的误差。

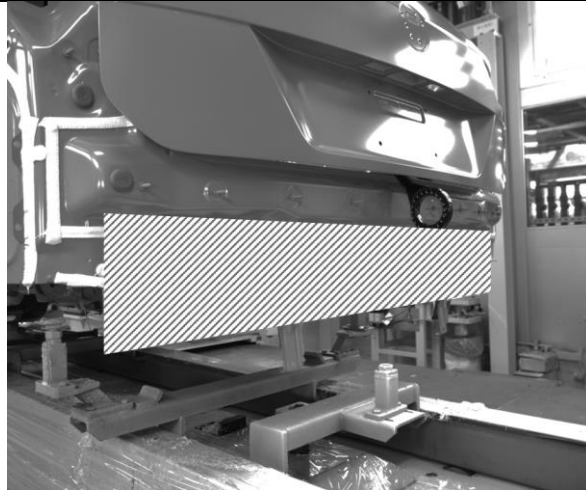


图19.车身平面位置确定

7.5 测试评估

描述如何评估/测试设计方案，以满足项目需求。

分别对算法的鲁棒性与结果的准确度进行测试。

对于胶条喷涂前后两张图片的拍摄角度偏差，通过人为偏移两张图像模拟这种情形，得到在保证结果有效的情况下，水平与竖直方向的偏移可达 60 像素，斜向偏移可达 45 像素，这一结果远超实际情形中可能出现的偏移情况，表明算法可适用于大部分的情形。

将居中度算法应用于不同的车身位置，均可准确计算偏移情况，表明算法具有较好的鲁棒性。

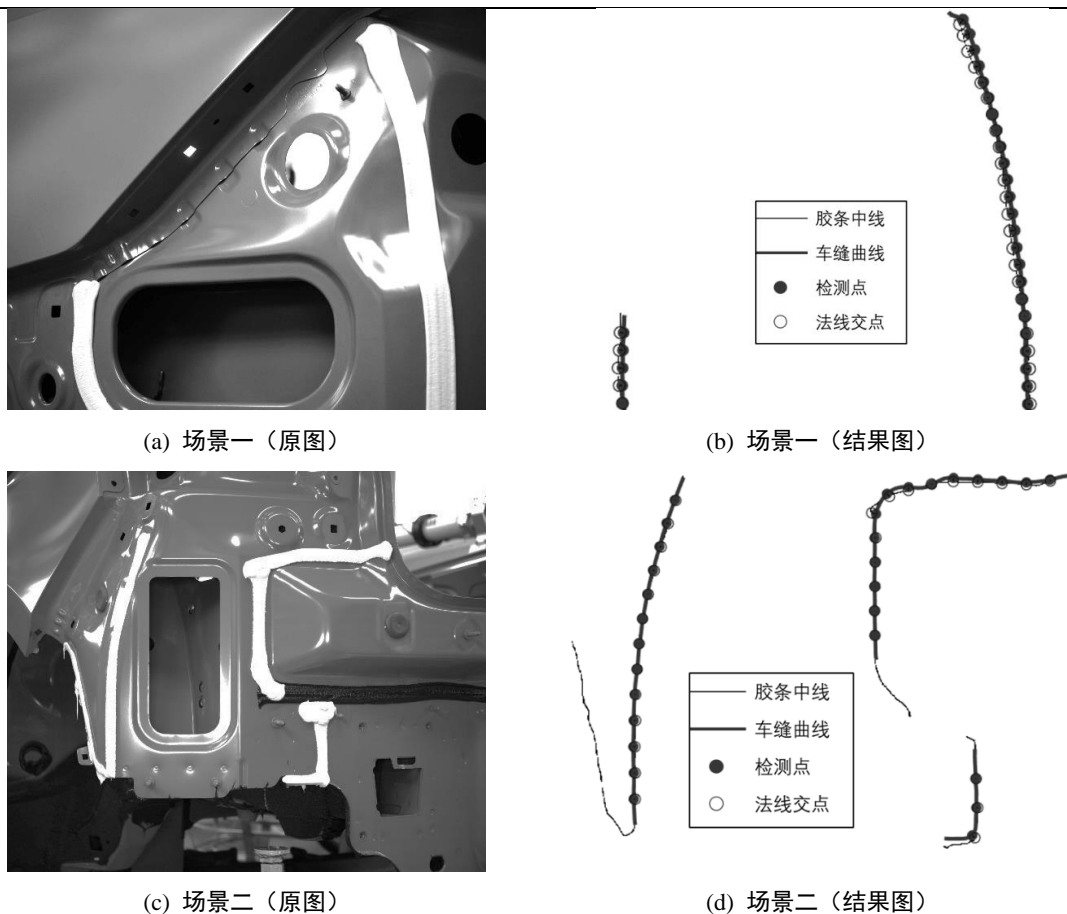


图20.不同位置胶条偏移量计算结果

为了验证误差补偿结果的准确度，使用标定棋盘格进行实验，通过将棋盘格倾斜放置，模拟车身的倾斜情形，计算图像中的棋盘格长度。实验结果表明，深度插值的误差补偿算法可有效减少车身倾斜导致的误差。

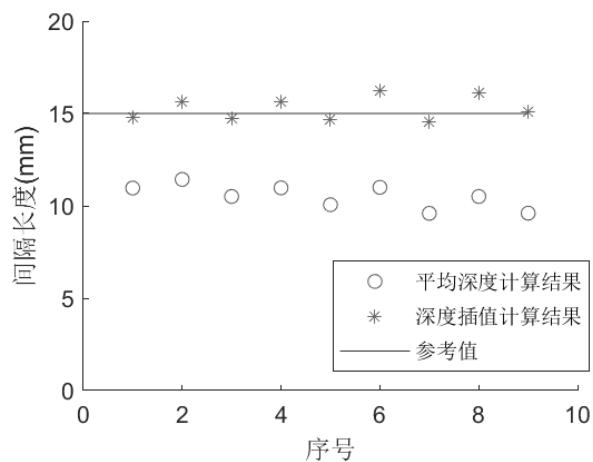


图21.棋盘格长度计算结果

7.6 经济性分析

对加工过程的经济性进行分析，对批量生产的经济性进行分析。

引入自动化机器视觉技术可以显著提高加工过程的效率和准确性。首先，硬件投入成本主要涉及高分辨率工业摄像头、高性能计算机和存储设备的购置，成本较低。而通过减少视觉检测人员的需求，自动化技术减少操作员的数量，能够有效节省大量人力成本，也能够节省破坏性检查的成本。

在大规模批量生产环境下，引入自动化机器视觉技术能够显著提高生产效率和产品质量。自动化技术可以加速生产周期，降低生产成本，并减少由于质量问题而导致的额外成本。此外，自动化还能减少人为过失，提高操作的稳定性和一致性。

这些节约将直接贡献到工厂的整体经济效益中，提升生产效率和产品质量的同时，降低额外的质量控制和生产成本。综合分析显示，引入自动化机器视觉技术后的总体经济效益是正向的，能够为工厂带来长期的竞争优势和经济收益。

8 设计变更记录（中期答辩后的变更）

描述中期答辩后，设计方案、模型的变更，例如，选择的材料类型改变、测试方法改变、子系统设计改变等。如果中期答辩后没有做任何变更，则说明是如何在项目中期即实现了完美的设计方案。

中期答辩后，部分研究内容发生了变更。

胶条区域识别方面，在项目中期时已经实现了白色胶条的准确识别，但是在算法鲁棒性验证时，发现对于黑色胶条的识别效果不佳，因此引入了基于结构相似性指标（SSIM）的算法，对黑色胶条情形进行研究，并成功实现黑色胶条的识别。后经实验验证，SSIM 算法也能够很好地识别白色胶条。

车缝检测方面，在中期检查时已经完成胶条边缘识别，并取得了较好的结果。之后对于车缝的特征提取，应用了相似的技术策略，但由于所面临的技术难题更为复杂，效果不尽人意。因此，本项目后续针对车缝提取中的相关因素全面分析，提出了改善车缝识别准确性的技术策略。

居中度计算方面，原计划使用车缝曲线与胶条的边缘线进行胶条偏移量的计算，但在研究过程中发现，此种方法在胶条交叉处无法获得正确的结果。后续改为计算胶条的中心骨架，以此表示胶条的位置。

9 结论和建议

总结所有成果，对问题、解决方案以及解决方案效果应详尽总结。项目过程总结，说明最终设计是否满足企业需求，对企业需求满足情况进行自我评估，分数 1-10（10 分为最高）。

对设计方案的社会需求（安全、环境、可持续发展、伦理等）进行自我评估，分数 1-10（10 分为最高）。说明设计方案满足了哪些需求，以及达到了什么水平？

对设计的不足分析与讨论。在项目已经完成的情况下，分析项目的创新，以及设计的优缺点，说明哪里需要改进以及改进的方法。有些项目可能会在明年继续进行，因此根据项目小组的经验，给出一些建议，为赞助企业和以后的学生提供帮助。

企业需求满足情况：8 分。本项目基于机器视觉方法，开发了车身 PVC 胶条的自动化检测系统，实现了胶条区域与车缝的自动化识别与胶条偏移量计算，并对结果误差进行分析与补偿，实现了企业要求的毫米级检测精度。同时编写了软件界面，实现了结果的可视化。



图22.软件界面

社会需求：8 分。本设计方案通过自动化机器视觉技术，提高了车缝识别的精度和可靠性，减少了人工操作的误差和安全隐患。在汽车生产线上，自动化系统可以避免人工检测过程中可能出现的安全事故，保障了操作人员的安全。通过提高生产效率和产品质量，减少了废品率，从而降低了资源浪费和环境污染。此外，自动化系统的引入减少了操作人员的工作负担，提高了工作环境的安全性和舒适性。通过技术替代部分人工操作，有助于减少劳动强度和工作风险。

本项目尚存在改进与完善空间。当前的图像采集系统采用单目相机方案，难以获取深度信息，且成像结果易受环境光照等因素干扰。为取得更好的检测效果，可考虑采用双目视觉方案，丰富图像数据信息。如要考虑硬件成本，可以使用激光雷达等其他类型的传感器获取深度

信息，与视觉图像信息互补。同时，受限于研究开展的客观条件限制，目前的研究主要停留在算法层面，缺乏实际的工程应用验证。未来应加强与企业的产学研合作，建立规范的检测系统解决方案，推动研究成果向实际生产的转化。

致谢

本项目的研究和推进过程中，我们收到了许多宝贵的指导和帮助，在此我们要表达最深切的谢意。

首先，我们要特别感谢项目的指导老师裴景玉教授。裴老师不仅在学术上给予我们极大的支持和指导，提出了许多富有洞察力的建议，还在整个研究过程中不断鼓励和激励我们。裴老师耐心地帮助我们修改论文细节，并教导我们如何进行答辩，她的严谨治学态度和敬业精神是我们学习的榜样。

其次，我们要感谢机械与动力工程学院的全体老师和同学。在学习和研究中，他们提供了良好的学术氛围和无私的帮助，使我们能够不断进步和成长。

特别感谢上海交通大学提供的优越研究环境和资源支持，使得我们能够顺利完成学业和研究工作。同时，我们也要感谢本项目的赞助企业上汽大众汽车有限公司，以及企业指导老师王子平老师。感谢王老师在论文选题以及实验数据收集等方面给予的帮助和支持。

最后，我们要感谢所有直接或间接影响过、帮助过我们的人，是你们让本项目的研究之路充满温暖和希望。

参考文献:

- [1] SHAFER S A. Using color to separate reflection components[J/OL]. Color Research & Application, 1985, 10(4): 210-218.
- [2] KLINKER N J, SHAFER S A, KANADE T. The Measurement of Highlights in Color Images[R]//International Journal of Computer Vision: 卷 2. 1988.
- [3] MALLICK UC S P, DIEGO TODD ZICKLER S, BELHUMEUR P, 等. Dichromatic separation: specular removal and editing[R]//IEEE transactions on Signal Processing: 卷 42. 1994.
- [4] NAYAR S K, FANG X S, BOULT T. Separation of Reflection Components Using Color and Polarization[R]//International Journal of Computer Vision: 卷 16. Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [5] SHEN H L, ZHENG Z H. Real-time highlight removal using intensity ratio[J/OL]. Applied Optics, 2013, 52(19): 4483-4493.
- [6] BAI J, MA L, YAO L, 等. Removing of Metal Highlight Spots Based on Total Variation Inpainting with Multi-sources-flashing[R]//LNAI: 卷 3802. 2005.
- [7] ORTIZ F, TORRES F. A New Inpainting Method for Highlights Elimination by Colour Morphology[R]//LNCS: 卷 3687. 2005.
- [8] YU D, HAN J, JIN X, 等. Efficient highlight removal of metal surfaces[J/OL]. Signal Processing, 2014, 103: 367-379.
- [9] LI Y, BROWN M S. Exploiting reflection change for automatic reflection removal[C/OL]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2013: 2432-2439.
- [10] 李长勇, 亓利伟, 曹其新. 基于机器视觉的烟箱包装带识别定位算法[J]. 华中科技大学学报, 2008, 36: 61-64.
- [11] 彭红星, 邹湘军, 陈丽娟, 等. 基于双次Otsu算法的野外荔枝多类色彩目标快速识别[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 61-68.
- [12] HANNAN M W, BURKS T F, BULANON D M. A MACHINE VISION ALGORITHM COMBINING ADAPTIVE SEGMENTATION AND SHAPE ANALYSIS FOR ORANGE FRUIT DETECTION[R].
- [13] KURTULMUS F, LEE W S, VARDAR A. Green citrus detection using “eigenfruit”, color and circular Gabor texture features under natural outdoor conditions[J/OL]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 78(2): 140-149.
- [14] WANG C, ZOU X, TANG Y, 等. Localisation of litchi in an unstructured environment using binocular stereo vision[J/OL]. Biosystems Engineering, 2016, 145: 39-51.
- [15] WOO CHAW SENG, SEYED HADI MIRISAEI. A New Method for Fruits Recognition System[C]//2009 International Conference on Electrical Engineering and Informatics. IEEE, 2009.
- [16] LÜ Q, CAI J R, LIU B, 等. Identification of fruit and branch in natural scenes for citrus harvesting robot using machine vision and support vector machine[J/OL]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2014, 7(2): 115-121.
- [17] 季甜甜. 发动机密封胶缺陷检测方法研究与系统研究[D]. 上海应用技术大学, 2021.

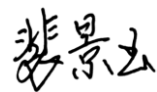
- [18] 陈滋化,张红刚,吕超等.机器视觉技术在汽车PVC密封质量检测方面的应用与研究[J].现代涂料与涂装,2022, 25(11):46-48.
- [19] 于一深,苏宇锋,高建设.基于KNN分类的涂胶质量检测算法[J].组合机床与自动化加工技术,2023(07):127-130.
- [20] 任双超. 基于UBC大数据对PVC涂胶膜检测技术研究[D].沈阳大学,2021.
- [21] 何新宇,赵时璐.基于机器视觉的PVC喷涂边缘检测方法[J].沈阳大学学报(自然科学版),2018,30(06):441-445.
- [22] 乔宇. 基于机器视觉的汽车玻璃涂胶质量检测技术研究[D].长春工业大学,2020.
- [23] 王爽,赵时璐,张震等.基于机器视觉的汽车轮罩PVC涂胶检测技术研究[J].机械设计与制造,2021(05):184-188.
- [24] 马天慧,曹伟,孟令占.基于机器视觉及深度学习的PVC GAD胶条状态检测[J].上海涂料,2023,61(03):84-89.
- [25] 李肖静. 基于深度学习的汽车涂胶图像缺陷检测[D].沈阳理工大学,2022.
- [26] 焦键.基于线阵相机的涂胶质量检测[J].山西电子技术,2022(01):44-47.
- [27] 李宇. 商用车玻璃涂胶质量视觉检测方法研究[D].湖北汽车工业学院,2021.
- [28] J. Canny, "A Computational Approach to Edge Detection," in IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. PAMI-8, no. 6, pp. 679-698, Nov. 1986.
- [29] N. Otsu, "A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms," in IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 9, no. 1, pp. 62-66, Jan. 1979.
- [30] Cortes, C., Vapnik, V. Support-vector networks. Mach Learn 20, 273-297 (1995).
- [31] R. Girshick, J. Donahue, T. Darrell and J. Malik, "Rich Feature Hierarchies for Accurate Object Detection and Semantic Segmentation," 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Columbus, OH, USA, 2014, pp. 580-587.
- [32] S. Ren, K. He, R. Girshick and J. Sun, "Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks," in IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 39, no. 6, pp. 1137-1149, 1 June 2017.
- [33] K. He, G. Gkioxari, P. Dollár and R. Girshick, "Mask R-CNN," 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), Venice, Italy, 2017, pp. 2980-2988.
- [34] Hough, P.V.C. Method and means for recognizing complex patterns, U.S. Patent 3,069,654, Dec. 18, 1962.
- [35] Belogay E, Cabrelli C, Molter U, et al. Calculating the Hausdorff distance between curves[J]. Information Processing Letters, 1997, 64(1).
- [36] Eiter T, Mannila H. Computing discrete Fréchet distance[J]. 1994.
- [37] Rajagopalan A N, Chaudhuri S. A variational approach to recovering depth from defocused images[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 1997, 19(10): 1158-1164.
- [38] Woodham R J. Photometric method for determining surface orientation from multiple images[J]. Optical engineering, 1980, 19(1): 139-144.
- [39] 霍家道, 李栋, 刘成明等. 一种基于立体视差图的三维重建技术[C]. 中国指挥与控制学会 (Chinese Institute of Command and Control). 第十一届中国指挥控制大会论文集. 江苏自动化研究所, 2023:6.
- [40] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [41] 罗桂娥. 双目立体视觉深度感知与三维重建若干问题研究[J]. 中南大学学报, 2012, 5: 19-24.

校内导师意见:

本项目针对汽车制造中 PVC 胶条涂胶质量检测问题,提出了一种基于机器视觉的自动化检测方法。

项目组成员通过对 PVC 胶条检测的关键问题进行分析与分解,确定了反光去除与胶条识别、胶条边缘与车缝识别、胶条偏移量计算三个核心问题。针对各问题提出多种备选方案,并通过加权决策矩阵法对方案进行评估与优选。最终确定采用基于 HSV 色彩空间的高光去除算法,使用传统图像处理技术进行胶条区域识别;车缝识别采用 Canny 等传统边缘检测方法;对于居中度计算,通过对车缝曲线进行参数化拟合,计算胶条中线的法向距离作为偏移量。

采用 OpenCV 和 QT 进行了算法实现和用户界面软件编写,针对胶条区域提取、车缝识别与居中度计算分别进行了测试。结果表明,所提出的算法具有较好的鲁棒性,可以适应不同车型与不同位置,实现毫米级的检测精度,基本满足企业需求。本方案在保障汽车涂胶质量的同时,提高了检测效率,降低了人工成本。项目成果较好地完成了项目设立的目标,在实践中具有一定的可行性和推广性。



校内导师签名: _____

2024 年 06 月 16 日

企业导师意见：

本项目针对汽车涂装车间实际生产过程中出现的 PVC 胶条不居中的问题，提出了一种 PVC 胶条居中度的自动化检测方法。

项目组成员将 PVC 胶条居中度检测步骤分为高光区域去除、胶条区域识别、车缝特征提取和胶条偏移量计算。去高光算法基于 HSV 色彩空间比较原图和修改后的无高光图片的差异识别高光区域，轮廓面积较小的为需要去除的高光区域。与车身颜色差距大的白色胶条采用灰度阈值二值化的方法，与车身颜色差距小的黑色胶条采用结构相似性指标（SSIM）识别算法。车缝区域经过高光去除、滤波去噪后，sobel 算子处理图片提取车缝特征。采用细化与去毛刺算法得到胶条与车缝的骨架曲线。B 样条方法拟合车缝得到光滑曲线和车缝各点的法线方向，法线方向上车缝与胶条骨架的间距为胶条偏移量。在单目相机方案中，造型复杂的车身面的深度信息可通过深度插值的误差补偿算法减少车身倾斜导致的误差。

本项目选用 Python 与 MATLAB 作为主要编程语言，基于 OpenCV 完成了算法编写。对不同车型、不同颜色的胶条、不同的车身位置应用该算法，胶条识别、车缝提取与胶条偏移量计算均获得了良好的结果。毫米级的检测精度和较低的硬件成本满足企业实际生产的需求。该机器视觉自动化检测方法能够提高 PVC 喷涂质量，降低返工成本。项目成果较好地完成了项目设立的目标，在实践中具有一定的可行性和推广性。

企业导师签名：

王子平

2024 年 06 月 17 日