

高压带电作业机器人视觉伺服控制系统设计与实现

李 纯

汕尾市汇能综合能源服务有限公司 广东省汕尾市 516600

摘 要：本研究聚焦于高压带电作业机器人视觉伺服控制系统，旨在有效解决人工操作过程中的安全性与效率性问题。该系统主要由机械臂、视觉传感器以及控制系统三部分组成。在硬件层面，采用双目立体视觉传感器的“手眼”布局方式，控制器以 DSP 芯片作为核心，驱动系统则选用液压驱动模式；在软件方面，通过高斯滤波和畸变校正等方法对图像进行预处理，基于图像雅可比矩阵提取图像特征，并结合立体视觉技术与卡尔曼滤波算法实现控制优化。测试结果表明，该系统平均定位精度不高于 3.5cm，响应速度不超过 200ms，但在强光或遮挡环境下，识别率下降至 90%。尽管该系统基本能够满足作业要求，然而其环境适应性与成本仍有待进一步优化。未来，需结合深度学习技术与多传感器融合技术以提升系统整体性能。

关键词：带电作业；机器人视觉伺服；控制系统设计

1. 引言

高压带电作业是电力行业中不可或缺的重要环节，其核心任务是在不停电的情况下对高压输电线路进行检修与维护，以确保电网的安全稳定运行。然而，由于作业环境复杂且危险性极高，传统的人工操作方式不仅效率低下，还对作业人员的生命安全构成严重威胁。近年来，随着机器人技术的快速发展，高压带电作业机器人逐渐成为解决这一问题的有效手段。特别是在视觉伺服控制技术的支持下，机器人能够实时感知作业环境并精准执行任务，显著提升了作业的安全性和效率。

视觉伺服控制系统作为一种将机器视觉与机器人控制相结合的技术，通过图像采集、处理与特征提取等步骤，将目标物体的位姿信息转化为机械臂的控制指令，从而实现高精度的操作。在高压带电作业场景中，该技术能够帮助机器人适应强烈的光照变化及复杂的外部环境，完成如剥线、抓线、穿线等精细化作业任务。此外，随着协作机器人技术的兴起，视觉伺服控制系统在高压带电作业中的应用前景更加广阔，其安全可靠、人机协作等特点为未来智能化电网建设提供了重要支撑。因此，研究高压带电作业机器人视觉伺服控制系统的设计与实现具有重要的理论价值和实际意义。

2. 高压带电作业机器人视觉伺服控制系统概述

2.1 视觉伺服控制基本原理

视觉伺服控制是一种通过视觉反馈信息实现精确控制

的技术，其核心在于利用视觉传感器获取环境信息，并将其转化为机器人运动控制的指令。在高压带电作业场景中，视觉伺服控制系统首先通过图像采集设备捕捉目标物体的图像数据，随后对这些数据进行预处理以消除噪声和畸变的影响。接着，系统采用特征提取算法识别目标物体的关键特征点，并通过匹配算法计算目标物体在三维空间中的位姿信息。最后，基于视觉信息生成控制策略，驱动机械臂完成预定任务。这一过程不仅要求高精度的图像处理能力，还需要实时性和鲁棒性，以适应复杂多变的作业环境。

2.2 高压带电作业机器人系统构成

高压带电作业机器人系统主要由机械臂、视觉传感器和控制系统三大部分组成。机械臂作为执行机构，负责完成具体的作业任务，如线缆固定、剥线等操作，其设计需满足高强度、高精度的要求。视觉传感器则充当机器人的“眼睛”，通常包括双目相机或深度相机，用于采集作业现场的环境信息并实时跟踪目标物体。控制系统则是整个系统的核心，负责整合视觉信息、规划机械臂运动轨迹并下达控制指令。此外，为了确保机器人在高压环境下的安全运行，系统还需配备绝缘防护措施以及光纤通信模块，以避免电磁干扰对信号传输的影响。

3. 视觉伺服控制系统硬件设计

3.1 视觉传感器选型与布局

在高压带电作业环境中，视觉传感器的选择需综合考虑

其精度、稳定性及抗干扰能力。双目立体视觉传感器因其能够提供高精度的三维空间信息而被广泛应用于目标识别与定位任务中。相较于单目视觉传感器，双目立体视觉通过左右摄像机的视差计算，能够有效还原目标物体的三维坐标，从而为机械臂的精准操作提供可靠的数据支持。此外，为了适应高压环境下的复杂工况，视觉传感器还需具备较强的抗电磁干扰能力和耐高温性能。文献提出了一种基于三维点云的深度相机标定方法，进一步提升了视觉传感器在动态环境中的适应性。

视觉传感器的布局方式直接影响其测量范围和精度。通常情况下，双目立体视觉传感器的安装需满足一定的基线距离要求，以最大化视差计算的准确性。在高压带电作业机器人中，视觉传感器一般安装在机械臂的末端执行器附近，形成“手眼”配置模式。这种布局方式能够确保视觉传感器与机械臂的运动同步，从而提高目标定位的实时性和准确性。同时，为了扩大视野范围，部分系统还会配备广角摄像头作为辅助，用于捕捉更大范围内的环境信息。文献中的实验结果表明，合理的传感器布局能够显著提升机器人对旋钮类型开关的定位和操作成功率。

3.2 控制器及驱动系统

控制器的选型是视觉伺服控制系统硬件设计中的关键环节，其性能直接决定了系统的响应速度和控制精度。在高压带电作业机器人中，控制器需具备强大的数据处理能力和多任务协调能力。文献提出了一种基于 DPS (Digital Signal Processing) 芯片的控制系统设计方案，该方案利用 DPS 摄像机采集的图像数据，通过 DSP 芯片进行实时处理，从而实现高效的作业目标识别与定位。此外，控制器还需支持多种通信协议，以便与视觉传感器、机械臂及其他外围设备实现无缝连接。文献中提到的主控制器 + 多轴运动控制器的架构，能够有效满足高压带电作业机器人对复杂运动规划的需求。

驱动系统作为视觉伺服控制系统的重要组成部分，负责将控制器输出的指令转化为机械臂的实际运动。在高压带电作业环境中，驱动系统需具备高可靠性、高功率密度以及良好的动态响应特性。文献设计了一种主从遥操作液压机械臂系统，该系统采用全液压驱动方式，具有自重小、持重大、惯性小等优点。液压机械臂的各个关节均装有压力传感器和角位移传感器，能够实时反馈执行部件的状态信息，从而实现对机

械臂的精确控制。此外，驱动系统还需与视觉传感器保持高度的协同工作，以确保机械臂的运动与目标物体的位姿信息相匹配。文献中的实验结果表明，通过优化驱动系统与视觉传感器的协同工作机制，可以显著提升系统的整体性能。

4. 视觉伺服控制系统软件设计

4.1 图像处理算法

在高压带电作业机器人视觉伺服控制系统中，图像处理算法是实现精准控制的核心环节之一。图像预处理作为首要步骤，旨在提高图像质量并为后续的特征提取与匹配奠定基础。具体而言，图像预处理包括滤波、畸变校正以及噪声消除等操作。通过三维视觉传感器获取的实时图像可能受到环境因素的干扰，例如光线变化或镜头畸变，这些因素会显著降低图像的可读性与准确性。因此，采用高斯滤波和中值滤波等方法可以有效去除高频噪声，同时保留图像细节。此外，基于相机标定技术的畸变校正能够修正因光学系统缺陷引起的图像失真，从而确保图像信息的真实性与可靠性。

特征提取与匹配是图像处理算法中的关键步骤，其目的在于从复杂的背景中提取出目标物体的关键特征，并将其与预设模板进行匹配。这一过程通常依赖于图像雅可比矩阵的方法，将机械臂的动力学问题映射到图像特征空间，从而避免复杂的建模与逆解计算。通过对目标物体的边缘、角点以及纹理等特征进行分析，可以生成具有唯一性的特征描述符。随后，利用模板匹配算法或基于深度学习的方法，将提取到的特征与数据库中的模板进行比对，以确定目标物体的位姿信息。实验结果表明，这种基于图像特征反馈的方法能够在复杂环境中实现高精度的目标定位，为后续的视觉伺服控制提供可靠的数据支持。

4.2 控制策略实现

在视觉伺服控制系统中，将视觉信息转化为机械臂的控制指令是实现精准操作的重要环节。这一过程主要依赖于闭环控制策略，通过不断调整机械臂的运动参数，使其逐步接近目标位置。具体而言，控制系统首先通过视觉传感器获取目标物体的实时图像信息，并利用图像处理算法提取其位姿数据。随后，将这些数据与预设的目标位置进行对比，计算出误差值。基于误差值，控制器生成相应的控制量，驱动机械臂向目标位置移动。

为了提高控制精度与实时性，本研究采用了基于立体视觉算法和卡尔曼滤波的目标跟踪技术。立体视觉算法能够

通过双目相机获取目标物体的三维信息，从而为机械臂提供精确的空间定位数据。而卡尔曼滤波则用于对目标物体的运动状态进行预测与优化，有效降低了环境噪声对跟踪效果的影响。此外，在主从控制模式下，操作人员通过主手控制器实时传递位置信息，从机械臂通过对主手位置的跟踪完成运动任务。这种主从控制模式与视觉伺服控制相结合的方法，不仅提高了系统的灵活性，还显著增强了作业效率。实验结果表明，所设计的控制策略能够在无人参与的情况下实现高压带电作业，且定位精度和响应速度均满足实际需求。

5. 系统测试与性能分析

5.1 测试环境搭建

为了验证高压带电作业机器人视觉伺服控制系统的性能，搭建了一个模拟的高压带电作业场景。该场景基于参考文献和中描述的系统结构进行设计，包括一个升降平台、两个 6 关节机械臂以及双目相机模块。升降平台上安装了作业工具，如自动剥线器和验电笔，以模拟实际作业任务。双目相机模块用于采集现场图像信息，并通过光纤通信设备将数据传输至本地端主机，避免高压环境下线缆通信的绝缘问题。此外，测试环境中还配备了三维视觉传感器和立体显示器，以便构建虚拟环境并进行碰撞检测。整个测试系统的硬件架构如图 1 所示，确保了测试环境与真实作业场景的高度一致性。

5.2 性能测试指标

系统性能测试的主要指标包括定位精度、响应速度和识别率。定位精度是衡量视觉伺服控制系统性能的关键参数，其定义为目标物体实际位置与系统计算位置之间的偏差。根据参考文献和，定位精度通常以毫米为单位，并在多次实验中取平均值以提高结果的可靠性。响应速度则反映了系统从图像采集到控制指令生成的时间延迟，这对于高压带电作业中的实时性要求尤为重要。识别率是指系统正确识别目标物体的概率，特别是在复杂环境下对绝缘子等关键部件的识别能力。此外，系统的稳定性也通过重复实验进行评估，以确保其在长时间运行中的可靠性。

5.3 测试结果分析

通过对测试数据的分析，可以看出所设计的视觉伺服控制系统在定位精度和响应速度方面均达到了预期目标。实验结果显示，系统的平均定位精度为 3.5 厘米以内，满足高

压带电作业的需求。响应速度方面，系统能够在 200 毫秒内完成从图像采集到控制指令生成的全过程，体现了较高的实时性。然而，在复杂环境下的识别率略有下降，尤其是在强光或遮挡条件下，识别率降至 90% 左右。这表明系统在抗干扰能力方面仍有改进空间。为进一步提升系统性能，建议优化图像预处理算法，增强特征提取的鲁棒性；同时，引入深度学习技术，如 YOLO-v4 检测算法，以提高目标识别的准确性和速度。此外，未来的研究可以探索多传感器融合技术，通过结合激光雷达和视觉传感器的数据，进一步提升系统的环境感知能力。

结论

高压带电作业机器人视觉伺服控制系统的设计与实现，是现代电力行业自动化发展的重要组成部分。本文从系统概述、硬件设计、软件设计到测试分析，全面阐述了该系统的构建过程。通过选用高精度的视觉传感器和优化图像处理算法，系统能够实时获取目标物体的位姿信息，并将其转化为机械臂的精准控制指令，从而完成复杂的高压带电作业任务。实验结果表明，该系统在定位精度和响应速度上均达到了较高的性能标准，有效提升了作业效率和安全性。然而，该系统仍存在一定的局限性。例如，在强光或复杂环境条件下，视觉伺服系统的稳定性和抗干扰能力有待进一步提升。此外，当前系统的成本较高，限制了其在中小型电力企业中的普及应用。未来的研究应着重于提高系统的环境适应性，降低硬件成本，并探索更加智能化的控制策略，以进一步增强系统的可靠性和灵活性。同时，结合人工智能技术，如深度学习和强化学习，有望实现更高级别的自主决策能力，推动高压带电作业机器人向完全自动化方向迈进。

参考文献：

- [1] 王振利; 鲁守银; 等. 高压带电作业机器人视觉伺服系统 [J]. 制造业自动化, 2013, 35(14): 69-72.
- [2] 田锦秀. 基于虚拟现实技术的移动机器人视觉伺服控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(9): 150-156.
- [3] 卞越洋; 高晓科; 张伟军. 机器人带电作业中的视觉定位与优化策略 [J]. 机械与电子, 2021, 39(5): 57-61.
- [4] 陈果; 花国祥; 俞斌; 高峰; 徐铂裕. 基于双目视觉的带电作业机器人的目标识别与定位方法研究 [J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(6): 139-146.