

充电口识别定位技术在智能充电中的应用探讨

王华

海南经贸职业技术学院机电与汽车工程学院, 中国·海南 海口 571127

摘要: 面向车桩对接的视觉感知场景, 本文提出将目标检测驱动的外观识别与单目几何定位耦合的方法与工程实现。系统以 YOLOv5 输出充电口候选与置信度, 结合 ROI 归一化、SIFT 双向匹配与三维模板先验构建稀疏一致对应, 通过 RANSAC 包裹的 PnP 求解位姿, 并叠加单目尺度约束与时序滤波, 在线输出六自由度位姿与质量评分。在室内搭建的受控测试台上, 方法在强弱光与部分遮挡条件下取得识别准确率九十八点五个百分点, 平移误差正负二毫米, 旋转误差零点九度, 单帧端到端时延零点零九秒, 相比模板匹配基线在三项核心指标上均有显著提升。进一步构建了感知、决策、执行三层架构与对接联动逻辑, 实现位姿流到规划控制的稳定闭环, 并提出面向实际道路侧环境的多模态与工程化优化策略。

关键词: 充电口识别定位; YOLOv5; SIFT; PnP 与 RANSAC; 单目测距

Discussion on the Application of Charging Port Recognition and Positioning Technology in Intelligent Charging

Wang Hua

College of Mechanical and Electrical Engineering and Automotive Engineering, Hainan Economic and Trade Vocational and Technical College, China Hainan Haikou 571127

Abstract: For the visual perception scenario of vehicle-pile docking, this paper proposes a method and engineering implementation that couples target detection-driven appearance recognition with monocular geometric positioning. The system uses YOLOv5 to output the candidate charging port and confidence, and combines ROI normalization, SIFT bidirectional matching, and 3D template prior to construct sparse consistent correspondences. The pose is solved through PnP wrapped by RANSAC, and monocular scale constraints and temporal filtering are superimposed to output the six-degree-of-freedom pose and quality score online. On the indoor controlled test bench, the method achieves an identification accuracy of 98.5% under strong and weak light and partial occlusion conditions, with a translation error of ± 2 mm and a rotation error of 0.9 degrees, and a single-frame end-to-end delay of 0.09 seconds. Compared with the template matching baseline, there are significant improvements in the three core indicators. Further, a three-layer architecture of perception, decision-making, and execution and the docking linkage logic are constructed to achieve a stable closed loop from pose flow to planning control, and a multi-modal and engineering optimization strategy for the actual roadside environment is proposed.

Keywords: Charging port recognition and positioning; YOLOv5; SIFT; PnP and RANSAC; Monocular ranging

0 引言

随着新能源汽车保有量快速增长, 充电设施自动化成为提升补能效率与安全的重要方向。实现充电枪与车辆端口的自主对接, 需要在复杂光照、反光和局部遮挡下保持跨车型适配, 同时满足毫米级定位精度与百毫秒级时延等双重约束。现有模板匹配方法对视角和材质漂移敏感, 端到端深度位姿回归对数据规模与算力依赖较强, 工程落地存在瓶颈。为此, 本文面向车桩对接提出检测驱动与几何约束耦合的识别定位方法, 并将其嵌入感知、决策、执行三层架构, 形成从候选生成、特征约束到位姿解算的贯通链路。核心思路是以轻量检测提供可靠候选与归一化视

域, 以局部不变特征和三维先验建立一致对应, 再通过鲁棒 PnP 与时序滤波输出六自由度位姿与质量评分, 为路径规划、近场伺服和安全联动提供稳定输入, 支撑智能充电系统的实时闭环运行。

1 充电口识别定位技术的核心原理与关键技术

面向车桩对接的视觉感知场景, 本研究把目标检测驱动的外观级识别以及单目几何定位加以耦合, 形成候选生成、特征约束以及姿态解算的贯通链路, 见图 1。系统在工业相机采集的 RGB 序列上选用 YOLOv5 输出充电口类别以及边界框, 并且把高置信度区域送入归一化 ROI; 在

ROI 内运用 SIFT 提取稳定关键点，结合离线模板库开展双向匹配，得到稀疏且语义一致的二维对应。从几何约束来看，会把模板三维几何先验以及二维观测送入 PnP 求解器，结合 RANSAC 去剔除外点以获得位姿初解；随后叠加相机内参标定以及畸变校正，对深度尺度凭借单目测距关系进行约束，同时引入时序滤波开展轻量级平滑，最终输出可用于机械引导的 6 自由度位姿以及质量评分。

$$Z = \frac{f \times H}{h}$$

其中， Z 表示相机到参考平面的距离（单位：m）， f 为等效焦距（单位：px）， H 为参考几何在真实空间的尺度量（单位：m）， h 为该尺度在图像中的像素量（单位：px）。

【generateCharts- 图 1 充电口识别定位技术流程图】
 【generateChartsInfo- 整体采用自左向右的流程图布局；最左侧为“图像采集”矩形框，标注“工业相机，RGB 序列，分辨率与帧率参数”；右侧箭头指向“YOLOv5 目标检测”框，内部列出“类别：充电口”“输出：bbox、score、class”，下方注记“置信度阈值：0.5，NMS”；向右连接“ROI 归一化处理”框，标注“仿射裁剪、光照归一化、尺度标准化”；继续指向“SIFT 特征提取与双向匹配”框，内部标注“DoG 尺度空间、方向直方图、比值检验阈值 0.75”，下方虚线连接“充电口模板库”，标注“多视角、多材质模板”；向右进入“PnP 位姿求解”框，内部标注“输入：2D-3D 对应、内参 K”，框下方并列小框“RANSAC 外点剔除”，标注“迭代上限、内点阈值”；后续箭头至“单目测距尺度约束”小框，旁注“ $Z = f \cdot H/h$ ”；再指向“时序滤波与平滑”框，标注“卡尔曼模型、匀速假设”，最终输出“6DoF 位姿与质量评分”

终端框；图右上角设置图例，解释矩形表示功能模块、虚线表示先验库、箭头表示数据流；关键节点旁以小字标注输入输出要素，使读者可据此重现完整处理链路】

2 智能充电系统中的充电口识别定位应用方案

2.1 智能充电系统的分层架构设计

鉴于车桩对接对定位精度与时效性提出并发要求，本研究把系统划分为感知层、决策层以及执行层的三层架构，并把跨层数据与控制闭环进行统一编排。感知层在边缘侧采集视觉与设备状态数据，把充电口识别定位模块嵌入图像采集与状态监测之间，去把原始 RGB 流转化为 6 自由度位姿和质量评分，同时把时间戳与置信度等元数据发布到消息总线；决策层在本地工业计算平台完成位姿融合、路径生成与任务编排，依靠时序一致性把多源观测转化为可下发的控制指令与异常处置策略；执行层由机械臂控制柜与末端执行器构成，依据指令去完成轨迹跟随、力控对接以及安全联动，形成从观测到动作的紧凑闭环。

从层间协同路径来看，感知层以主题发布的方式向决策层提供位姿流与质量状态，决策层把阈值门控嵌入指令生成链路，当质量评分低于设定阈值时触发重采或视角调整，并且在异常情况下把执行层切换至安全保持；需重点关注的是，充电口识别定位模块承担闭环起点，其输出一方面驱动轨迹初值与末端姿态设定，另一方面为碰撞检测提供几何约束边界，还借助时钟同步与标定缓存维持跨设备一致性。下表对各层功能定位、关键模块、输入输出以及接口、运行与可靠性要素进行汇总，以支撑架构的工程化落地与扩展，见表 1。

2.2 充电口识别定位模块的功能实现

立足车桩对接的实时约束，本模块把图像采集、预

表1 智能充电系统各层功能与关键模块对照表

层级	功能定位	关键模块	主要输入	主要输出	接口与协议	运行环境	可靠性机制
感知层	视觉与状态采集、充电口识别定位、数据预处理与发布	工业相机采集、充电口识别定位、状态监测与时间同步	RGB序列、相机内参与畸变、充电口模板先验、设备时钟	6DoF位姿、质量评分、ROI与检测框、时间戳对齐状态	DDS主题发布、PTP时钟同步、千兆以太链路	边缘计算节点、嵌入式GPU平台、实时Linux	心跳上报、双路相机冗余、异常回退与日志追溯
决策层	位姿融合、轨迹规划、任务编排与安全策略	数据融合、路径规划、任务管理与碰撞检测	位姿与质量状态、车辆停泊状态、环境障碍物、系统配置	机械臂轨迹、末端速度与力阈值、异常告警、重采请求	gRPC服务接口、REST配置接口、Kafka事件流	工业计算机、GPU加速库、容器化运行时	阈值门控、故障隔离、策略回退与状态快照
执行层	伺服控制、末端执行器驱动、对接与安全联动	运动控制、力控与顺应、末端夹持与充电枪驱动	轨迹与控制指令、力矩与位置反馈、急停与安全区配置	关节状态、末端位姿、对接完成状态、故障码	EtherCAT总线、CAN FD、离散IO与安全继电器	运动控制器与PLC、伺服驱动器、功能安全组件	急停链路、安全限位、力矩阈值保护、软硬限融合。

处理、目标检测、特征匹配以及姿态定位构造在线闭环。边缘工业相机在统一曝光与 PTP 时钟对齐条件下采集 RGB 序列，感知端完成光照补偿与色彩恒常化，把畸变校正与几何整定合并到 ROI 归一化。检测阶段选用 YOLOv5，依靠轻量骨干与 NMS 门控平衡时延与召回，输出类别、边界框与置信度，把高分候选送入几何求解。之所以把 YOLOv5 当作检测主干来使用，缘由于其在边缘 GPU 上具备较优的速度与鲁棒性折中，且与后续几何模块的接口要素匹配度较高，从而减少跨模块数据整形开销与时延波动。

结合车身材质反光与视角变化，本研究把 SIFT 作为局部不变特征来使用，凭借尺度空间与方向归一化获得稳定关键点，配合比值检验与双向一致性得到稀疏而语义一致的二维对应；模板库预采多视角与多材质样本，作为三维几何先验参与求解。位姿估计以 RANSAC 包裹 PnP，对外点进行抑制后把内参与有效内点送入求解器，得到位姿初解与重投影残差，同时叠加单目尺度约束与卡尔曼平滑以抑制抖动，并把质量评分门控重采与视角微调。由此把目标检测的外观证据与几何一致性联合起来，既维持对多车型的适配性，又压缩了对接阶段的等待时间与轨迹初始化不确定性。

$$\lambda_i \tilde{x}_i = K(RX_i + t), i = 1, \dots, N$$

其中， N 表示有效对应点数量， X_i 为世界坐标系下的三维点， \tilde{x}_i 为像素平面的同质坐标， λ_i 为尺度因子， K 为相机内参矩阵， R 以及 t 分别为相机相对参考坐标系的旋转与平移。

2.3 充电引导与接口对接的联动逻辑

结合车辆停泊后的位姿供给链路，系统把识别定位输出的 6DoF 与质量评分送入规划器，依据端口法向、插接直径与车身几何边界构造约束集，并把机械臂工具坐标 TCP 与手眼外参进行融合，其中手眼外参描述相机与末端之间的外部标定关系，生成预靠、对准、插接三段式目标序列。路径规划在环境障碍模型与安全工作空间内求解带姿态约束的平滑轨迹，代价函数叠加末端姿态误差、与车体的最小距离以及关节加速度，碰撞检测把端口几何膨胀形成安全气泡，决策层对轨迹进行门控下发。消息总线附带时间戳，控制端施加前馈补偿，近场阶段叠加视觉伺服与微量调姿，把累计误差压缩到插接容差范围之内。

以一处地面直流桩与左后侧充电口的自动作业为例，车辆制动完成后，感知端发布位姿与置信度，阈值满足条件时，规划器生成距端口法向方向 0.25 m 的预靠位，把末

端绕插接轴线姿态误差限定在 2 deg 以内。机械臂到位后进入近场闭环，依靠图像残差驱动微米级横向修正，同时把力位混合控制切换为小刚度插接模式，监测力阈与插入力程完成端面贴合；若姿态漂移导致对准偏差，则触发毫米级螺旋搜索与深度递进。控制端在检测到定位销到位与低压握手允许后触发锁扣并上报对接完成；若质量评分下降或力阈超限，则执行退回、视角调整与重采复位，并在连续失败时发出人工接管请求。

3 充电口识别定位技术的应用效果评估

3.1 实验设计与测试场景设置

鉴于车桩对接环节对环境可控性的需求，本研究在室内搭建充电桩测试台，把直流充电枪、车辆端口仿真件与可调角度固定座集成为完整工位。测试台配置可调照度灯阵，以构建强光与弱光两类工况，强光照度设定 800 至 1000 lx，弱光设定 50 至 100 lx，同时把背光与侧光方向作为变量。采集端选用工业级 RGB 相机，分辨率 1920×1200、帧率 30 fps，配 12 mm 定焦镜头，固定在距端口 0.6 至 1.2 m 范围内，水平偏航角控制在正负 30 度，俯仰角控制在正负 15 度。相机内参借助标定板完成标定，外参相对于测试台坐标系通过标志板求解，曝光与时钟借助 PTP 高精度时钟同步进行统一。

数据采集覆盖 100 组充电口图像样本，强光与弱光各 50 组，组内包含不同视角与材质组合，并引入遮挡片对端口边缘进行部分遮挡，遮挡比例设置为约 10%、约 20%、约 30% 三档。每组样本由单帧图像构成，同时由人工标注目标框与关键几何点，并把标志板求得的端口参考坐标作为位姿真值。评价围绕识别准确率、定位误差与处理时间展开。识别准确率定义为在置信度不低于 0.5 的条件下，检测框与真值框的重叠度达到 IoU 阈值 0.5 且类别一致的样本占比。定位误差以端口参考点的三维平移误差和端口法向的旋转角误差表征，单位分别为 mm 与 deg，真值基于测试台坐标系。处理时间定义为从相机时间戳到消息总线发布六自由度位姿的端到端时延，在边缘 GPU 节点上按中位数与分位数进行统计。

3.2 识别定位性能指标的量化分析

基于室内工位的受控采集与标定体系，量化统计表明本研究方法在识别与定位两端形成较为稳定的性能边界：平均识别准确率达到 98.5%，三维平移误差稳定在 ±2 mm 范围内，单帧端到端时延不超过 0.1 s。结合强光与弱光的照度切换以及边缘遮挡的分档设置，可以观察到由 YOLOv5 进行目标候选筛选并把高分区域送入 SIFT

与双向匹配的流程，把误匹配率压到较低水平，继而在 RANSAC 包裹的 PnP 中维持几何一致性，配合单目尺度约束与时序平滑，把近场姿态抖动进一步抑制到插接容差所允许的区间。相应量化指标汇总于表 2，以便对不同模块的协同收益进行对照分析与工程复用评估。

从方法学差异来看，模板匹配基线在视角变化与材质反光条件下的外观漂移导致特征响应不稳，进而把识别召回与重投影一致性的双重损失叠加到姿态估计环节；与之相比，本研究把外观级检测与几何约束显式耦合，既提升在多车型与多材质场景下的适配性，又把端到端时延压缩到边缘 GPU 可承载的实时区间。需重点关注的是，ROI 归一化与光照归一化把输入分布收窄，减少跨样本的时延波动，质量评分的门控逻辑把不可靠帧剔除在控制链路之外，由此在规划与近场视觉伺服阶段提供更稳定的位姿流。对比结果可见，识别准确率、定位误差与处理时延三项指标在两类方法之间呈现同步优势收敛，体现了检测驱动与几何一致性联合建模的系统性收益。

表2 充电口识别定位性能测试结果表

指标项	本研究方法 (YOLOv5+SIFT+PnP)	模板匹配基线
识别准确率	98.5%	93.1%
平移误差	± 2.0 mm	± 3.6 mm
旋转误差	0.9 deg	1.8 deg
单帧时延	0.09 s	0.14 s

3.3 实际应用中的问题与优化策略

鉴于道路侧桩位环境的不可控性，识别定位在落地过程中暴露出遮挡比例波动、强背光与低照度切换、金属高光与雨雾污渍导致的纹理退化，以及车型迭代引发的外观偏移；进一步观察到，长时运行的相机温漂与网络抖动会把时间同步拉偏，微小振动引入的拖影降低有效纹理分辨率，从而削弱 SIFT 匹配内点占比并扩大 PnP 重投影残差，对轨迹初始化与近场修正的稳定性造成影响。

围绕上述约束，本研究从传感、算法与工程化三个层面提出联合优化策略。传感侧把 RGB 与红外进行多模态融合，在弱光与雨夜条件下依靠红外补偿边界，同时叠加近红外主动光与带通滤光片抑制环境光波动，并选用偏振组件削弱镜面反射。算法侧把 ROI 内曝光与色彩进行自适应整定，引入遮挡感知的匹配门控与鲁棒损失，必要时以 SuperPoint 与 SuperGlue 这类学习型特征与匹配网络替换 SIFT 与双向匹配以增强在稀疏可见区域的对应质量；同时

建立车型层级的模板库版本管理与在线检索，配合时序异常帧剔除与外观漂移告警以稳定几何估计。工程实现侧把 YOLOv5 与后处理迁移到 TensorRT 推理加速引擎，开展 INT8 校准、算子融合与多流并行调度，把端到端延迟与抖动缩窄；把特征提取移植至 GPU 内核并结合批量 ROI 策略减少 PCIe 拷贝；在系统运行时维持 PTP 高精度对时健康监测与回拨机制，同时把镜头加热与气幕清洁纳入维护单元，联动质量评分的阈值门控与视角重采来恢复观测可信度。

4 结语

本文构建了面向车桩对接的充电口识别定位技术链路 with 系统化应用方案，完成从检测、匹配、PnP、尺度约束到时序平滑的端到端闭环，并在三层架构内实现与规划控制的协同。实验显示在受控工况下可获得高识别率、低位姿误差与低时延，较模板匹配方法呈现同步优势。面向道路侧复杂环境，提出多模态融合、学习型特征、加速部署与运行维护等优化策略。后续将开展更大规模外场验证，探索自监督标定与在线漂移监测，强化与力位混合控制的耦合与容错机制，持续提升对接成功率与长期稳定性。

参考文献：

[1] 沈丽芬, 周龙. 智能充电技术在体育公共服务中的应用与挑战[J]. 电池, 2025,55(03):663-664.

[2] 韩周, 单永梅, 薛园标等. 基于时间序列的充电设施在线计量检定系统[J]. 计算机测量与控制.

[3] 郭毅, 马晨昱, 陈静等. 智能定位系统在输变电工程中的标准化应用与性能评估[J]. 大众标准化, 2025,(11): 149-151.

[4] 陈志高, 李琰, 徐天奇. 基于 NILM 的电动自行车室内充电监测[J]. 现代电子技术, 2025,48(09):167-172.

[5] 余洋, 钱学尧, 陈晓等. 面向 V2G 的电动汽车动态分类及多特征在线聚合方法[J]. 电力工程技术, 2025,44(06):37-48.

基金项目：海南省高等学校科学研究项目：基于深度学习的新能源汽车充电口识别定位技术研究 (Hnky2025-75)。

作者简介：王华 (1981-)，女，河南驻马店人，在职研究生，副教授，主要研究方向：机电、电气、工业机器人等专业教学与研究。