

面向电动公交车的充电机器人感知与控制

李少雄¹,张黎明¹,曹筱欧¹,郝爽²,徐志宏¹

(1. 国网天津市电力公司 滨海供电分公司,天津 300450; 2. 国网天津市电力公司 城东供电分公司,天津 300010)

摘要:为实现机器人插接充电枪为电动公交车充电,研究充电机器人感知与控制系统。机器人通过激光测距仪和眼在手上的单目视觉感知充电孔位置,并采用可编程控制器(PLC)和工业控制计算机(IPC)协同控制。先示教确定标准拍摄位置、拍摄距离及充电孔的标准位置,再检测充电孔正负极边缘并创建匹配模板,应用形状匹配与机器人配合进行手眼标定。PLC采用状态转移法设计控制程序,通过IO输出机器人动作条件,IPC通过OPC通信读写PLC状态,通过TCP发送动作坐标到机器人控制器。实验和应用结果表明,定位误差 $<0.5\text{ mm}$,准确性和可靠性满足应用要求。

关键词:充电机器人;充电孔感知;形状匹配;手眼标定;机器人控制

中图分类号:TP242.3; TH69 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)06-0190-05

Perception and Control of Charging Robot for Electric Bus

LI Shaoxiong¹, ZHANG Liming¹, CAO Xiaou¹, HAO Shuang², XU Zhihong¹

(1. Binhai Electric Power Branch Office of State Grid Tianjin Company, Tianjin 300450, China;

2. Chengdong Electric Power Branch Office of State Grid Tianjin Company, Tianjin 300010, China)

Abstract: In order to realize robot gun plug-in charging for electric bus, perception and control method for charging robot are studied. The robot perceives the position of charging hole through the laser rangefinder and the eye-in-hand monocular vision. The robot is controlled by PLC and IPC cooperatively. The standard snapping position, snapping distance and the standard position of charging hole are determined by teaching, and edges of the charging hole positive and negative electrode are detected and the matching template is created. The hand-eye calibration is carried out by using shape matching and cooperating with robot. PLC uses state transfer method to design control program, robot action conditions are output through IO. IPC reads and writes PLC status through OPC communication, and sends action coordinates to the robot controller through TCP. The experimental and application results show that the positioning error is less than 0.5 mm , whose accuracy and reliability can meet the requirements of application.

Keywords: charging robot; charging hole perception; shape matching; hand-eye calibration; robot control

0 引言

充电是电动公交车运营过程中的重要辅助工作,人工操作劳动强度大、成本高,这促使充电作业向机械化和自动化发展。近年来,机器人已广泛应用于汽车行业,充电机器人研究成为国内外机器人领域的热点之一。采用机器人代替人工自动插接充电枪是电动公交车运营的未来趋势^[1]。机器人在电动公交车停车位置不可能重复的情况下代替人工操作,必须能自主感知充电孔的位置,同时具有灵活、可靠的控制系统。

目前,已有学者将智能制造领域的技术应用于充电机器人感知与控制。姚安庆采用双目视觉感知定位充电孔,实验研究表明只在特定场景下具有可行性^[2]。段峥祺研究了一种基于特征点匹配的充电接口感知定位算法,即通过控制三维运动装置使得采集图像与标准图像完全匹配,

但实际充电枪与充电孔插接时,无法采集充电孔图像,该算法的可行性还需验证^[3]。纪柱只研究了电动汽车充电口识别算法,没有根据充电机器人研究标定方法^[4]。马立焱、王晓安采用超声波感知定位充电孔,需要改造充电孔并设置超声波接收探头,实用性不足^[5-6]。孙成研究的充电孔感知方法需要添加外部特征,再应用单目视觉基于圆特征的位姿测量算法^[7]。张辉等研究了基于曲率滤波和反向P-M扩散的充电孔视觉感知方法,但没有给出手眼标定方法,所得结果不能用于机器人控制^[8]。与充电孔感知方法研究相比,充电机器人控制系统研究不足,仅施莹在研究双目视觉传感器感知充电孔的位置时,设计用于机器人自动插接轨迹规划实验研究的控制电路,尚不具有工程应用价值。

本文针对面向电动公交车的充电机器人,根据其工作过程研究感知与控制系统。

基金项目:国网天津市电力公司科技项目(KJ20-1-33)

第一作者简介:李少雄(1992—),男,山西长治人,工程师,硕士,研究方向为智能用电技术。

1 方案设计

面向电动公交车的充电机器人如图 1 所示。当接收到充电指令后,机器人从充电桩抓取充电枪,运动到电动公交车充电孔正前方,感知充电孔位置后将充电枪插入充电孔,充电桩启动充电。充电完成后,机器人拔出充电枪并送回充电桩。机器人需要配置合适的感知与控制系统才能满足应用要求。在感知方面,双目视觉如果不能同时拍摄到充电孔,则无法确定空间位置,而线激光扫描方法和 3D 视觉系统成本较高,综合考虑可靠性和经济性因素,机器人采用激光测距仪和单目视觉感知充电孔的位置。手动示教表明,对于同型号电动公交车和充电枪,只需感知充电孔在机器人坐标系中 x 、 y 和 z 轴的坐标,定位误差在 0.5 mm 内都能够成功插接充电枪;在控制方面,示教确定充电枪姿态后,机器人根据感知结果通过平移直线运动就可以将充电枪与充电孔插接。此外,在整个动作过程中,机器人还需与其末端的机械手、故障处理等协调控制才具有工程应用价值。

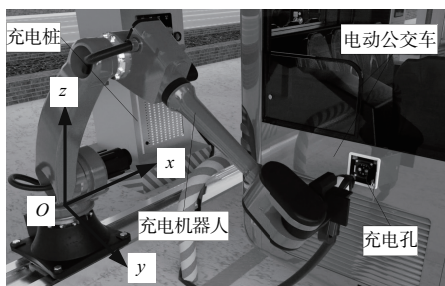


图 1 充电机器人

充电机器人感知与控制系统结构如图 2 所示。系统各部分通过路由器构成控制局域网,触摸屏(HMI)用于供用户操作和查看工作状态,相机和工业控制计算机完成图像采集与处理,可编程控制器读取激光测距仪测量值、控制充电桩和机械手,同时与工业控制计算机协同控制机器人。

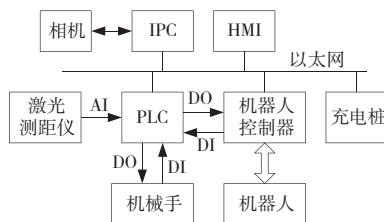


图 2 充电机器人感知与控制系统结构

2 充电机器人感知

充电机器人感知即识别充电孔,再通过手眼标定与激光测距仪、机器人配合确定充电孔在机器人坐标系中的位置。

2.1 充电孔识别

机器人感知充电孔在 O_{yz} 平面坐标的前提是识别和

定位充电孔在采集图像中的位置,本文采用模板匹配实现。充电孔的采集图像如图 3 所示。从图中可以看出充电孔的内部结构复杂,灰度特征不明显,特征显著的是充电孔直流正负极的边缘,采用基于边缘特征的形状匹配算法在可行性、抗噪性和定位精度方面优于灰度匹配。应用形状匹配首先需要创建模板,创建时首先在采集图像中应用交互式感兴趣区域(ROI)定义功能,创建包含直流正负极的矩形 ROI,通过对角坐标确定 ROI 区域的大小,并从采集图像中截取 ROI 图像,再从截取图像中提取直流正负极的边缘。边缘检测的效果决定了充电孔识别的准确性。已有研究表明,Canny 算子在信噪比、检测精度和抗噪声性能方面优于 Roberts、Sobel、Prewitt 等其他边缘检测算子,能够检测出较多、较细的边缘点信息^[9]。本文应用 Canny 算子检测直流正负极的边缘,根据检测的边缘创建用于匹配的模板。创建模板时,图像金字塔级数与匹配速度、匹配成功率相关,金字塔级数值越大匹配速度越快,但匹配成功率较低。可权衡准确性和搜索速度的选择,使匹配算法在两方面均能被充电孔识别应用接受。由于实际电动公交车的充电孔不可能存在明显的旋转角度,模板可能发生旋转的范围就可以设置一个很小的范围,从而提高匹配速度。

感知过程中,从采集图像中通过形状匹配确定充电孔中心的像素坐标,需要选择合适的算法参数才能满足准确性和匹配速度的要求。需要确定的参数有最小匹配分值、金字塔级数、搜索精度控制,其中最小匹配分值越小,匹配时越容易识别,但为了防止充电孔误定位导致充电机器人或充电孔损坏,在保证匹配成功的情况下,应尽量增加最小匹配分值;搜索时金字塔级数一般使用创建模板时的级数,同时使用基于最小二乘法的亚像素精度匹配保证充电孔定位精度;由于实际充电孔旋转角度非常小,可以限定搜索角度范围加快搜索速度。在采集图像中,通过形状匹配定位充电孔中心的实例如图 3 所示。



图 3 形状匹配结果

2.2 手眼标定

识别和定位获得的是充电孔在采集图像中的像素坐标,还必须通过手眼标定建立像素坐标系与机器人坐标系的对应关系。确定充电孔的位置坐标才能用于机器人控制,手眼标定是充电机器人感知的关键^[10]。

手眼标定模型如图 4 所示, $O_R-x_Ry_Rz_R$ 为机器人坐标系, O_F-UV 为像素坐标系, $P(y, z)$ 是机器人坐标系中的点, $Q(u, v)$ 是 P 在相机成像平面的投影点, $P(y, z)$ 和 $Q(u, v)$ 可以通过旋转和平移来转换,表示为

$$\begin{bmatrix} y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} + \mathbf{T} \quad (1)$$

通过3组不在一条直线的 P 、 Q 坐标,即可求解出旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 和平移矩阵 $\mathbf{T}$ 。为了便于用矩阵运算来表示仿射变换,式(1)可写为

$$\begin{bmatrix} y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & t_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 $\mathbf{A}$ 为仿射矩阵。

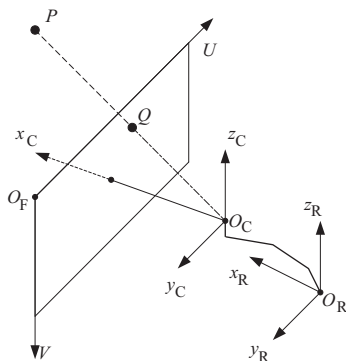


图4 手眼标定模型

标定过程中,通常用具有固定参考点的标定板和标定尖端,分别确定中心点的像素坐标和机器人坐标。但充电孔的位置内嵌于车身装饰盖板上,传统标定方法不具备可操作性,而充电机器人采用手部相机,实际标定时可以固定充电孔,保持相机拍摄姿态和距离不变,通过移动机器人和相机采用模板匹配获得多组不同的 $P(y, z)$ 和 $Q(u, v)$ 。为减小手眼标定误差,实际标定一般采用9组点^[11-12]。控制机器人在 Oyz 平面内按“田”字型运动,移动到“田”字的9个交叉点,记录9个位置点的机器人坐标和匹配得到的模板中心像素坐标,手眼标定流程如图5所示。

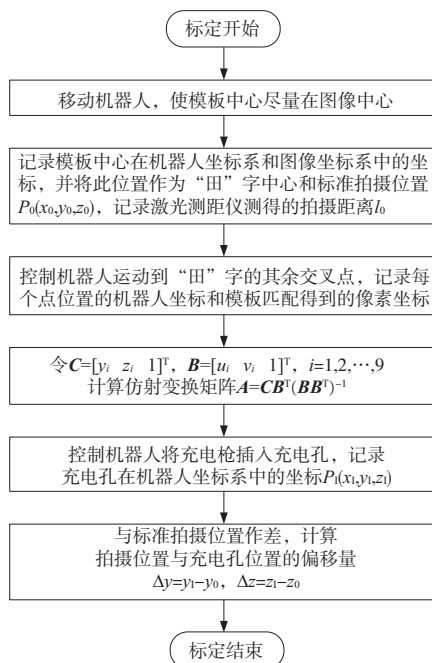


图5 手眼标定流程

2.3 感知步骤

充电机器人将充电枪与充电孔插接前,感知充电孔位置的步骤为:

- 1) 机器人移动到标准拍摄位置 $P_0(x_0, y_0, z_0)$;
- 2) 读取激光测距仪的检测值 l ,并判断检测值是否在量程范围内,如果超出量程,跳转到8) 输出位置感知错误;
- 3) 计算充电孔在机器人坐标系 x 轴相对示教时变化量 $\Delta x = l - l_0$;
- 4) 机器人沿 x 轴方向直线移动到检测拍摄位置 $P'_1(x_1 + \Delta x, y_1, z_1)$;
- 5) 相机采集图像并进行形状匹配,匹配成功,则确定充电孔模板中心的像素坐标 (u, v) ,匹配失败,跳转到8) 输出位置感知错误;
- 6) 根据仿射变换计算充电孔模板中心在机器人坐标系中的坐标 (y, z) ;
- 7) 输出位置感知成功以及充电孔在机器人坐标系中的位置坐标 $P'_1(x_1 + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z)$,感知结束。
- 8) 输出位置感知错误。

3 充电机器人控制

充电机器人运行过程中需要根据感知系统的输出,在线修改插枪动作的目标位置坐标才能将充电枪插入充电孔,和取枪充电、充完收枪机器人动作轨迹不同,在机器人控制器上实现过程控制程序灵活性不足^[13]。PLC和IPC协同控制机器人的方案如图6所示,PLC程序决策动作执行、动作顺序,IPC根据相应动作向机器人控制器发送目标位置坐标,机器人控制器仅执行具体动作。

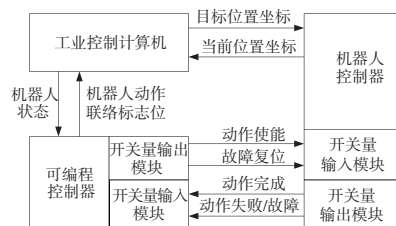


图6 机器人协同控制原理框图

3.1 机器人控制器程序

充电机器人取枪充电、充完收枪动作过程的运动轨迹可分解为一个或多个转出、转入、直线动作,机器人控制器程序只需根据PLC输出的执行条件执行动作指令,流程图如图7所示。轮询动作执行条件,条件使能时机器人执行相应的动作指令,动作完成后,机器人控制器输出完成信号反馈到PLC,PLC复位动作执行条件。

3.2 PLC控制程序

根据实际充电机器人充电作业过程,PLC控制程序分为取枪充电、充完收枪两个部分。PLC程序采用状态转移法设计,根据运动轨迹将动作过程划分为若干状态进行顺

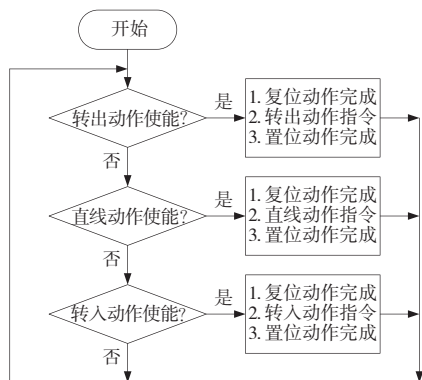


图7 机器人控制器程序流程图

序控制,每一状态对应一个动作,同时 PLC 置位标志位,通知 IPC 向机器人控制器发送当前状态的目标位置坐标,IPC 发送完成后复位标志位。充电作业过程涉及的功能组件都向 PLC 返回执行结果,当 PLC 检测到当前状态的动作完成后,转移到下一个状态,直至过程结束。取枪充电过程如图 8 所示。机器人从充电桩抓取充电枪插入电动公交车的充电孔,包含 20 个状态,图中椭圆形矩形表示机器人动作,除转入/转出动作外,其他动作都是直线运动。PLC 程序互锁输出执行条件保证机器人动作的唯一性;机器人故障、动作轨迹规划失败或急停时,转移到机器人故障状态,发出报警,由人工介入处理;距离检测异常或视觉系统异常、充电桩故障时,程序输出故障提示和报警。

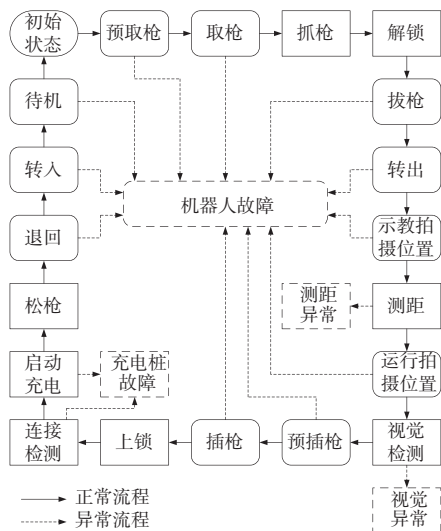


图8 取枪充电过程状态转移图

充完收枪过程如图 9 所示。控制机器人从电动公交车充电孔拔出充电枪送回充电桩,充完收枪过程中的状态名称定义和取枪充电一致的原因是机器人位置坐标相同,而且收枪时抓取充电枪的位置坐标是在取枪充电过程中确定的,区别仅在于具有相反的机械手携枪、无枪状态,这样可以简化 IPC 与机器人控制器的通信程序。此外,在取枪充电过程中发生距离检测异常或视觉系统异常时,自动跳转到充完收枪转入状态,将充电枪送回充电桩。

PLC 程序还包括机械手逻辑控制、激光测距仪模拟量采集及距离计算、通信看门狗等功能,应用位逻辑、比较指

令和定时器等,采用梯形图可以很容易实现。

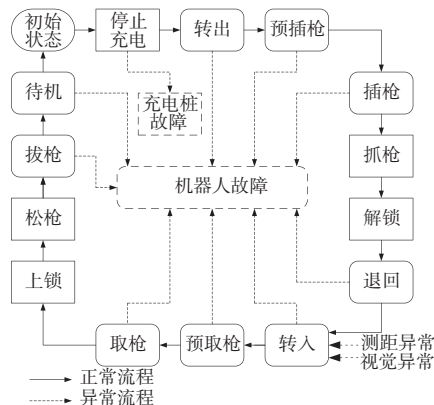


图9 充完收枪过程状态转移图

3.3 IPC 控制程序

IPC 控制程序的功能是根据 PLC 工作过程的动作标志位与机器人控制器通信,发送动作轨迹坐标、充电孔位置坐标和查询机器人工作状态。IPC 需要同时和 PLC、机器人控制器通信,采用具有网络开发工具、支持多种底层网络协议的高级语言设计。

PLC 支持 OPC、TCP、MODBUS-TCP 等多种协议,通过以太网通信,其中 OPC 通信无需设计底层通信程序,具有配置简单、使用方便的优点^[14]。OPC 服务器软件包含 PLC 驱动,通过添加变量和设置 PLC 元件地址就能实现读写 PLC 数据。在 IPC 控制软件中添加 OPC 客户端、创建绑定变量就可以与 PLC 中的数据建立对应关系。IPC 程序中只需建立与 PLC 程序中动作状态标志位对应的共享变量,通过 OPC 服务器读写并同步更新。

机器人控制器提供基于 TCP 以客户端/服务器模式的通信控制方式,IPC 需要向机器人控制器发送状态查询帧和控制命令帧,查询数据包括机器人当前坐标和工作状态,控制命令帧为修改目标位置坐标。

4 实验验证与应用测试

为验证充电机器人感知与控制系统的可行性和有效性,设计了如图 10 所示的实验平台。充电孔安装支架可以在底板上的槽中整体移动,槽的方向与机器人坐标轴方向一致,可以模拟不同的停车位置。

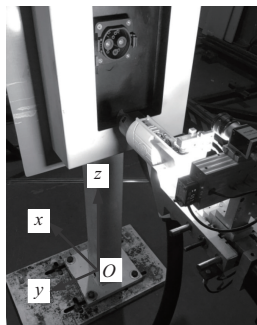


图10 实验平台

手眼标定时,先通过示教机器人得到充电孔的标准位置坐标为 $P_1(338, 1\ 227, 791)$ mm,选择拍摄距离为 400 mm,标准拍摄位置坐标为 $P_0(182, 1\ 240, 650)$ mm,标准拍摄位置与充电孔位置的偏移量 Δy 、 Δz 分别为 -13 mm、141 mm。设置“田”字交叉点间距为 30 mm,手眼标定数据如表 1 所示,计算仿射变换矩阵 A 为

$$A = \begin{bmatrix} -0.176\ 8 & -0.001\ 7 & 1\ 362.12 \\ 0.001\ 2 & -0.176\ 8 & 733.23 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

表 1 拍摄位置手眼标定数据

序号	机器人坐标 (y, z) /mm	像素坐标 (u, v) /像素
1	(1 240.00, 650.00)	(686.27, 474.95)
2	(1 270.00, 650.00)	(516.56, 477.52)
3	(1 270.00, 680.00)	(522.26, 301.78)
4	(1 240.00, 680.00)	(680.33, 306.92)
5	(1 210.00, 680.00)	(861.20, 308.04)
6	(1 210.00, 650.00)	(855.46, 472.74)
7	(1 210.00, 620.00)	(850.85, 647.18)
8	(1 240.00, 620.00)	(691.69, 645.21)
9	(1 270.00, 620.00)	(511.51, 641.93)

针对充电孔固定位置,机器人在标准拍摄位置 10 次

感知的结果如表 2 所示。 y 、 z 轴坐标相对实际位置最大误差不超过 0.5 mm,重复性能够满足要求。

表 2 感知重复性测试数据

序号	y 、 z 轴坐标 (y, z) /mm	像素坐标 (u, v) /像素
1	(1 226.84, 791.29)	(687.17, 473.49)
2	(1 226.74, 791.25)	(686.70, 473.76)
3	(1 226.96, 791.12)	(686.49, 474.44)
4	(1 226.95, 791.31)	(686.51, 473.39)
5	(1 226.94, 791.15)	(686.59, 474.28)
6	(1 226.84, 791.33)	(687.16, 473.26)
7	(1 226.79, 791.36)	(687.43, 473.09)
8	(1 226.80, 791.36)	(687.38, 473.14)
9	(1 226.82, 791.34)	(687.29, 473.24)
10	(1 226.95, 791.30)	(686.51, 473.43)

进一步,通过定量改变充电孔的位置验证感知准确性和控制可靠性,部分实验结果如表 3 所示。 x 轴的实际坐标误差较大的原因是充电孔端面与机器人 O_{yz} 平面不平行,人工无法准确测量实际坐标,但在标准拍摄位置,机器人通过激光位移传感器能够感知拍摄距离的变化量,并计算出目标坐标。结果表明,机器人能适应充电孔端面在三轴方向存在的微小偏转角。

表 3 感知与控制测试结果

序号	实际坐标 (x, y, z) /mm	像素坐标 (u, v) /像素	感知坐标 (x, y, z) /mm	误差 $(\Delta x_e, \Delta y_e, \Delta z_e)$ /mm	插接结果
1	(338, 1 237, 791)	(629.80, 476.07)	(340.89, 1 236.98, 790.77)	(-2.89, 0.02, -0.23)	成功
2	(338, 1 226, 791)	(693.22, 473.71)	(339.99, 1 225.77, 791.26)	(-1.99, 0.23, -0.26)	成功
3	(338, 1 210, 791)	(784.03, 473.55)	(337.99, 1 209.71, 791.39)	(0.01, 0.29, -0.39)	成功
4	(338, 1 197, 791)	(863.65, 473.09)	(337.99, 1 197.41, 791.56)	(0.01, -0.41, -0.56)	成功
5	(348, 1 237, 791)	(631.73, 473.59)	(349.48, 1 236.64, 791.21)	(-1.48, 0.36, -0.21)	成功
6	(338, 1 227, 801)	(689.16, 414.39)	(338.04, 1 226.59, 801.75)	(-0.04, 0.41, -0.75)	成功

实验验证感知与控制方法后,充电机器人在某公交充电站现场试运行,如图 11 所示。统计表明,在充电孔感知成功时,PLC、IPC 与机器人控制器都能协调自动完成充电动作过程;当停车距离超过激光测距仪的量程时,以及电动公交车停车位置超过规定范围、充电孔图像采集不完整时,机器人都能将充电枪送回充电桩并报警。其他失败的原因是停车时车身与停车线的夹角超过设计范围,与示教时偏差较大,相机光轴与充电孔端面法向之间的夹角过大,而视觉系统的检测阈值设置偏低,充电孔感知坐标误差超过允许范围,插枪卡阻导致机器人过载并保护性停机。

5 结语

本文根据充电机器人的工作过程和控制要求研究了感知与控制系统。感知系统通过激光测距仪和眼在手上的单目视觉,与机器人配合感知充电孔在机器人坐标系中

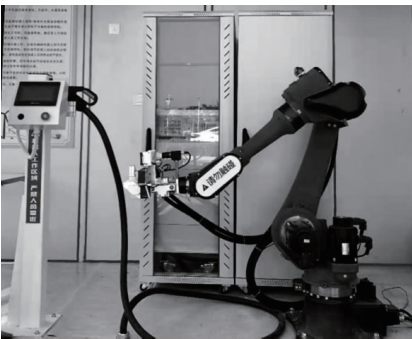


图 11 充电机器人样机

的位置。基于示教获得的标准拍摄位置、拍摄距离和充电孔标准位置,机器人通过激光测距仪感知充电孔 x 轴位置变化量,并调整拍摄位置,在采集图像中通过形状匹配、结
(下转第 198 页)

而实际生产中要求的检测精度为 0.05 mm,检测速率为 500 ms/件,故精度和速率符合实际生产要求。

5 结语

本文针对手机装配线中屏幕玻璃和听筒丝网的装配以及实现装配的自动化和智能化,提出了手机玻璃丝网装配在线视觉检测方案。完成了视觉测量系统的设备选型以及光源成像方案,并设计了手机玻璃丝网的视觉检测流程,研究并讨论了图像预处理方案、边缘提取方法以及尺寸测量的模型与方法,提出了一种应用于屏幕玻璃和听筒丝网装配的在线测量方法。最后将该在线视觉检测方法应用于玻璃丝网在线视觉测量系统的实验平台,针对测量得出的装配弥补参数以及测量速率进行了实验和分析。由实验结果可得出,其综合检测误差和检测速率均满足实际生产在线检测的精度和实时性要求。

参考文献:

- [1] 焦亮. 基于机器视觉的精密零件高精度测量与自动化装配系统的软件及实验研究[D]. 广州:华南理工大学,2016.
- [2] 刘超. 基于机器视觉的微小型零件自动测量与装配[D]. 大连:大连理工大学,2009.
- [3] 冯错. 基于机器视觉的金属手机外壳尺寸测量与表面典型缺陷检测研究[D]. 广州:华南理工大学,2018.
- [4] 王盼. 手机电池的尺寸测量和外观缺陷检测[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- [5] 刘杰. 基于机器视觉的手机二维尺寸测量技术研究[D]. 广州:广东工业大学,2017.
- [6] 吴海波. 基于视觉的装配机器人轴孔识别与定位技术研究[D]. 焦作:河南理工大学,2018.

收稿日期:2020-11-03

(上接第 180 页)

参考文献:

- [1] 朱阳光. 基于力信息的机器人主动柔顺装配研究[D]. 南京:南京理工大学,2002.
- [2] RAIBERT M H, CRAIG J J. Hybrid position/force control of manipulators[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1981, 103(2): 126-133.
- [3] HOGAN N. Impedance control: an approach to manipulation: part II—implementation[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1985, 107(1): 8-16.
- [4] DOMROES F, KREWET C, KUHNENKOTTER B. Application and analysis of force control strategies to deburring and

grinding[J]. Modern Mechanical Engineering, 2013, 3(2): 11-18.

- [5] ERICKSON D, WEBER M, SHARF I. Contact stiffness and damping estimation for robotic systems[J]. The International Journal of Robotics Research, 2003, 22(1): 41-57.
- [6] 高培阳. 基于力传感器的工业机器人恒力磨抛系统研究[D]. 武汉:华中科技大学,2019.
- [7] 孙恺廷,朱隽垚,于存贵,等. 工业机器人三维虚拟监控系统的设计与实现[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(5): 154-156, 210.

收稿日期:2020-10-29

(上接第 194 页)

合手眼标定感知 y 轴和 z 坐标。基于 PLC 和 IPC 的协同控制系统实现充电过程自动控制, PLC 与机器人控制器采用 IO 输出动作条件、查询动作结果, IPC 通过 OPC 读取动作标志位, 并采用 TCP 向机器人发送动作目标位置坐标。实验和应用结果表明, 充电孔感知误差不超过 0.5 mm, 控制系统功能完善、可靠性好, 在电动公交车运营过程中具有较强的实用性。

参考文献:

- [1] 施莹. 基于机器人的电动汽车充电系统及其自动插接的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- [2] 姚安庆. 基于双目视觉的电动汽车充电孔的识别与定位系统设计[D]. 杭州:浙江工业大学,2020.
- [3] 段峥祺. 基于图像识别算法的电动汽车的自动充电接口的识别与定位及其控制方法[D]. 厦门:厦门大学,2017.
- [4] 纪柱. 电动汽车充电口识别及曝光算法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- [5] 马立焱. 基于超声波的电动汽车充电口定位技术[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [6] 王晓安. 电动汽车充电口位姿超声定位技术的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.

- [7] 孙成. 复杂环境下电动汽车充电口识别与定位方法研究[D]. 苏州:苏州大学,2019.
- [8] 张辉,金侠挺. 基于曲率滤波和反向 P-M 电动车充电孔检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(7): 1626-1638.
- [9] 来佳伟,何玉青,李霄鹏,等. 基于单目视觉的机械臂目标定位系统设计[J]. 光学技术, 2019, 45(1): 6-11.
- [10] 张航,王晓凯,张云鹏. 基于单应矩阵的手眼视觉系统简便标定方法[J]. 计算机工程, 2018, 44(9): 33-37.
- [11] 廖家骥,刘建群,高伟强,等. 基于机器视觉的机器人分拣系统设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(4): 25-27, 31.
- [12] 徐斌,曹润宁. 基于视觉技术改进的机器人异型件插装系统的优化研究[J]. 机械工业标准化与质量, 2017(12): 36-39, 46.
- [13] 何高清,章路平. 基于 CAN 总线的某特种机器人控制系统设计与实现[J]. 机床与液压, 2020, 48(4): 86-90.
- [14] 黄敦华,李勇,季君. 基于 OPC Server 技术的多功能工业机器人控制系统设计[J]. 实验室研究与探索, 2018, 37(10): 98-102.

收稿日期:2020-12-15