

移动机器人视觉伺服系统上位机软件的设计与实现

仇翔, 陈旭, 刘安东, 俞立
(浙江工业大学 信息工程学院, 杭州 310023)

摘要: 针对移动机器人视觉伺服系统, 采用 C++ 语言设计了一款基于 Qt 的跨平台实时数据可视化上位机软件; 该软件执行图像处理算法和数据分析, 实现绘制移动机器人实时轨迹和实时参数曲线等功能; 首先介绍了移动机器人的硬件组成和功能; 其次阐述了上位机软件的开发环境和设计步骤, 并详细叙述图像算法的运行流程和实时在线绘制波形图等功能; 最后通过视觉伺服跟踪控制实验采集数据, 并实时显示来验证所设计上位机软件功能的有效性。

关键词: Qt; 上位机; 移动机器人; 视觉伺服; 数据可视化

Design and Implementation of Host Computer Software for Mobile Robot Visual Servo Systems

Qiu Xiang, Chen Xu, Liu Andong, Yu Li

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: A Qt-based cross-platform real-time data visualization host software is designed for mobile robot visual servo systems by using C++ language. The software performs image processing algorithms and data analysis to realize the functions of drawing real-time trajectories of mobile robots and real-time parameter curves. First, the hardware component and its function of the mobile robot are introduced. Second, the development environment and design process of the host software are stated, and the detailed description of the operation flow of the image algorithm and real-time online drawing of waveforms are given. Finally, the data obtained by visual servo tracking control experiments are displayed in real-time to verify the effectiveness of the designed host software.

Keywords: Qt; host software; mobile robot; visual servo; data visualization

0 引言

移动机器人是具有一定自主执行相关动作能力的机械设备, 其移动方式有两轮差分、四轮全向、履带或者腿式机械足等, 具有一定范围内的自由移动和协作能力。随着软硬件技术的快速发展, 带有多种传感器的移动机器人在相关领域得到广泛的应用, 如农业采摘机器人、乒乓球机器人、无人驾驶汽车等。

在农业科技行业中, 视觉伺服草莓采摘机器人^[1]利用视觉图像进行果实定位, 视觉曝光信号触发控制卡, 图像处理获取轮廓, 因采摘场景中深度信息变化不大, 使得视觉定位更加有效。在体育科技行业中, 乒乓球机器人的视觉伺服系统^[2]利用视觉传感器信号作为反馈, 获取图像特征直方图统计, 采用快速轮廓搜索算法识别乒乓球, 轨迹预测算法规划回球动作, 完成乒乓球人机对战或双机对战任务。在安防行业中, 基于改进 ORB 的巡检机器人视觉

算法^[3]能有效的提取感兴趣区域, 并可利用云台控制得到偏移像素, 使识别更加精确。此外, 视觉伺服仓储机器人^[4]、无人驾驶汽车^[5]等高新科技也利用视觉反馈信号进行研发。

在视觉伺服系统中, 视觉传感器获取图像是目标物追踪、特征点识别, 进而位姿估计并求解机器人控制量的必要前提, 也是机器人运动的反馈信号。相比于激光雷达等传感器, 视觉传感器获取信息更多, 可编程灵活性更高, 可处理能力更强, 缺点在于计算复杂, 运行周期长。然而视觉图像信息、控制量以及机器人运行轨迹无法直观化, 为此需要设计上位机将视觉追踪区域、像素偏差、线速度、角速度、陀螺仪角度、里程计坐标、相机位姿等信息可视化。吕伟龙等人设计的飞行器通用上位机软件^[6]具有数据获取解析并进行简单显示功能, 但并未进行数据分析和绘制误差曲线图。李兰芳等人设计的激光雕刻上位机软件^[7]可有效与下位机通讯, 实现基本图像显示, 但界面不够简洁, 排布凌乱, 数据冗杂。

本文针对移动机器人运行情况提出了一种基于面向对象的 C++ 高级编程语言、Qt 图形界面设计了一款上位机软件, 界面控件布局合理, 同类数据分页显示, 简介高效。具备视觉信息的实时可视化、运行参数的动态显示、误差

收稿日期: 2018-10-16; 修回日期: 2018-11-20。

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LY17F030019), NSFC-浙江两化融合联合基金(U1709213)。

作者简介: 仇翔(1980-), 男, 浙江湖州人, 博士, 副教授, 主要从事移动机器人、运动控制等方向的研究。

数据分析、绘制误差曲线图、绘制机器人运行轨迹等功能, 达到数据可视化和人机交互效果。

1 移动机器人的结构与功能

本设计以 TurtleBot 移动机器人底盘作为实验对象, 如图 1 所示。其底部结构两边是差分驱动电机, 前后各一个支撑稳定轮, 该结构能够保证前进和后退都有较好的稳定性, 陀螺仪、编码器数据获取稳定, 防滑性好。该机器人的主要硬件组成如下所述:



图 1 移动机器人实物图

1) 有刷直流电机: 该移动机器人的动力系统是由两个独立的有刷直流电机形成差分驱动组成的, 额定电压 12 V, 额定负载电流 750 mA, 扭矩常数 10.913 mN · m / A, 速度常数 830 rpm/V, H 桥硬件驱动, PWM 脉宽软件调制。

2) 电机编码器: 有刷直流电机附带有角位移编码器, 能够将角位移转换为高低电平信号, 通过该信号以及机械结构可计算里程计。

3) 三轴数字陀螺仪: 三轴陀螺仪是能够测量 6 个方向数据的硬件设备, 利用测量数据可得角度, 因此可以计算出物体运行状态。该机器人使用 STMicroelectronics 型号为 L3G4200D 的三轴数字陀螺仪, 测量范围 ± 250 度/秒, 偏航轴出厂设置在 ± 20 度/秒至 ± 100 度/秒的范围内校准。

4) 视觉传感器: 视觉传感器是利用光学元件和成像装置获取图像的设备。该次实验对象使用普通 100 万像素视觉传感器, 需要进行相机标定^[8], 获取视觉传感器的内参矩阵。

5) MCU: 机器人内部底层驱动主控 Arduino 有丰富的外设接口, 开发环境兼容 Windows、Macintosh OS X、Linux 三大主流操作系统。在该机器人内部, Arduino 驱动 IO 完成基本的机器人运动控制以及底层元件与上层软件的数据交互。

2 移动机器人视觉伺服算法

本文中移动机器人加入视觉信息结合图像处理算法、位姿估计算法并进行参数可视化来验证上位机功能效果。其中图像算法涉及在线目标追踪, 提取特征区域、识别特征点并利用膨胀腐蚀算法优化处理后进行位姿估计^[9]。

为了在复杂背景下稳定追踪到特征点, 利用 TLD 目标追踪算法^[10-11]提取物体特征区域。目标区域以及各坐标系关系如图 2 所示。

世界坐标系建立在物体坐标系上, 第一个特征点是物

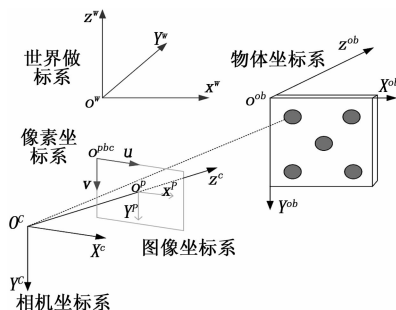


图 2 相机模型坐标轴关系图

体坐标系的原点。由此, 根据实际测量可得目标板上 4 个特征点的世界坐标, HSV 颜色空间识别的 4 个像素坐标对应 4 个世界坐标。使用 OpenCV 中 solvePnP 位姿估计算法, 输入 4 个像素点以及与之对应的 4 个世界坐标点, 即求旋转矩阵以及平移矩阵如下:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{z^c} \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot [\mathbf{R} \quad \mathbf{t}] \begin{bmatrix} x^w \\ y^w \\ z^w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: (u, v) 是像素坐标, (x^w, y^w, z^w) 是特征点的世界坐标位置, z^c 是相机深度信息, (f_x, f_y, u_0, v_0) 是相机内参。利用旋转矩阵 \mathbf{R} 可计算相机三维坐标轴的旋转角度 $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$, 即姿态。利用平移矩阵 \mathbf{t} 可计算相机的世界坐标位置 (x_c^w, y_c^w, z_c^w) 。最后将目标物正中间特征点的世界坐标代入公式 (1) 中求解出对应的像素并重投影到像素坐标中, 若投影在特征区域中间特征点上, 则求解正确。

上述求解出相机的世界坐标, 控制机器人则可利用坐标值和增量式 PID 算法计算线速度和角速度, 求解线速度输入信号是 500 mm 深度信息值, 输出信号以及反馈信号是相机到目标板的距离 z_c^w , 算法如下:

$$\Delta v[k] = K_{vp}e_2 + K_{vi}e_1 + K_{vd}e_3 \quad (2)$$

其中: K_{vp} 是比例系数, K_{vi} 是积分系数, K_{vd} 是微分系数, $e_d[k]$ 是 k 时刻深度距离误差信号。

$$\begin{aligned} e_1 &= e_d[k], \\ e_2 &= e_d[k] - e_d[k-1], \\ e_3 &= e_d[k] - 2e_d[k-1] + e_d[k-2], \end{aligned}$$

根据 $\Delta v[k]$ 得到机器人的线速度。角速度计算方式同为增量式 PID 算法, 利用公式 (2), 输入信号是像素横坐标值 320, 输出信号和反馈信号是重投影点的横坐标。

通过上述算法, 移动机器人可自主视觉伺服跟踪特征物体, 同时上位机会采集机器人运动时的陀螺仪、编码器硬件数据以及视觉信息数据并进行可视化。

3 移动机器人上位机软件设计

3.1 Qt 开发环境简介

Qt 跨平台界面应用开发基于 C++ 面向对象编程语言设计图形用户界面, 其平台项目开发可以使用 GUI 图形界

面程序、控制台程序以及服务器相关程序，使用元对象编译器以及一些宏定义来筑造面向对象的框架，其易扩展性以及组件编程的功能深受开发者青睐。Qt 兼容性非常好，该平台能编译的源码在很多其他不同操作系统上也能直接编译运行，不需要过多修改，并且会根据不同系统本身的特性而生成该平台特有的显示效果。Qt 特有的信号与槽机制打破了传统的 callback 信息传递机制，能够保证参数传递的有效性与正确性。经过长时间的维护与升级，Qt 有着非常丰富的基于 C++ 的图形库，其集成封装库里有数据库、脚本库、XML 库以及 OpenGL 库等，这些封装库可多线程操作使得 Qt 平台有着非常强大的功能，具备开发大型工程项目的能力。

Qt Creator 是诺基亚推出的基于 Qt 平台上的轻量级集成开发环境。该集成开发环境可以在 Windows、Linux、Mac OS X 等桌面操作系统上完美运行。配置好开发环境，源码可以利用 Qt Creator 在各个平台无障碍切换。其操作界面如图 3 所示。

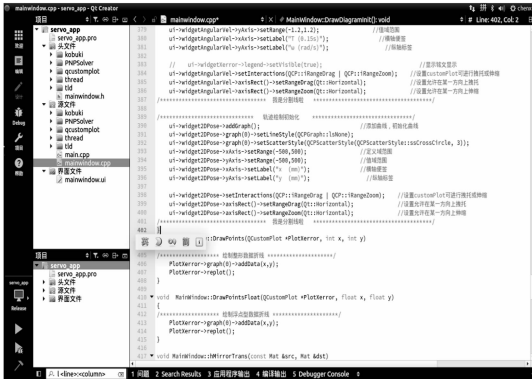


图 3 Qt Creator 操作界面示意图

Qt Creator 功能强大，操作界面友好，配置简单，项目开发所需头文件、静态库、动态库链接只需在 .pro 文件中包含相应的绝对路径即可，在编译时会自动生成 Makefile 统筹管理整个工程项目。其 IDE 还具备项目生成向导、高级程序语言编辑器、浏览文件、qmake 编译等功能。本文上位机软件的设计与开发基于 Qt5.8.0 版本，该版本较高，完全满足开发需要。

3.2 上位机软件设计过程

本文基于 Qt MainWindow 设计上位机，其主要优点是主窗口可扩展性好，可兼容所有 Qt 平台框架。在主窗口中加入图形用户界面基本控件 Qt Widget，其作用相当于一个容器，将其它控件，如 Qbutton、Qlabel 等进行统筹布局管理。一个主窗口显示所有数据显得非常冗杂，而多窗口显示非常混乱，故使用 QTabWidget 进行分页管理，同类数据在同一个 QTabWidget 中显示，通过不同的标签页来实现数据以及绘图显示功能的切换。上位机软件主界面如图 4 所示。

该上位机软件主要由 3 个标签页组成基本框架：初始

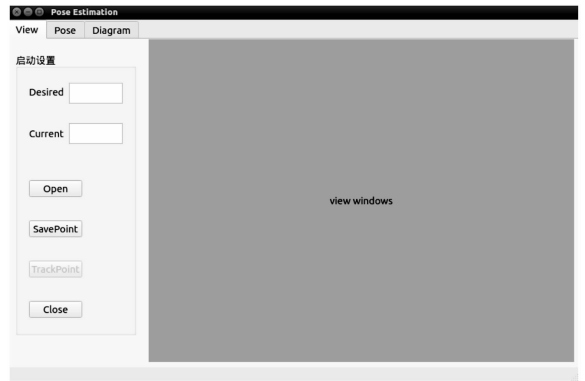


图 4 上位机主界面显示窗口

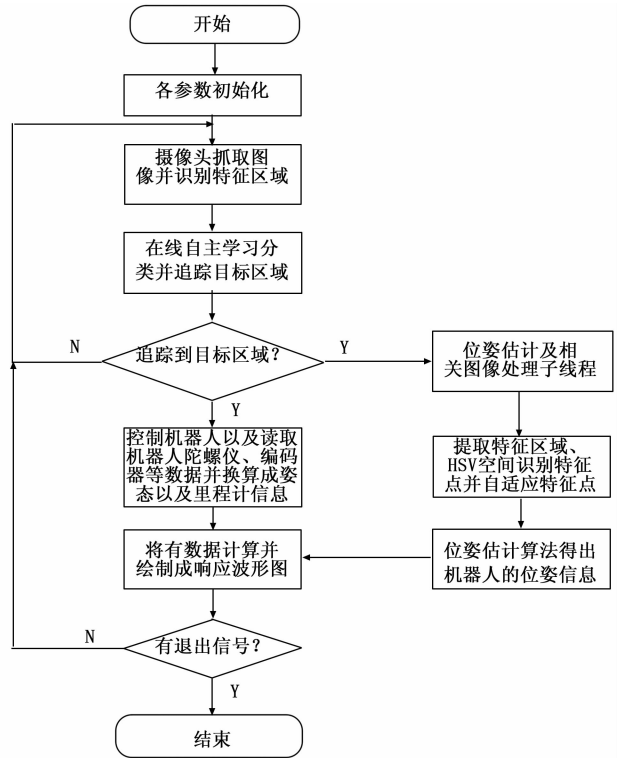


图 5 上位机工作流程图

化设置及实时显示追踪区域界面、实时在线参数及 2D 机器人路径显示界面、实时在线参数波形图显示界面。该上位机开启了两个并行线程——主线程和子线程，主线程采集图像追踪目标区域以及基本的运行状态监管和绘图等，子线程负责位姿估计以及相关图像处理算法，该上位机工作流程如图 5 所示。图中，陀螺仪、编码器等数据从机器人硬件中获取解析所得，线速度、角速度等数据由上位机计算所得并传入移动机器人加以控制，位姿信息是通过图像处理中位姿估计算法得出的结果。各种数据融合之后需要分析并进行可视化，该上位机显示数据的功能如下所述：

1) 数据分析：上位机软件主要数据来源于控制机器人运行过程中产生的多个运行参数，从机器人中读取解析得陀螺仪数据 θ 、里程计横轴坐标 x 、里程计纵轴坐标 y ；上位

机算法中获取当前实际追踪点位置 (u, v) 、追踪点横轴像素偏差 Δu 、追踪点纵轴像素偏差 Δv 、增量式 PID 计算的线速度 v_c 以及角速度 ω_c 、相机世界坐标 (x_c^w, y_c^w, z_c^w) 、相机姿态 $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ 。上位机开启进行初始化, 第一帧图像需要选定特征区域, 之后实时追踪。数据从开启摄像头追踪到目标区域后一直在线更新, 采样周期 T 为 0.15 s, 并将数据实时可视化。

2) 运行参数和机器人轨迹图显示: 在 Qt 中绘制 2D 图像可以使用 QPainter, 但功能实现复杂, 代码冗余, 故使用 Qt 中极为强大的绘图插件 QCustumPlot。QCustumPlot 是数据可视化图表控件类库, 其结构简单, 由一个头文件以及一个 C++ 源文件组成, 使用时只需要将这两个源文件添加到工程项目中调用相关函数即可实现图表绘制。利用里程计信息绘制机器人运动轨迹, 获取实时运行参数并利用 QEditText 控件显示运行参数。机器人运动轨迹框架基于 QWidget, 添加一个 QWidget 控件并提升为 QcustomPlot 类库窗口即可进行图形绘制。运行参数显示以及机器人轨迹窗口界面如图 6 所示。

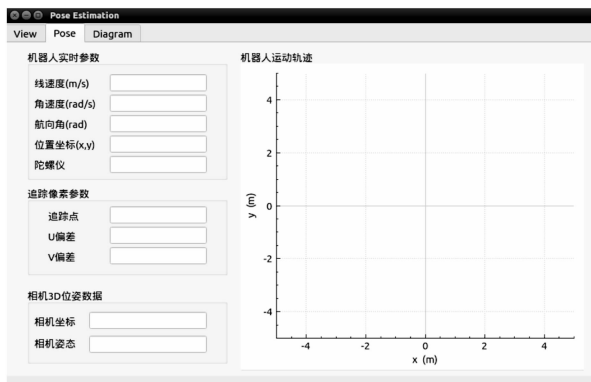


图 6 参数以及轨迹显示窗口

3) 移动机器人运行参数动态图: 凭借 QcustomPlot 的强大功能亦可绘制动态波形图。该功能模块有 5 个状态信息显示成波形图, 添加 5 个 QWidget 并且提升为 QCustumPlot 类库窗口。每个图形的横坐标由时间累积而成的, 需要做成动态的波形显示, 故横轴具有拖拽、放大、缩小功能。这 5 个状态信息波形图为: 追踪点横轴像素偏差 Δu 、追踪点纵轴像素偏差 Δv 、移动机器人姿态角 ϑ 、增量式 PID 计算的线速度 v_c 以及角速度 ω_c 。移动机器人各状态信息动态波形如图 7 所示。

4 实验验证

上位机软件的功能已在文前阐述, 机器人硬件系统跟上位机软件系统通过 USB 接口进行串口通讯, 传入线速度以及角速度指令, 与此同时采集陀螺仪、编码器数据计算里程计得出机器人基本运行轨迹。上位机算法功能任务是追踪到目标区域, 计算像素点偏差, 相机位姿估计等; 另一方面, 上位机将各种采集到的数据进行可视化, 让实验

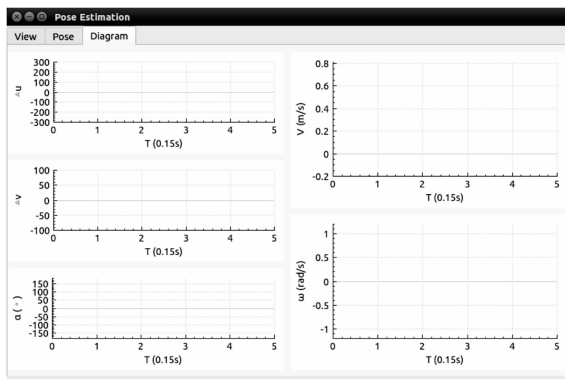


图 7 参数动态波形图显示窗口

更加直观。目标区域追踪是否成功, 通过将目标区域内均匀产生的点绘制到上位机图像显示窗口中, 并用方框标识追踪区域, 实际效果如图 8 所示。



图 8 实时目标区域追踪显示

目标区域追踪成功再进行相关算法, 周期性的将线速度与角速度输入到移动机器人同时获取机器人的位置信息, 并绘制成 2D 图形界面。基于位姿估计的移动机器人跟踪控制运行参数实时显示, 包括追踪点像素坐标、像素偏差、航向角、机器人实时位置坐标、陀螺仪角度、相机坐标、相机姿态; 周期时间是 150ms, 当获取到像素坐标以及相机位姿即可控制机器人移动, 线速度由相机到目标板距离确定, 角速度则由像素点横轴偏差确定, PID 算法实时速度更新, 其中线速度 PID 参数为 $K_{vp} = 0.002, K_{vi} = 0.0005, K_{vd} = 0.001$, 角速度 PID 参数为 $K_{\omega p} = 0.008, K_{\omega i} = 0.003, K_{\omega d} = 0.005$ 。基本运行数据以及绘制移动机器人里程计位置信息轨迹如图 9 所示。

实验中机器人沿顺时针运动, 从原点开始跑圈回到初始位置, 之后轨迹重合。其中, 为了让各参数有一个系统性的认知, 将其中 5 个参数绘制成波形图形式, 每个波形图都可以进行拖拽、缩放。像素横坐标偏差、像素纵坐标偏差、陀螺仪角度、线速度、角速度波形图如图 10 所示。其中, 线速度变化平缓, 角速度波动较大, 原因在于控制机制, 线速度取决于目标物到相机的深度距离, 角速度大小取决于横轴像素偏差 Δu , 深度距离变化不大的情况下, 横轴像素偏差存在大波动的可能性。

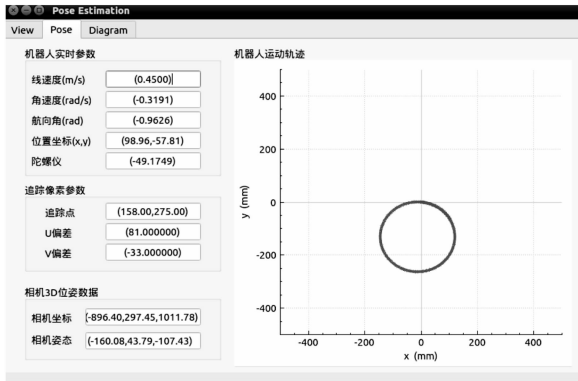


图 9 实时参数以及轨迹显示

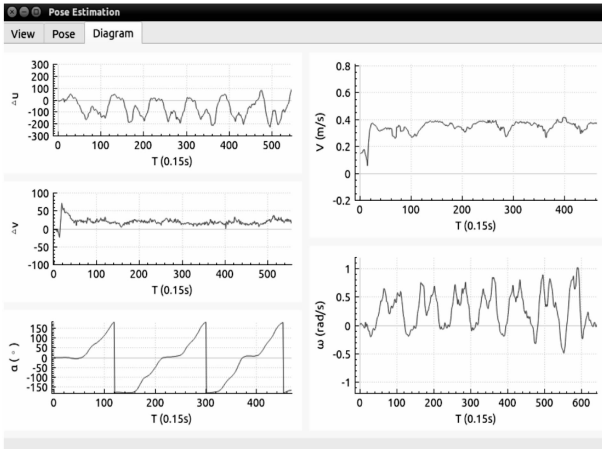


图 10 移动机器人参数动态波形图

5 结论

本文在跨平台的 Qt 图形框架下，以 C++ 面向对象编程语言工具设计开发了一款上位机软件，用于机器人运行过程中参数的实时可视化。首先介绍了上位机软件涉及的

(上接第 54 页)

自身的可维护性及互换性，软件测试程序采用面向信号的编程方式，有效提高了软件的通用性及可移植性。能较好地满足我军对某型直升机外场保障便捷性、准确性，在最短时间内定位故障，更换备件的要求，通过在某试飞基地外场试用表明，本文所提方法设计的原位检测设备能够很好满足该型直升机的外场检测需要，具有携带方便、检测针对性强，检测效率高的特点。

参考文献:

[1] 赵宁社, 翟正军, 王国庆. 新一代航空电子综合化及预测与健康健康管理技术 [J]. 测控技术, 2011, 30 (1): 1-5, 9.
 [2] 杜玲珍, 张晓勇, 常飞, 等. 浅谈军用 ATS/ATE 应用与发展 [A]. 2011 年航空试验测试技术学术交流会 [C]. 2011 (30): 232-234.
 [3] 杜会斌, 吴晓娟, 周旭. 自动测试在军事电子技术中的应用 [J]. 无线电工程, 2014, 61-64.

位姿估计算法和 PID 控制算法，且详细叙述了上位机软件的开发流程、使用的框架以及插件。机器人硬件通过底层 Arduino 与上位机串口通讯完成数据对接，上位机算法计算出控制量控制移动机器人，过程中产生的各参数信息在上位机软件中实时显示，并将部分参数量绘制成波形图。最终通过实验在线实时显示各状态量信息，验证上位机功能的实时性以及有效性。

参考文献:

[1] 王粮局, 张立博, 段运红, 等. 基于视觉伺服的草莓采摘机器人果实定位方法 [J]. 农业工程学报, 2015, 31 (22): 25-31.
 [2] 章逸丰, 熊蓉. 乒乓球机器人的视觉伺服系统 [J]. 中国科学: 信息科学, 2012, 42 (9): 1115-1129.
 [3] 孙温和, 张国伟, 卢秋红. 基于改进 ORB 的巡检机器人视觉算法研究 [J]. 现代计算机 (专业版), 2017, (23): 51-54.
 [4] 靳金朋, 李天剑. 基于视觉伺服的仓储机器人的控制系统 [J]. 北京信息科技大学学报 (自然科学版), 2017, 32 (2): 66-69.
 [5] 孙温和, 张国伟, 卢秋红. 基于改进 ORB 的巡检机器人视觉算法研究 [J]. 现代计算机 (专业版), 2017, 23: 51-54.
 [6] 吕伟龙, 向豪, 杨雨昕. 基于 Qt 的飞行器通用上位机软件设计 [J]. 电子技术与软件工程, 2017, 7: 59-61.
 [7] 李兰芳, 杨星海, 侯伟, 等. 基于 Qt 的激光雕刻上位机软件设计与实现 [J]. 计算机与数字工程, 2017, 45 (4): 751-754.
 [8] 李莉. OpenCV 耦合改进张正友算法的相机标定算法 [J]. 轻工机械, 2015, 33 (4): 60-63, 68.
 [9] 曾庆喜, 冯玉册, 马杉. 无人驾驶车辆单目视觉里程计快速位姿估计 [J]. 河北科技大学学报, 2017, 38 (5): 438-444.
 [10] 张毅, 姚圆圆, 等. 一种改进的 TLD 动态手势跟踪算法 [J]. 机器人, 2015, 37 (6): 754-759.
 [11] 程立英, 张丹, 赵颖颖. 一种基于 TLD 改进的视觉跟踪算法 [J]. 科学技术与工程, 2013, 13 (9): 2328-2386.
 [4] 邱智, 王玉峰, 谢振华. 机载设备自动测试系统平台设计 [J]. 测控技术, 2005, 24 (1): 53-55.
 [5] 任献彬, 雷志东. 自动测试系统故障诊断功能的实现 [J]. 电子测量技术, 2006, 29 (6): 207-208, 217.
 [6] 陈鸿, 李进杰, 高伟, 等. 某型机载电子吊舱维护训练系统设计 [J]. 现代电子技术, 2014, 37 (22): 84-87.
 [7] 查国云, 刘鹏飞, 陈秋凤, 等. 某型飞机航空军械仿真训练系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (10): 2455-2458.
 [8] Wang G H, Li X R, Xing H G, et al. Design and development of the newest armored equipments weapon maintenance training simulation system [A]. Proceedings of 2012 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, And Safety Engineering (ICQR2MSE) [C]. Washington: IEEE Press, 2012: 1368-1371.
 [9] 耿福明. 面向信号的 ATS 仪器控制模块与 TPS 生成工具的实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
 [10] 刘昕. 面向信号的测试资源映射技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.