

基于 QT 的工业机器人人机交互系统的设计^①

徐建明^② 甘万正 张文安 俞 立

(浙江工业大学信息工程学院 杭州 310023)

摘 要 本文针对工业机器人的人机交互需求,设计了一种基于 QT 开发框架和 Modbus 通信协议的人机交互系统。基于 Modbus TCP/IP 通信技术,设计了示教器、3D 仿真监控终端和运动控制器之间的数据通讯协议;在嵌入式操作系统下,使用 C++ 语言开发示教器上位机交互程序,主要包含数据通信、示教点管理、程序编辑、机器人语言解释器等模块;在 Windows 系统下,通过 SolidWorks 建立工业机器人 3D 模型,利用计算机标准图形接口 OpenGL 开发 3D 仿真监控程序。最后,结合基于 PLCopen 规范开发的运动控制器实现了对汇博 ER50-C10 工业机器人本体的示教、3D 在线仿真和实时监控,验证了所设计人机交互系统的实用性。

关键词 工业机器人, 人机交互, 示教器, Modbus, 解释器, PLCopen, OpenGL

0 引言

随着工业领域机器人的应用普及,机器人已经成为工业制造不可或缺的设备。“中国制造 2025”总体战略的提出,加快了我国从传统制造大国向智能强国的转型,同时未来的 20 年也是中国制造业由大变强、质量变革和效率变革的关键时期,加快机器人技术的发展对推动智能制造具有重要意义^[1,2]。

随着工业机器人在工业上的广泛运用,人机交互技术愈来愈得到使用者和开发设计者的重视,这就要求人机交互要具有操作简单、界面友好和人性化等特点。同时虚拟现实技术作为工业机器人人机交互技术新兴的研究方向之一,也在不断被创新性地应用于工业场合,给用户提供更好的沉浸感、交互性和想象性^[3]。人机交互技术作为机器人关键技术之一,在应用开发中占有很大比重,具有高附加值^[4]。工业机器人人机交互技术已应用于工业机器人的示教、监控、仿真和离线编程等方面,为使用

者提供了更好的操作体验。

目前在工业机器人人机交互软件的设计中,依据实际应用中需求不同,开发出的交互软件也各有差异。徐翔等人^[5]基于 iPad 设计了一套机器人示教器交互软件,实现对机器人的控制,其使用便捷、成本低,但不太符合工业控制现场安全控制标准。厦门大学潘俊浩等人^[6]设计了一款基于 Unity3D 的工业机器人示教系统,实现 3D 示教场景和示教器交互界面的通信,用于对机器人简单的示教学习。山东大学夏飞虎和华中科技大学沈雅琼等人^[7,8]基于 WinCE 的开发环境采用 MFC 框架设计了示教器的人机交互软件,实现了对机械臂的操控。东北大学刘和彬^[3]利用 VR 技术和 Arduino 控制器实现对工业机器人的仿真和监控。当前关于工业机器人在示教、仿真与监控方面的应用集成还有待提高,随着 PLCopen 规范在机器人运动控制领域的推广应用^[9,10],有必要研发基于 PLCopen 运动控制规范的机器人控制与人机交互系统。

本文以汇博 6 自由度机械臂 ER50-C10 机械本

① 国家自然科学基金-浙江省自然科学基金联合基金两化融合项目(U1709213),国家自然科学基金面上项目(61374103)和浙江省自然科学基金重点项目(LZ15F030003)资助。

② 男,1970 年生,博士,教授;研究方向:迭代学习控制,电机伺服控制技术,机器人控制技术等;联系人,E-mail: xujm@zjut.edu.cn (收稿日期:2018-08-23)

体为研究对象,基于 QT 开发平台设计集示教器和 3D 仿真监控终端于一体的工业机器人人机交互系统。采用 Modbus TCP/IP^[11,12] 协议设计数据通信协议实现示教器、仿真监控端和控制器的数据交互;数据库应用技术应用于对示教器交互软件的点数据进行管理;3D 建模技术和 OpenGL^[13] 技术用于对仿真监控端的开发,对工业机器人 3D 建模,并进行 3D 动画控制。实现了基于 Codesys 和 PLCopen 规范研发的运动控制器^[14] 和交互软件通过数据通信协议进行数据交互,以及工业机器人的示教、仿真和监控等功能。

1 系统整体架构

人机交互系统涉及 Linux 嵌入式设备和 Windows 平台,人机交互系统的开发工具采用 QT,QT 是跨平台应用和 UI 开发框架。同时 QT 封装了丰富的 API,支持 2D/3D 渲染,支持计算机图形库 OpenGL,满足对工业机器人人机交互系统的开发需求。

如图 1 所示,整个系统的组成由示教器、运动控制器、驱动器、机器人机械本体、3D 仿真监控终端等组成。

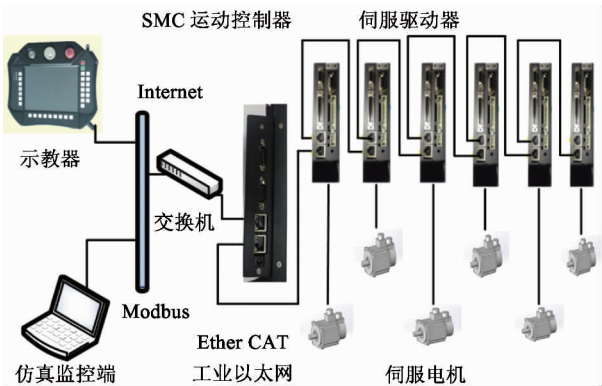


图 1 机器人控制与仿真监控系统

该系统整体的通信采用 Modbus TCP/IP 通信技术,采用主/从站模式也称为客户端/服务器模式。基于 Codesys 开发的运动控制器为 Modbus 从站,分别与示教器和 3D 仿真与监控系统的 Modbus 主站设备进行数据交互。

示教器的人机交互软件使用 QT 提供的界面开发工具对软件的人机界面进行规划,提供简洁的人机交互界面,通过界面按钮和示教器的物理按键实现对交互界面的操作。软件内部使用 QT 特有的消息机制-信号与槽进行消息传递,通过 Modbus 协议将控制命令发送到运动控制器,实现对工业机器人的控制。

3D 监控仿真系统通信的方案跟示教器相同,其利用 SolidWorks 2014 对机械臂建模,采用 QT + OpenGL 进行模型的运动学搭建,利用 OpenGL 的图形接口对模型进行渲染和控制,以实现机械臂的在线仿真与实时监控。

2 系统的通信协议的设计

2.1 数据通信协议

Modbus TCP/IP 是 Modbus 的网络传输,是一种开放的工业控制通信协议^[13]。本文中的通信设计模式为主从模式,报文传输服务结构的设计如图 2 所示,示教器和 3D 仿真监控端作为主站,工业机器人运动控制器作为从站进行数据交互。

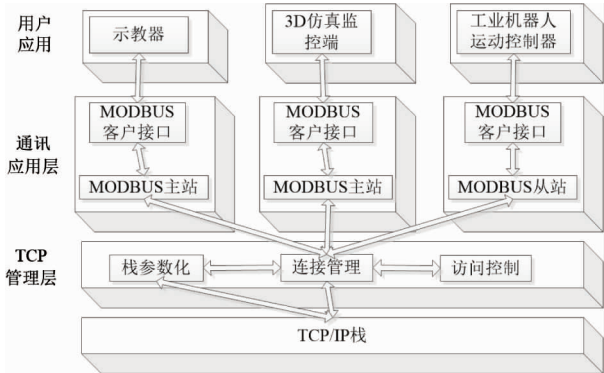


图 2 Modbus TCP/IP 报文传输服务结构

通讯帧的数据格式如表 1 所示,包含功能码、起始位、数据长度、数据区(可选)。功能码占一个寄存器 4 位字节,设计功能码遵循不同的功能码对应不同功能,通过写入保持寄存器通讯帧,使控制系统调用不同的程序块的控制变量实现控制,包含运动控制模式、坐标切换、设置参数等控制指令,如表 2 所示。在功能码定义中预留部分功能码可以做二次

表 1 通讯帧数据格式

功能码	起始位	数据长度	数据区
-----	-----	------	-----

表 2 功能码的定义

命令	功能码	控制变量
X +	0X01	<i>MCS_x.movxf</i>
...	...	...
RZ-	0x0e	<i>MCS_rz.movrzb</i>
关节 1 正转	0x0d	<i>MC_Jog_0.for1</i>
...	...	...
关节 6 反转	0X18	<i>MC_Jog_5.back5</i>
...	...	...
速度 +/速度 -	0x20/0X21	<i>GVL.Velocity</i>
使能	0X22	<i>POU.Enable</i>
下使能	0x23	<i>POU.Enable</i>
轴限设置	0x24	<i>Register_allocate. Limit_Axis.zhou</i>
...	...	...
操作关	0xf0	<i>Register_allocate.keyswitch</i>
手动模式	0xf1	<i>Register_allocate.keyswitch</i>
自动模式	0xf2	<i>Register_allocate.keyswitch</i>

开发使用。起始位占一个寄存器,存放保持寄存器起始地址,数据长度是包含整个通讯帧所占的寄存器个数,数据区存放设置参数和工业机器人语言解释器的目标代码。

2.2 主从站通信流程

示教器人机交互界面与 3D 仿真监控端的通信流程采用多线程技术,主站通信流程如图 3 所示,其中图 3(a)为交互界面与控制器通讯的流程图,建立通信连接并发送开启子线程信号;图 3(b)为人机交互数据接收的子线程,接收信号开启线程接收数据。

在运动控制器端添加 Modbus 从站设备,将相关量映射到寄存器中,在示教器端的交互程序中通过 IP 地址和端口连接 Modbus 从站,进行数据通信,示教器软件程序读输入寄存器的数据或写入保持寄存器通讯帧,运动控制器端将示教器和仿真与监控端需要的数据转换为 Word 类型数据映射到输入寄存器,保持寄存器映射到 Word 型数组中,并实时周期性刷新并解析通讯帧获取控制信息,流程如图 4 所示。

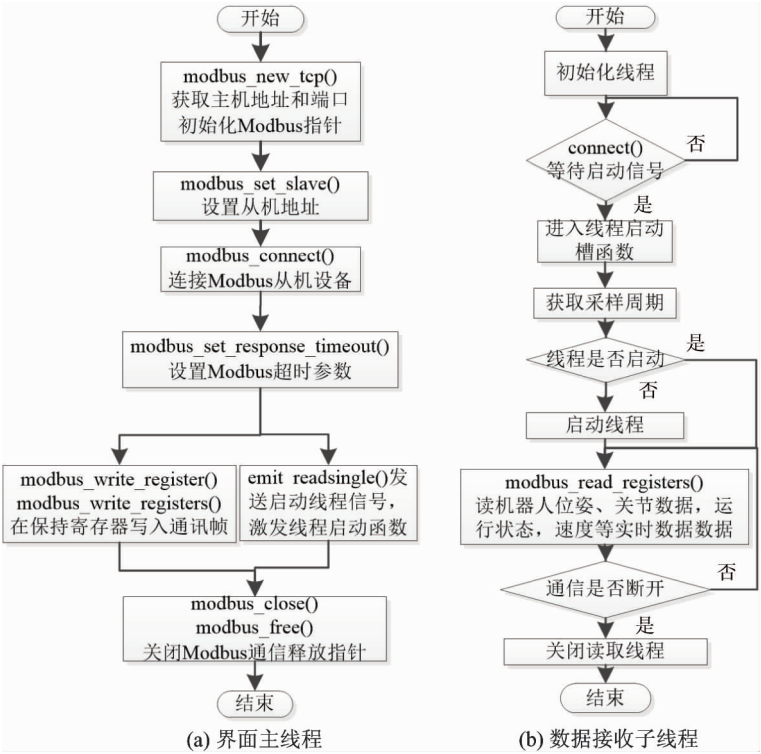


图 3 主站多线程通信流程图

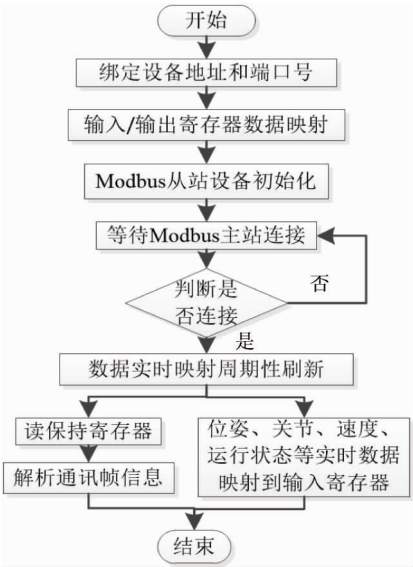


图 4 控制器端从站通信流程图

3 示教机器人交互程序的设计

通过对功能需求的分析,采用面向对象和模块化设计方法对示教机器人交互界面开发,示教器上的人机交互界面设计如图 5 所示,包含各界面的功能和示教器周围按键功能,便于在此框架的基础上开发程序和后续对功能模块的增加、修改和升级。

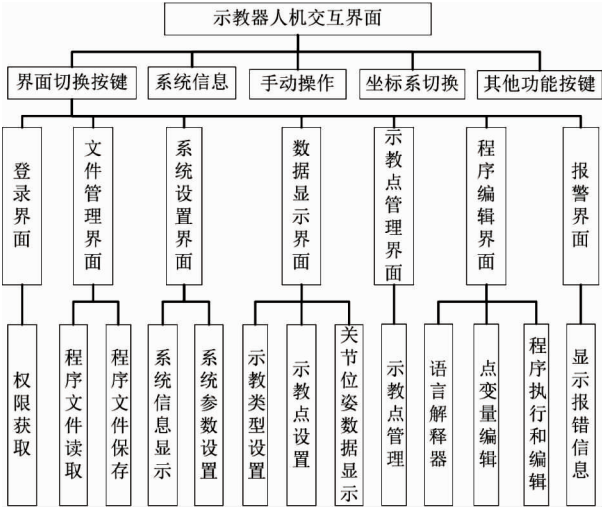


图 5 交互界面结构图

示教器人机交互界面使用 Stacked Widget 控件完成对切面切换按键的响应,进行界面类的调用,整个人机交互界面主要完成下面几种设计:按键功能的设计、人机交互界面的设计、数据通信协议的设计、工业机器人语言解释器的设计。

数据通信协议上文已做详细介绍,下面介绍人机交互界面中的示教点管理和程序编辑界面的设计和工业机器人语言解释器的设计。

3.1 示教点管理和程序编辑界面设计

3.1.1 示教点管理界面

示教点管理界面的设计,主要是实现对示教点数据的管理,采用 QT 默认集成数据库驱动的轻量级 SQLite 数据库,使用 QT 中封装操作数据库的 API,实现对数据库数据的操作和显示,设计流程如图 6 所示。

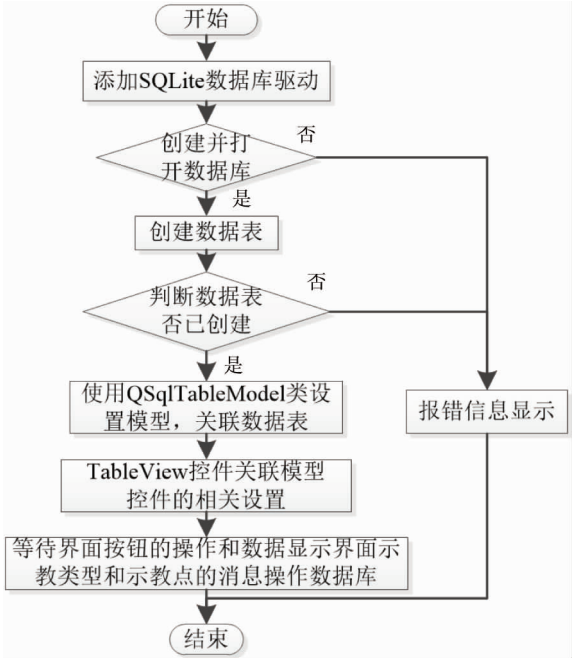


图 6 数据库调用流程图

QsqlDatabase 类中的 addDatabase() 函数添加 SQLite 的驱动,创建 info. db 数据库和 4 个数据表,对不同类型的示教数据进行管理,主要包含标准示教点、工具示教点、关节示教点和工作平面校准点。使用 TableView 控件关联 QSqlTableModel 类创建的模型,经数据表关联后,实现对数据表中数据进行操作,同时使用槽函数来响应数据显示界面中示教数据的信号,完成点数据的示教。示教完成后,实现对示教点的重复调用。

3.1.2 程序编辑界面

在程序编辑界面设计中,通过 PlainTextEdit 控件以完成对程序和点变量的编辑和显示,控件调用

toPlainText() 函数获取编辑区内容,利用 QTextDocument 类得到编辑框中的总行数和 QTextBlock 类设置编辑区行索引获取行内容,对控件程序与变量进行操作。

界面中包含自检、编译、加载、单步调试、运行等功能按钮。自检和编译按钮调用机器人语言解释器对程序进行检错和分析并生成目标代码,报错信息通过信号与槽消息机制反馈到报警界面。在单步调试时通过按键下发通讯帧,运动控制器单步运行,控制器输入寄存器写入运行行和运行状态位,状态位用来判断运行正确或出错,使用 QTextEdit 类支持调

用 ExtraSelection 对象实例化,调用相关函数设置行背景用以提示程序状态,正确显示为绿背景,错误显示为红背景。

3.2 工业机器人语言解释器的设计

工业机器人语言解释器,是将符合编程规则的机器人语言解释成控制器平台能够识别的指令系统^[15]。本文设计的解释器基于 QT 的正则表达式,省去了传统词法语法分析^[16],仅针对语义进行分析,易于开发、维护和扩展,解释器流程图如图 7 所示。

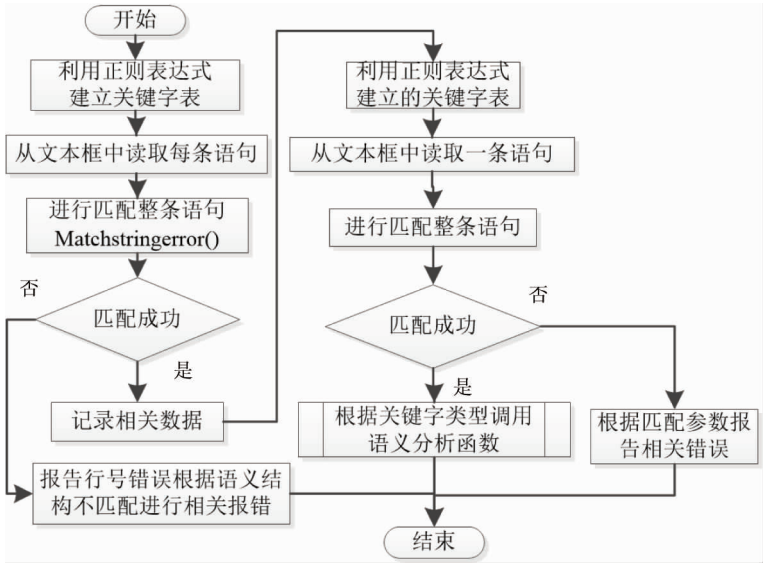


图 7 解释器流程图

3.2.1 建立匹配规则

利用正则表达式建立机器人语言的关键语句表,严格的按照格式进行匹配。

QString type1 ("^(\\s*) (movej) (\\s*) ([A-Z] + [0-9] +) (\\s*) (;) (\\s*) \$"); //运动指令程序正则表达式

QString type2 ("^(\\s*) (delay) (\\s*) ([/](\\s*) (\\d+) (\\s*) ([/])) (\\s*) (;) (\\s*) \$"); //延时指令程序正则表达式

QString type3 ("^(\\s*) (if) (\\s*) [/(\\s*) ([A-Z] + \\d+) (\\s*) ([/]=[/]) (\\s*) (([a-z] +) | (([-?])?) (\\d+) ((([/])(\\d+)))?) ([/])) (\\s*) \$"); //if 结构化指令程序正则表达式

.....

在工业应用中需添加或修改原有指令,可直接添加对应的正则表达式并对原有的进行更改,方便工业机器人语言的扩展。

3.2.2 程序分析及目标代码生成

通过 QT 中 QRegExp 类建立正则表达式匹配表,利用 exactMatch() 函数进行匹配,进行机器人语言的检错、语义分析并解释。设计为二次扫描,第一遍扫描对机器人语言进行检错,如果有错对其所在的行号进行报错,并对结构化语句是否符合相关定义要求进行判断,同时记录结构性语句的相关位置。在第一遍未报错的基础上进行第二遍扫描,对语句一一匹配并解释生成目标代码,流程如图 8 所示。

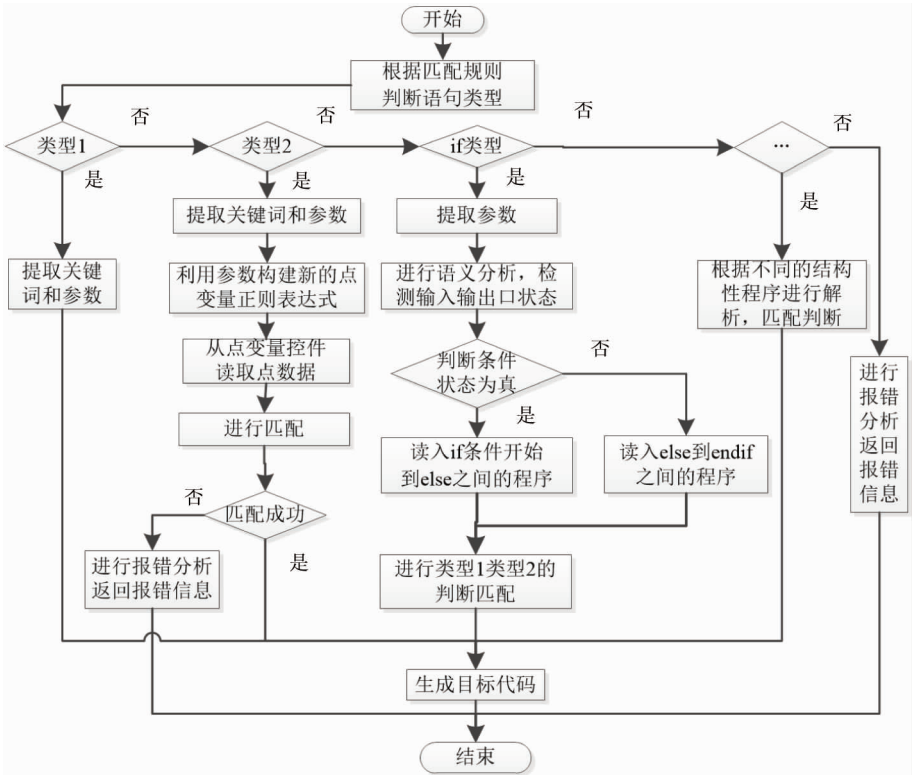


图 8 解释器生成目标代码流程图

在语法分析中根据不同类型的匹配规则对机器人语言进行解释,类型 1 是指直接机器人控制程序有具体的数据参数。类型 2 是指控制指令后带有点变量的程序指令,需要在程序解释中将点变量数据生成带有数据的目标代码。if 类型是指条件结构化控制语句,通过语法分析提取关键参数利用 C++ 中的 if 语句实现程序机器人程序判断和执行相应的程序块。同理,可以解释 for-endfor 等结构化控制语句。

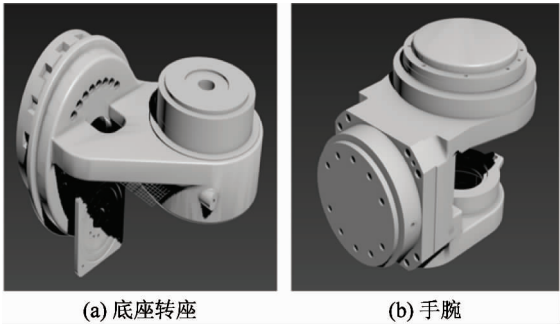


图 9 机械臂关节模型

4 工业机器人 3D 仿真与监控程序的设计

4.1 工业机器人 3D 建模

在 OpenGL 中创建 3D 模型一般有两种方法:即采用自身库 API 进行绘制和利用第三方建模软件进行绘制^[17]。然而自身绘制只能绘制简单的三维图形,所以本研究采用第三方软件进行绘制,利用 SolidWorks 2014 软件对机械臂各关节进行建模,保存为 stl 文件格式,在 3DS MAX2014 转为 3DS 文件^[18],底座转座和手腕模型如图 9 所示。

根据汇博 ER50-C10 工业机器人 D-H 参数建立连杆坐标系,连杆坐标系如图 10 所示,D-H 参数如表 3 所示。

表 3 汇博工业机器人连杆参数

关节	$\alpha_{i-1} (^{\circ})$	$a_{i-1} (\text{mm})$	$d_{i-1} (\text{mm})$	$\theta (^{\circ})$
1	-90	220	-563	θ_1
2	0	900	0	θ_2
3	90	160	0	θ_3
4	90	0	1014	θ_4
5	-90	0	0	θ_5
6	0	0	200	θ_6

根据所建立的工业机器人物理模型进行各部件的装配,装配完整的 3D 模型如图 11 所示

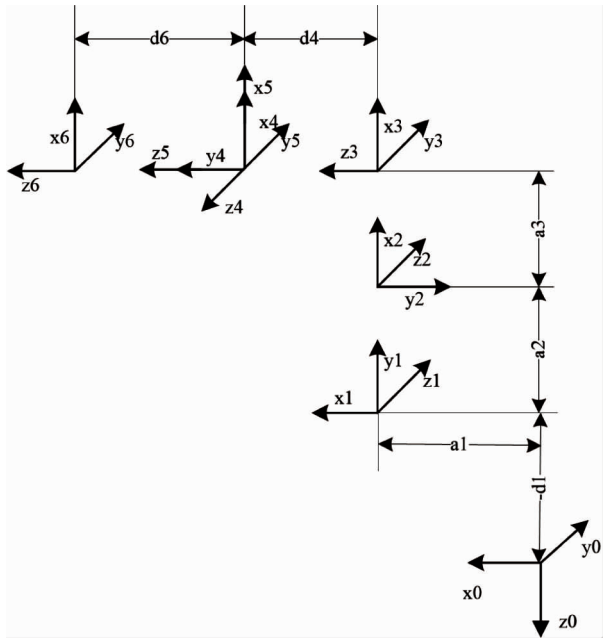


图 10 连杆坐标系图



图 11 工业机器人装配模型图

4.2 工业机器人 3D 动画控制程序设计

3D 动画程序的开发主要利用 QT 对 OpenGL 图形库良好的支持,使用导出的 3DS 文件在已经编好的解析 3DS 文件的 Load3D 类加载模型^[18,19],读取 3DS 文件的数据,绘制动画。

在 QT 中封装的 QGLWidget 类来建立 OpenGL 绘图窗口,进行工业机器人 3D 模型的装配,主要是重写 3 个关键的虚函数,即 initializeGL()、resizeGL() 和 paintGL()。利用 initializeGL() 函数初始化绘图环境和环境光的设置,实现对各工业机器人各部

件的 3DS 文件数据读取,在 resizeGL() 中设置窗口大小及投影方式,再调用 paintGL() 函数绘制 3D 模型。paintGL() 函数在绘制模型时,根据连杆坐标系和各部件的装配关系装配 3D 模型,主要利用 glTranslatef() 去完成在 QT 中 3D 模型的装配并利用 glRotatef() 控制接口在装配的基础上对各关节进行控制。在 resizeGL() 函数中设置观察矩阵,以合适的角度绘制和呈现工业机器人 3D 模型。

在 3D 监控仿真模块程序中通过设置采样周期读取输入寄存器中的关节数据,同时线程周期性读取输入寄存器的关节等实时数据,发送信号去调用 update() 函数激发 PaintGL() 函数,在绘制过程中利用装配模型预留的 glRotatef() 关节控制接口根据当前的关节数据重绘 3D 模型。在绘制过程中 glPushMatrix() 和 glPopMatrix() 函数释放绘图资源,设置合适的采样周期,实时刷新绘图界面,达到实时动画控制效果。

5 人机交互系统的测试与验证

将开发的示教器人机交互程序挂载到示教器中,3D 仿真监控程序在电脑上运行;结合汇博 ER50-C10 工业机器人和实验室机器人运动控制器,对开发的人机交互系统进行测试。

(1) 示教器、控制器与机器人机械本体的联机调试,能够准确地将运动控制指令下发到运动控制器控制机械臂运动,数据接收与发送准确稳定,包含状态数据、参数设置,报警信息等。示教点管理界面和程序编辑运行界面分别如图 12 和图 13 所示。在程序编辑界面编写一段机器人控制指令程序,通过机器人运动控制器,实现了对机器人的运动控制,ER50-C10 工业机器人运动位置与姿态如图 14 所示,实验结果表明了所设计数据通讯程序和机器人程序解释器的有效性。

(2) 当运动控制器选择虚轴时,能够给操作者提供一个平台,进行示教界面和机械臂的虚拟仿真;运动控制器挂载实轴时,可对机械臂进行实时在线操作,实现工业机器人示教和 3D 监控。测试结果如图 15 所示,从位姿 1 和位姿 2 能够看出仿真监控



图 12 示教点管理界面

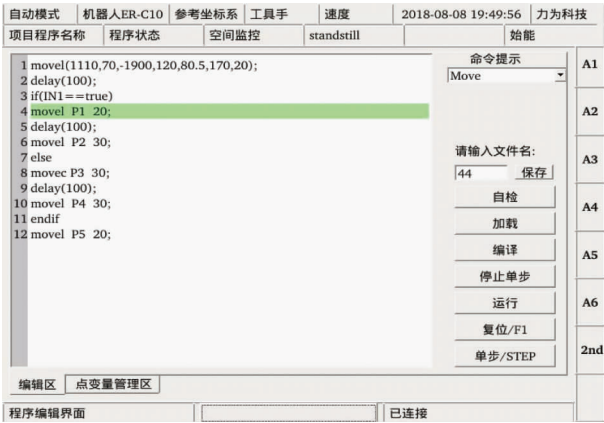


图 13 程序编辑界面

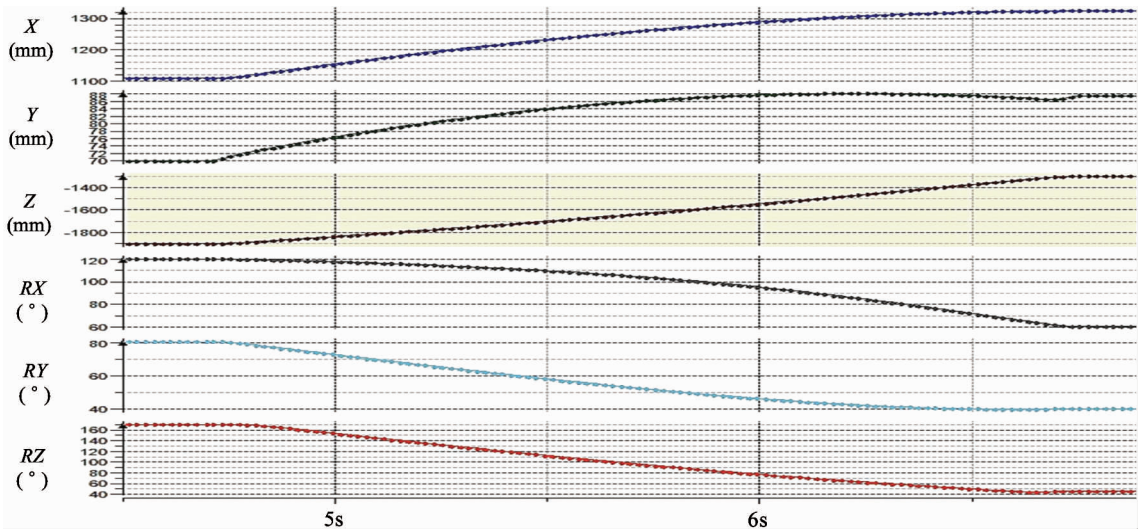


图 14 位置和姿态轨迹

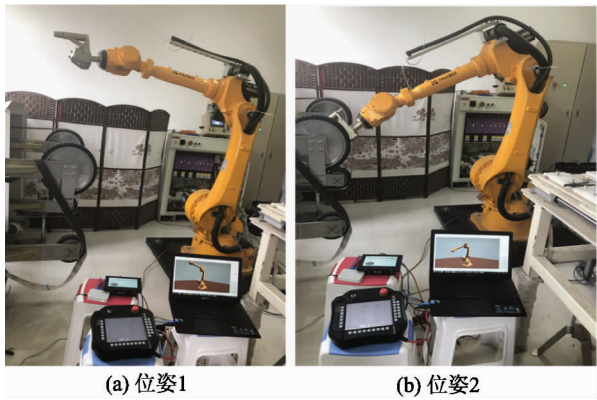


图 15 机械臂实时监控

模块能够跟踪机械臂实时的 3D 运动姿态,具有 3D 交互体验效果。

本交互系统包含传统的示教器交互所需的基本功能,并具有 3D 动态界面显示功能,跟传统的工业

机器人交互系统相比更加直观,交互性更好,集成性更高,还具备传统的工业机器人交互系统不具备的仿真监控功能。

6 结 论

本文研究并设计了基于 QT 的人机交互系统,由示教器和 3D 仿真与监控终端组成。以汇博 ER50-C10 机械本体为研究对象,采用 Modbus TCP/IP 通信技术,SQLite 数据库应用技术,3D 建模技术,OpenGL 类库,Codesys 运动控制系统等实现工业机器人的控制、示教、仿真与监控等功能。此次人机交互系统的设计对实现不同类型的工业机器人控制、仿真和监控界面的开发具有较大的实际应用意义和参考价值。同时本交互系统的性能还有待进一步提

升,由于硬件平台的限制,后续可以将3D仿真监控端集成到移动设备上,并将继续对3D端进行深入研究,以期通过3D界面对工业机器人进行操控和示教,得到更直观、更人性化、更安全、更具沉浸感的人机交互体验。

参考文献

[1] 周济. 走向新一代智能制造[J]. 中国科技产业, 2018 (6): 20-23

[2] 谭建荣. 智能制造与机器人应用关键技术与发展趋势[J]. 机器人技术与应用, 2017(3): 18-19

[3] 刘和彬. 基于VR的工业机器人任务仿真与实时监控研究[D]. 沈阳: 东北大学机械工程与自动化学院, 2013. 14-66

[4] 王田苗, 陶永. 我国工业机器人技术现状与产业化发展战略[J]. 机械工程学报, 2014, 50(9): 1-13

[5] 徐翔, 谈士力. 基于ipad的机器人示教器及控制系统研究[J]. 工业控制计算机, 2016, 29(6): 108-109 + 112

[6] 潘俊浩, 卓勇, 侯亮, 等. 一种基于unity3d的工业机器人示教系统设计方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(7): 110-115

[7] 夏飞虎, 叶瑛歆, 胡天亮, 等. 基于Protobuf的机器人示教器软件设计与实现[J]. 制造技术与机床, 2016 (5): 99-103 + 108

[8] 沈雅琼. 基于WinCE的工业机器人示教器软件设计[D]. 武汉: 华中科技大学机械科学与工程学院, 2014. 1-48

[9] Wicks M, PLC-based robotic controls versus OEM robotic controls: what's the best choice for your application[R]. Intelligrated Inc., USA, 2011

[10] Dai F, Becker O, A PLCopen-based approach for utilizing powerful industrial robot functions in PLC-controlled applications[J]. *Advances in Sustainable and Competitive Manufacturing Systems*, Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer International Publishing Switzerland, 2013. 547-557

[11] 全国工业过程测量和控制标准化技术委员会. 基于Modbus协议的工业自动化网络规范[S]. GB/T 19582—2008, 北京: 中国标准出版社, 2008

[12] 张盛山, 尚文利, 万明, 等. 基于区域/边界规则的Modbus TCP通讯安全防御模型[J]. 计算机工程与设计, 2014, 35(11): 3701-3707

[13] 文生平, 陈端平, 刘其信. 基于QT的激光导引移动机器人监控系统设计[J]. 自动化与仪表, 2016, 31(8): 6-9

[14] 李朝阳, 平雪良, 齐飞, 等. CoDeSys环境下6R工业机器人运动控制研究[J]. 机械设计与制造, 2016 (10): 114-117

[15] 杨杏, 陈富林, 周霏. 基于QT的工业机器人语言系统的设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015 (3): 71-74

[16] 何嘉健, 李伟光. 基于GRETA正则表达式的机器人解释器的研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2012(1): 17-24

[17] 李想, 钱欢, 付庄, 等. 基于QT和OpenGL的机器人离线编程和仿真系统设计[J]. 机电一体化, 2013, 19(4): 56-59 + 88

[18] 刘芳, 刘贤梅. 3DS文件读取、绘制与控制方法的研究与应用[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(19): 4575-4578

[19] 张冬梅, 喻勇涛, 刘志林, 等. 基于OpenGL的机械臂虚拟仿真[J]. 机械制造, 2010, 48(9): 46-49

Design of a human-machine interaction system for industrial robots based on QT

Xu Jianming, Gan Wanzheng, Zhang Wen'an, Yu Li
(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

Abstract

According to the requirements of the industrial robots in human-machine interaction, a human-machine interaction system is designed based on QT development framework and Modbus communication technology. Data communication protocols of the teach pendant, the 3D robot simulation and monitoring terminal and the motion controller are designed by using Modbus TCP/IP communication technology. Under the Linux operating system, a human-machine interaction program of the teach pendant is developed by using C++ programming language, which mainly includes data communication, teaching point management, program editing, and industrial robot language interpreter; In the Windows system, 3D models of industrial robots are established through SolidWorks, and the simulation and monitoring program is developed by using the standard graphical interface OpenGL of the computer. Finally, based on the motion controller developed on PLCopen standard and the Huibo industrial robot ER50-C10 robot teaching, 3D online simulation and real-time monitoring are implemented, and the practicability of the designed human-machine interaction system is verified.

Key words: industrial robot, human-machine interaction, teach pendant, Modbus, interpreter, PLCopen, OpenGL