



桌面级六自由度机器人半实物实验平台技术方案

文件编号:		生效日期:		阶段标记:	
密级:		版次: A/0		受控编号:	
总页数		正文		附录	
编制:		审核:		批准:	

北京灵思创奇科技有限公司

2021年01月

目 录

1 引言.....	1
1.1 概述.....	1
1.2 系统特点.....	1
2 系统设计.....	2
2.1 总体架构.....	2
2.2 硬件架构.....	3
2.3 软件架构.....	4
2.4 开发运行流程	4
3 系统组成.....	6
3.1 桌面级六自由度机器人.....	6
3.1.1 机器人本体参数	6
3.2 实时仿真与控制系统.....	8
3.2.1 实时仿真机.....	8
3.2.2 实时仿真软件包	9
3.3 机器人视觉系统	13
3.3.1 视觉处理装置.....	13
3.3.2 视觉处理软件.....	14
3.4 配套设备.....	15
3.4.1 开发主机.....	15
3.4.2 集成化实验台.....	15
4 系统部署条件	16
5 实验内容.....	16
6 实验示例.....	17
6.1 轨迹规划离线仿真实验.....	17

6.2 空间直线运动快速原型实验.....	19
6.3 视觉标定及缺陷检测实验.....	20

1 引言

1.1 概述

本设备以垂直串联六关节机器人为核心，将机器视觉和机器人运动控制技术有机地进行整合，采用模块化结构，便于灵活组合，实现对不同物料进行快速的检测、抓取、搬运等操作。为了方便实验教学，系统进行了专门的设计，可以完成六自由度机器人单机运动控制和机器视觉检测。

本平台为六关节机器人控制器算法开发验证环境，用户能够基于 MATLAB Simulink 快速搭建机器人控制算法模型，并能自动编译为 VxWorks 实时系统下的可执行代码，下载到实时仿真器后，可替换机器人控制器，直接驱动机器人本体运动。

1.2 系统特点

基于 Links-RT 实时仿真系统的垂直串联六自由度机器人系统具有如下功能：

- **开发环境友好：**基于 MATLAB Simulink 开发机器人控制系统模型，极大降低了机器人控制系统设计的开发难度；
- **机器人实现动作：**单关节动作、多关节联动、空间直线、空间圆弧、吸取物体并搬运等；
- **工业机器视觉：**采用工业级机器视觉处理装置，具备检测数字、物体颜色、物体形状等功能；
- **多样化的调试手段：**支持机器人控制器模型任意参数的在线修改、任意系统变量的在线监测，以及所有观测数据的实时存储、离线回放、数据导出等丰富的开发调试手段；
- **开源示例：**平台提供完全开源的机器人运动学相关算例和培训文档，为高年级本科生的课程设计提供学习参考。

2 系统设计

2.1 总体架构

桌面级六自由度机器人半实物实验平台主要由六自由度机器人、开发主机、实时仿真机、机器视觉系统及集成实验桌组成，系统的典型流程是：

- 1) 开发主机在 MATLAB 环境下首先完成机器人数学仿真,进行轨迹规划实验、正逆运动学数字分析实验等;
- 2) 机器视觉系统首先检测目标工件位置、形状等信息,然后形成控制指令,通过以太网发送到机器人控制器(或实时仿真机);
- 3) 机器人控制器(或实时仿真机)自动生成机器人末端轨迹信息,再通过机器人逆运动学解算,实时控制机器人六关节驱动器;
- 4) 机器人六关节驱动器实时驱动关节电机转动,使机器人末端装置运动到期望位置,并完成抓取、搬运等操作。

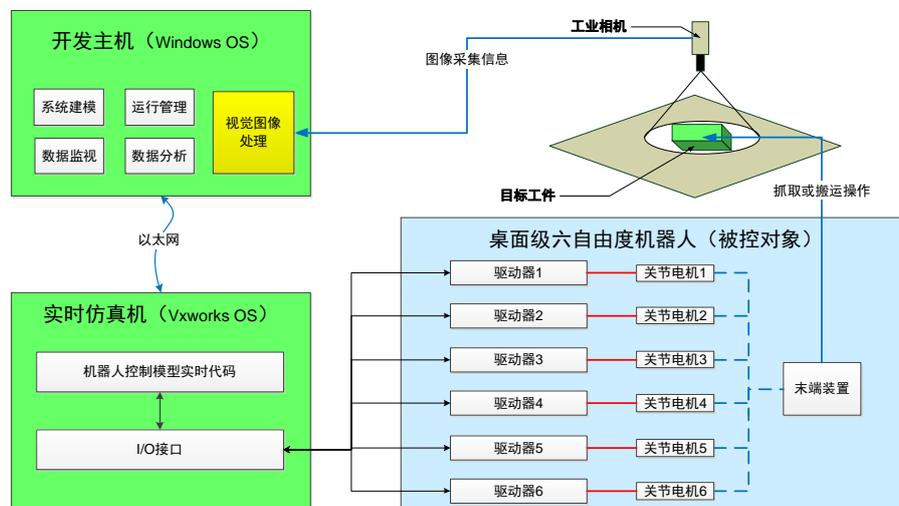


图1 系统总体架构图

2.2 硬件架构

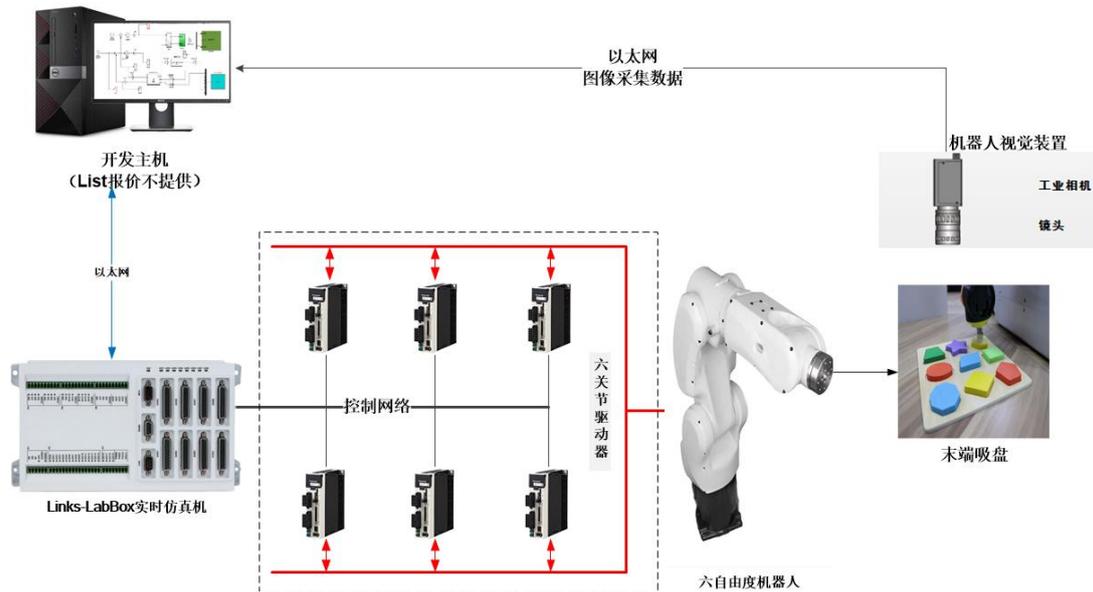


图2 硬件构成图

图 2 为平台系统硬件构成图，主要包括如下：

- 1) 开发主机：1 台 Windows 计算机，完成机器人系统建模、图像处理以及实验运行管理等；
- 2) 实时仿真机：1 台商业级嵌入式实时仿真设备等效机器人控制器，实时解算机器人控制模型；
- 3) 六自由度机器人系统：1 台垂直串联桌面级 6 轴机器人，及其驱动器、末端执行器等；
- 4) 配套设备：除了上述设备外，本系统还包括机器人集成实验台、电磁阀、继电器等。

备注：为保障实验人员的安全，机器人上电工作时，实验人员只能在开发主机端操作，不可进入机器人工作区域，断电后才能到机器人工作区更换目标工件、连接线缆、调试照相机等操作。

2.3 软件架构

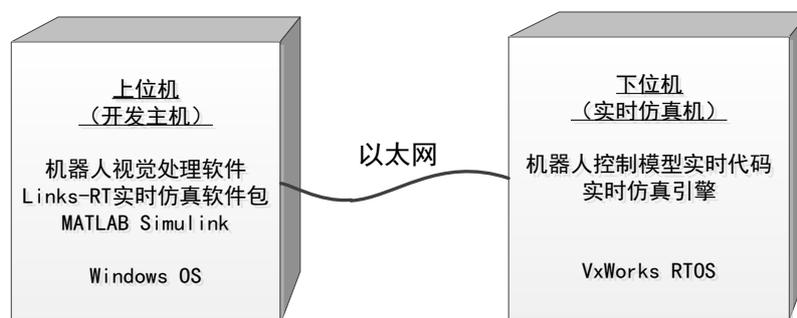


图3 软件构成图

平台软件分为“上-下位机两部分”，主要包括：

- 1) 上位机软件：基于 Windows 操作系统，提供系统建模、机器人视觉处理和实验运行管理等功能。
 - a) 建模软件：基于 MATLAB Simulink 创建自定义机器人控制仿真模型；
 - b) 实时仿真软件：平台提供 Links-RT 实时仿真软件包，支持用户的 Simulink 模型自动编译为实时仿真代码，并下载到实时仿真机中运行；
 - c) 机器人视觉处理：兼容 IMAGE 所有系列相机，通过以太网与机器人控制系统数据交换，相机 I/O 同步信号可配置，相机图像数据开放，配置常规图像处理算法；
- 2) 下位机软件：基于 VxWorks 实时操作系统，实现机器人控制系统模型的实时计算。
 - a) 机器人控制实时代码：由用户基于 MATLAB Simulink 开发，并且已自动转换为 VxWorks 系统上可直接运行的二进制代码文件；
 - b) 实时仿真引擎：实时引擎 RT-Engine 是 Links-RT 实时仿真软件包的一部分，部署在 VxWorks 系统上，为用户模型的启停操作、数据记录、上下位机通信等提供底层运行支持服务。

2.4 开发运行流程

使用 MATLAB Simulink 建模环境结合 Links-RT 实时仿真软件包，用户可按照 6 个步骤实现从建模到硬件在环仿真的全过程。下图给出了流程示例。

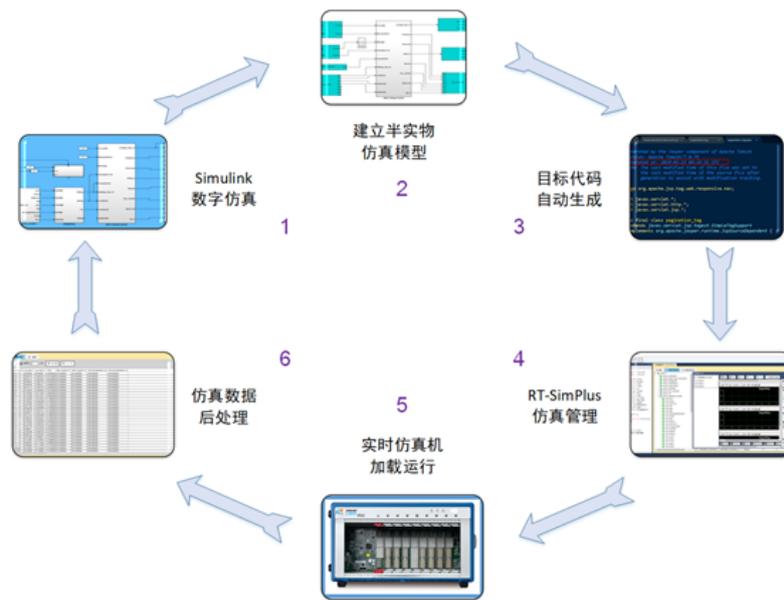


图4 仿真系统工作流程

- (1) **Simulink 下的数学仿真。**首先，在 **Simulink** 环境下建立机器人数学模型，通过在 **Simulink** 下的数学仿真，初步验证模型及算法。
- (2) **加入 IO。**在 **Simulink** 数学模型中，根据实际需要从 **RT-Lib** 模块库中添加 **IO** 模块（典型的可接入机器人实物），如 **UDP** 网口、串口、**D/A**、**A/D** 等，即用硬件接口关系代替原来的逻辑连接关系，并对 **I/O** 参数进行配置。
- (3) **自动代码生成。**用户完成 **HIL** 模型参数设置后，即可调用代码生成工具 **RT-Coder**，将 **Simulink** 模型转换为 **C** 代码，并编译为可执行程序。
- (4) **建立仿真工程。****RT-Sim Plus** 管理环境中，根据软件向导，建立仿真工程，设置仿真目标机属性，配置监视及保存变量，准备仿真。
- (5) **硬件在环实时仿真。**在 **RT-Sim Plus** 环境下，点击【启动】，仿真开始，代码自动下载到目标机，并启动实时运行，与真实设备通过 **IO** 硬件进行交互。上位机的 **RT-Sim Plus** 通过以太网监视目标机状态，并支持在线修改参数、启停控制、实时数据存储等功能。
- (6) **数据后处理。**仿真结束后，**RT-Sim Plus** 进行实时存储数据上传、格式转换（支持 **txt**、**xls**、**mat** 等格式）、数据回放等，能够与 **MATLAB**、**Excel** 等工具无缝集成，并能够进行简单的数据处理。

3 系统组成

3.1 桌面级六自由度机器人

3.1.1 机器人本体参数

605 轻量型机器人,外形小巧、重量轻,是最适合用于组装小型单元机器人,能够高速、高精度的完成上下料、分拣、装配等各项工作。同时所有机器人线缆内置,能够在狭小的空间灵活的进行作业,安装方式可以选择地面安装、挂装、倒装。

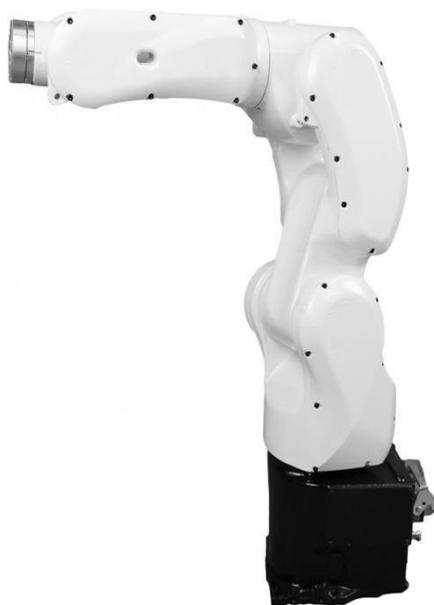


图5 605 轻量型机器人

具体参数如下:

- 轴数: 6 轴
- 手腕负载: 3kg
- 最大工作半径: 540mm
- 重复定位精度: $\pm 0.3\text{mm}$
- 本体重: 28Kg
- 工作温度: $0\sim+40^{\circ}\text{C}$
- 关节角度:
 - 1 轴: $\pm 170^{\circ}$;

- 2 轴: $\pm 110^\circ$;
- 3 轴: $-220^\circ \sim +40^\circ$;
- 4 轴: $\pm 185^\circ$;
- 5 轴: $\pm 125^\circ$;
- 6 轴: $\pm 360^\circ$
- 最大单轴速度:
 - 1 轴: $370^\circ/s$;
 - 2 轴: $370^\circ/s$;
 - 3 轴: $430^\circ/s$;
 - 4 轴: $300^\circ/s$;
 - 5 轴: $460^\circ/s$;
 - 6 轴: $600^\circ/s$;
- 应用: 装配、物料搬运等
- 配件: 物料盘和轨迹板等



图6 轨迹板和物料盘实物图

3.2 实时仿真与控制系统

实时仿真与控制系统是实现机器人控制的核心，采用“上-下位机”架构，上位机是一台 Windows 开发主机，用户通过 MATLAB Simulink 完成机器人控制系统设计，经自动编译后生成 VxWorks 实时系统上可直接运行的嵌入式代码，然后通过以太网部署到实时仿真机（下位机）中实时运行做为机器人的控制器原型使用，控制机器人各关节的运动，并采集相关传感器数据，形成闭环控制回路。

3.2.1 实时仿真机



图7 Links-LabBox 实时仿真机外观图

Links-LabBox 实时仿真机是一款小型化的紧凑型半实物仿真设备，性能强大、接口丰富。既能满足实验室环境下使用，也能应用于现场宽温、震动等恶劣环境。

Links-LabBox 实时仿真机硬件配置如下：

型号	Links-LabBox
CPU	Intel® Atom™ 1.66GHz 双核处理器
存储	4GB 电子硬盘
内存	2G DDR3
重量	2kg
体积	287mm(长) x 160mm(宽) x 78mm(高)
工作环境	工作温度：0°C ~ 55°C； 储藏温度：-10°C ~ 70°C； 湿度：5%~90%，非凝结； 抗振动：正弦振动 GB/T 2423.10； 抗冲击：机械冲击 GB/T 2423.5； 跌落：1.5 米跌落测试；
IO 通道	<ul style="list-style-type: none"> ● 8 路 DA； ● 8 路脉冲输出（带方向）； ● 16 路 DI，16 路 DO； ● 8 路正交编码器输入；
计算机接口	2 路 USB2.0，2 路 100M/1000M 自适应 LAN，1 路 VGA，1 路 PS2

3.2.2 实时仿真软件包

实时仿真软件包由 6 个模块组成：

- 1) 主控软件 RT-Sim Plus：运行于 Windows 操作系统，实现仿真全过程管理；
- 2) IO 模块库 RT-Lib：集成于 MATLAB Simulink 环境中，提供 IO 模块的配置；
- 3) 实时代码生成组件 RT-Coder：集成于 MATLAB Simulink 环境中，实现由 MATLAB Simulink 模型自动生成 VxWorks 目标代码；
- 4) 目标机实时仿真引擎 RT-Engine：运行于 VxWorks 操作系统之上的仿真引擎，为模型提供实时运行环境；
- 5) 机器人运动学控制库 RT-6DOF- Kinematic：基于 MATLAB/SimuLink 开发的 6DOF 机器人运动学控制模型，包括轨迹规划、正/逆运动学解算、插补算法等；

3.2.2.1 主控软件 RT-Sim Plus

RT-Sim Plus 作为 Links-RT 的主控软件，将 Simulink 中的模型文件以及生成的代码文件导入，建立对应的仿真工程，并完成仿真初始化配置。RT-Sim Plus 运行于 Windows 操作系统，实现实时仿真全过程管理。功能包括：

- 仿真工程管理：支持多仿真工程，每个仿真工程支持多个仿真模型，支持设定仿真模型与实时目标机的映射关系；
- 模型解析与配置：以树形层次结构列出 Simulink 模型中所有子系统及其包含的参数、变量，便于设定仿真过程中需监视、记录的模型参数、变量；
- 模型参数管理：支持仿真过程中在线单个/批量参数调整，支持模型初始参数文件加载以设定仿真场景，自动同步其他节点对模型参数的修改；
- 模型变量监视：支持模型中任一可见模块信号的监视（无需修改模型），支持 t-y、x-y 型曲线监视；
- 仿真数据管理：支持数据保存设置，支持从目标机自动上传实验数据，支持 mat、xls、txt 格式转换，支持数据回放；
- 目标机状态监视：自动监测多目标机状态，辅助用户确定连接机制；
- 多种连接机制：在目标机空闲状态下，可向其加载仿真模型；在目标机运行状态下，可获得运行信息，对仿真过程进行监控；RT-Sim 关闭后不影响目标机运行，并能够再次恢复对目标机控制；

- 提供一组图形化输入输出组件，包括曲线、表盘、旋钮、开关等，支持用户以拖拽方式快速搭建虚拟仪表界面。自动获取模型参数和信号表，并与显示组件建立映射关系，可以直观方便的监视并修改模型参数以及信号表。

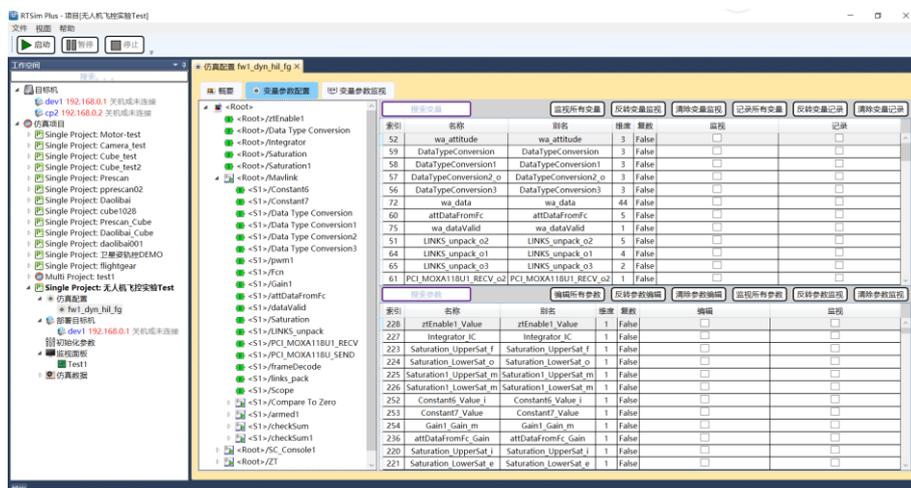


图8 主控软件截图

3.2.2.2 IO 模块库 RT-Lib

RT-Lib 是 Links-RT 系统集成于 MATLAB Simulink 环境中的功能模块库，是对 Simulink 工具箱的补充和扩展，提供了系统中所用 I/O 硬件的 Simulink 封装模块，使用户能够直接将硬件 I/O 功能集成到 Simulink 模型中，设计硬件在回路仿真模型。功能包括：

- **I/O 接口库：**目标机 I/O 硬件的 Simulink 封装模块，包括 1553B、ARINC429、AFDX、CAN 等总线接口以及模拟量、数字量等非总线接口，支持在 Simulink 模型中直接调用并进行简单的参数配置，即构成硬件在环模型；支持生成高效 VxWorks 目标代码；
- **异步模块库：**支持软件中断与硬件中断，支持在 Simulink 中自定义任务，包括周期任务以及由事件触发的异步任务，支持任务间同步，支持外部时钟源，尤其适用于嵌入式设备功能仿真；
- **网络通讯库：**提供 UDP 通讯模块，支持模型与外部软件的网络通讯。

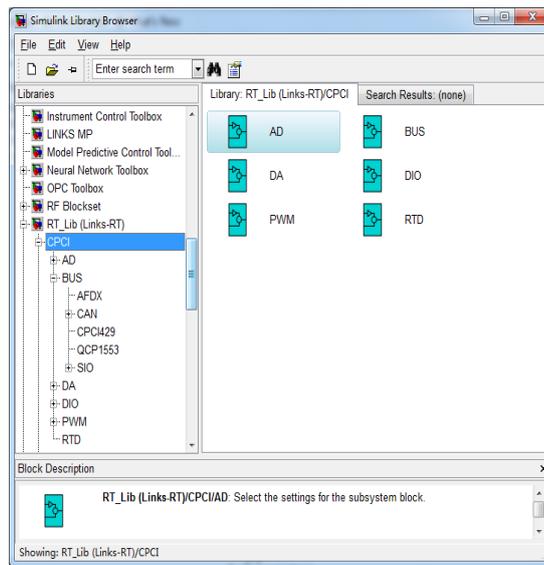


图9 Simulink 模块库截图

3. 2. 2. 3 实时代码生成组件 RT-Coder

实时代码生成组件 RT-Coder 集成于 MATLAB Simulink 环境中，实现由 MATLAB Simulink 模型自动生成 VxWorks 目标代码。功能包括：

- 提供系统 TLC 文件及 Makefile 模板文件，配置编译选项及编译环境，支持 VxWorks 目标代码自动生成；
- 集成 GNU 编译器，支持 x86 系列处理器；
- 可选板载时钟源或外部时钟源；
- 支持任务优先级、堆栈大小设定；
- 支持外部模式/非外部模式设定。

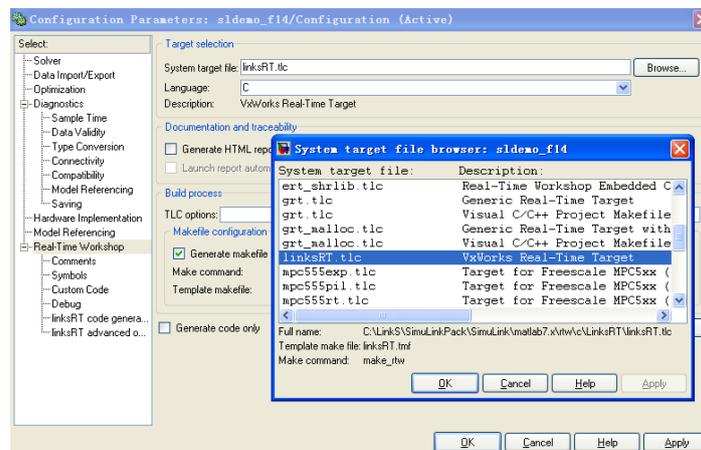


图10 代码编译器截图

3.2.2.4 目标机实时仿真引擎 RT-Engine

RT-Engine 是运行于 VxWorks 操作系统之上的仿真引擎，为模型提供实时运行环境，包括：仿真机启停控制、FTP 文件传输服务、数据通讯服务、数据存储服务、模型调度服务等。

3.2.2.5 机器人运动学控制库 RT-6DOF- Kinematic

基于 MATLAB/SimuLink 开发的 6DOF 机器人运动学控制系统模型，包括轨迹规划、正/逆运动学解算、插补算法等。

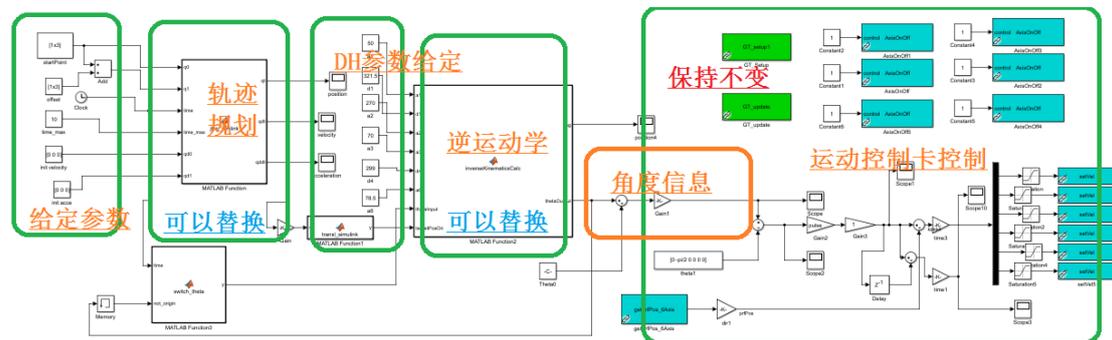


图11 MATLAB Simulink 环境下的机器人运动学控制模型

机器人的控制算法模型如上图所示，首先根据给定的起始位置、终点位置、最大速度、最大加速度、最大加加速度、仿真步长等信息，计算插补过程中每一仿真步长的位移，然后分别映射到笛卡尔坐标系中的 XYZ 坐标上，再进行逆运动学运算转化为各个关节的相对角度信息（相对于零点），最后通过 EtherCAT 网络实现机器人各关节的角度控制输出和反馈。

3.3 机器人视觉系统

机器人视觉系统是指通过机器视觉产品（即图像摄取装置，分 CMOS 和 CCD 两种）将被摄取目标转换成图像信号，传送给专用的图像处理系统，根据像素分布和亮度、颜色等信息，转变成数字化信号；图像系统对这些信号进行各种运算来抽取目标的特征，进而根据判别的结果来控制现场的设备动作，是用于生产、装配或包装的有价值的机制。

3.3.1 视觉处理装置



图12 彩色工业相机

1) 彩色工业相机

- a. 500 万像素彩色相机,主要产品特点:
- b. 1/2.5 inch Aptina CMOS 感光组件 (MT9P006)
- c. 2,592×1,944(5MP), 高达 15fps
- d. 卷帘快门
- e. 外触发及数字 I/O 输入
- f. 底座与多数模拟相机兼容

2) 镜头

- a. 靶面尺寸: 2/3"
- b. 焦距(mm): 8
- c. 最大成像尺寸(mm): 8.8×6.6(11)
- d. 最小物距(M.O.D)(m): 0.1
- e. 控制光圈: 手动
- f. 聚焦: 手动

3.3.2 视觉处理软件

机器人视觉处理软件兼容 IMAGE 所有系列相机，通过以太网与机器人控制系统数据交换，相机 I/O 同步信号可配置，相机图像数据开放，配置常规图像处理算法。提供 C#或 C++的开源 SDK（要求兼容 VS2013 或以上），并提供相关例程，软件兼容 WIN7/WIN10 操作系统。

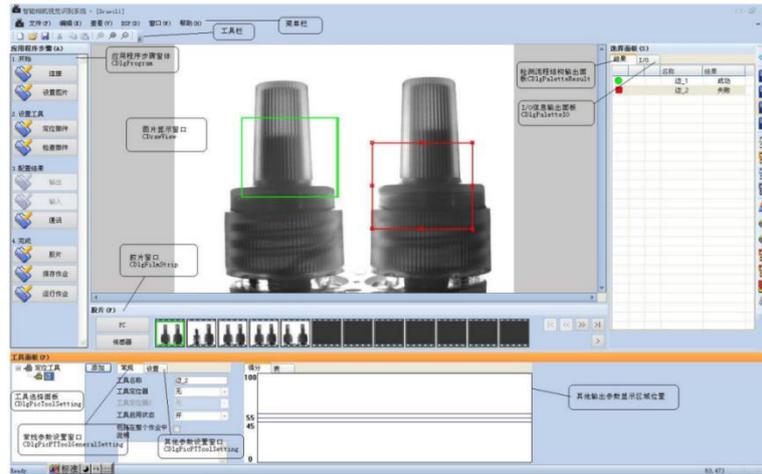


图13 机器人视觉处理软件

系统提供可视化的操作方式，支持用户鼠标式命令操作，键盘键入系统工作参数，界面友好。用户接口集中在主界面层，主要通过窗体、控件、对话框等可视化元素进行交互操作、设计。

3.4 配套设备

3.4.1 开发主机

开发主机基于 Windows 系统，是整个平台的开发控制核心。运行 MATLAB/Simulink 建模环境，进行机器人系统建模仿真；使用 Links-RT 仿真软件包软件实现对仿真运行试验的启停控制、在线监控、数据后处理等操作。

详细指标参数如下：

- 品牌：联想 M4000s；
- CPU：酷睿 I5-9400 六核 2.9GHz；
- 内存：8GB DDR4 2666MHz；
- 硬盘：1TB；
- 显示器：23 英寸（1920x1080 分辨率）；
- 光驱：DVD 刻录；
- 主板：集成显卡、千兆以太网卡；
- 附件：鼠标，键盘，鼠标垫。



图14 开发主机（联想 M4000s）

3.4.2 集成化实验台

集成化的实验台将与桌面型六自由度机器人本体配套，集成机器人、实时仿真机、物料盘、轨迹板等。四角安装万向轮便于移动，并有地脚用于固定支撑。



图15 机器人集成化实验台示例

4 系统部署条件

1. 输入电源：单相三线 220V±10%，50Hz±1%
2. 工作环境：温度+5°C~+45°C；相对湿度≤95%（25°C）
3. 装置容量：2kW
4. 平台尺寸为：1440mm×1200mm×800mm（长*宽*高）
5. 安全保护：具有漏电保护，安全符合国家标准

5 实验内容

(1) 《机器人学基础》实验

- a. 机器人机械系统与控制系统认知实验
- b. 机器人示教编程与再现控制
- c. 机器人坐标建立与正运动分析实验
- d. 机器人逆运动学分析实验
- e. 机器人动力学分析实验
- f. 机器人关节控制分析实验
- g. 机器人轨迹规划离线仿真实验
- h. 机器人空间直线运动仿真实验

- (2) 《图像处理与机器视觉》实验
 - a. 机器人视觉与成像认知实验
 - b. 图像的基本处理实验
 - c. 图像增强与分割实验
 - d. 图像特征提取实验
 - e. 机器视觉目标识别实验
- (3) 《机器人系统集成与应用》实验
 - a. 视觉分拣机器人工作站集成实验
 - b. 码垛机器人工作站集成实验
 - c. 搬运机器人工作站集成实验

6 实验示例

6.1 轨迹规划离线仿真实验

基于 MATLAB 开发的六自由度机器人的轨迹规划仿真软件 sxTeach，为学生初步学习机器人轨迹规划和运动学正逆解算法提供了离线仿真环境。试验界面如下图所示，可以完成如下功能：

- 配置 DH 参数；
- 设置各个关节角度；
- 设置末端位置；
- 编辑运动轨迹；
- 轨迹规划；

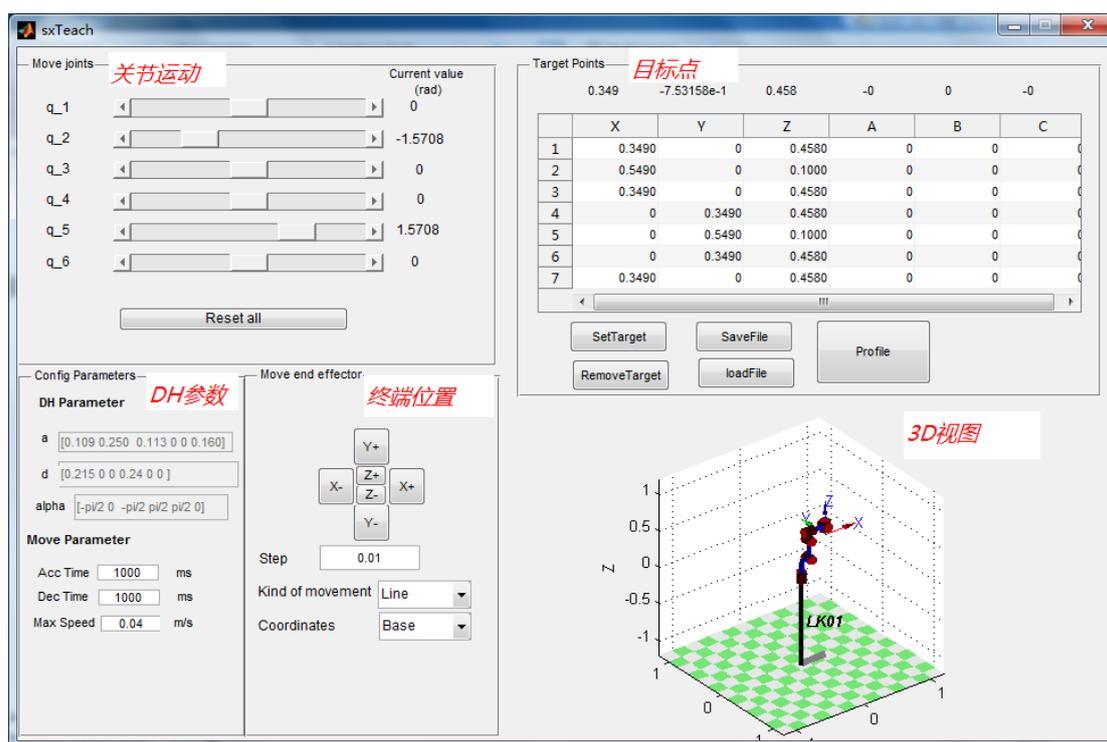


图16 轨迹规划仿真软件 sxTeach

单击 Profile 按钮，执行轨迹规划操作，经过正逆解运算后，直接得到六个关节角度曲线。

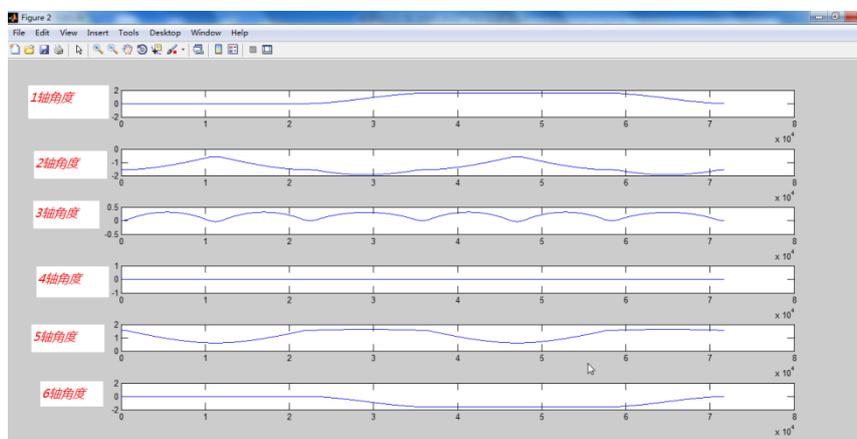


图17 六个关节角度曲线

轨迹规划仿真软件 sxTeach 的后台运算采用 M 语言编写，且所有源代码均向用户开放。

图18 正逆运动学代码

6.2 空间直线运动快速原型实验

在完成机器人离线仿真实验的基础上，本平台更多地是使用真实的机器人实物本体作为控制对象。用户基于 MATLAB Simulink 可快速完成机器人控制算法的开发，经自动编译后生成 VxWorks 实时系统代码，最后实时代码部署到实时仿真器中运行，并通过多轴运动控制卡实现对机器人各关节的控制。

如下图所示，基于 MATLAB Simulink 开发六自由度机器人控制系统模型，包括了轨迹规划算法模型、逆运动学算法模型、单轴速度控制模型、六轴电机编码器反馈模型等。

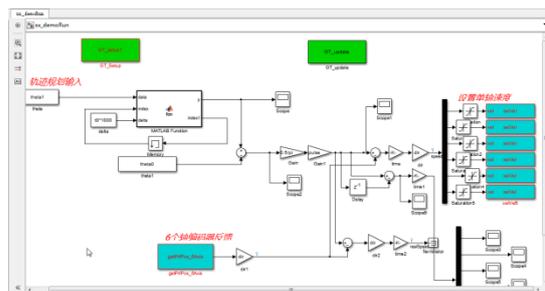


图19 六自由度机器人控制系统模型

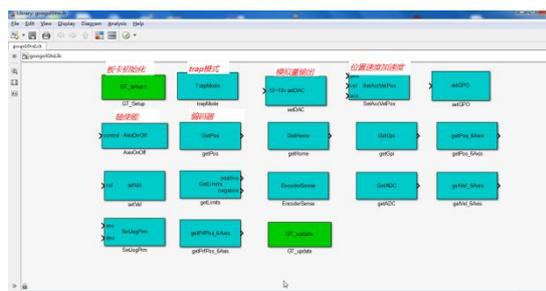


图20 运动控制硬件模型库

在六自由度机器人控制系统模型中，我公司主要提供了控制算法示例模型和运动控制的硬件模型库。用户可基于本实验示例，任意替换机器人控制模型的各个算法模块，在无需关注底层软硬件接口实现的前提下，快速验证自己的机器人控制系统算法模型。

6.3 视觉标定及缺陷检测实验

视觉系统在使用前，首先需要完成视觉与机器人关联的标定工作，本系统提供了相机内参标定、外参标定，以及 ETH 手眼标定实验。



图21 手眼标定截图

缺陷种类繁多（瑕疵、划痕、斑点等），且不同产品的生产工艺衍生出缺陷也是五花八门，导致外观缺陷检测一直都是视觉检测领域的难点问题。

- 1) 先做平均滤波，再做动态阈值分割。

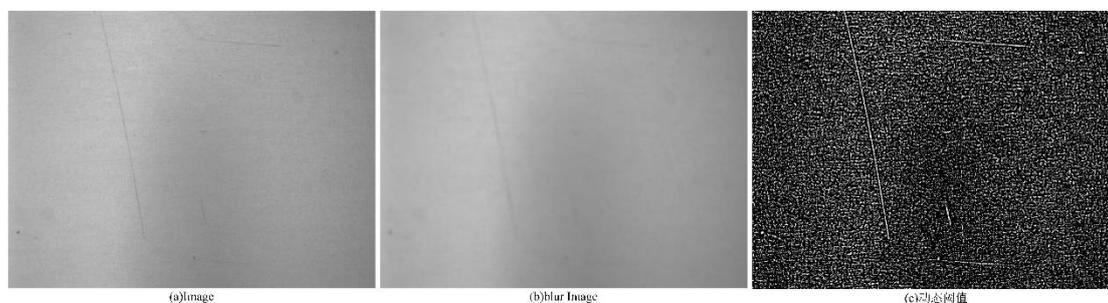


图22 动态阈值分割

- 2) 去除小的连通域，并用膨胀操作连接狭小的缝隙口，合并划痕。

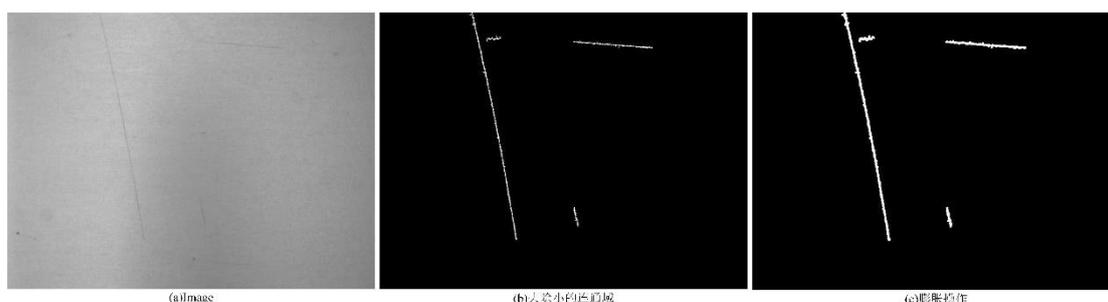


图23 去除小区域和膨胀操作

3) 根据区域的面积区分小划痕和大划痕，并在原图中显示出来。

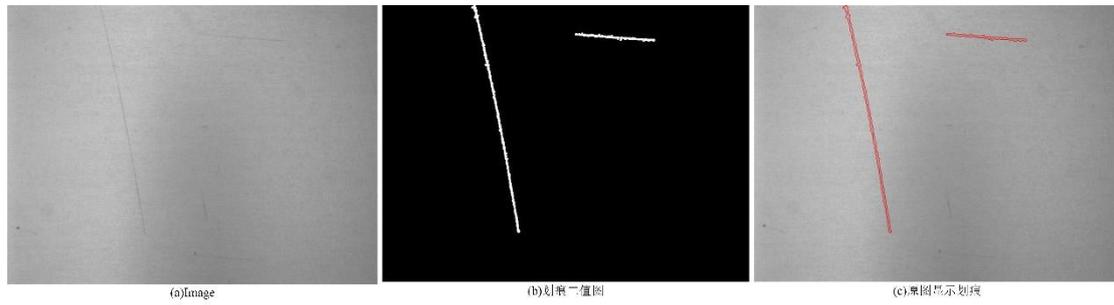


图24 找到划痕