

# 具有机器视觉五轴工业机器人控制平台的设计

## 摘 要

本文研究对象是具有机器视觉的工业机器人控制平台，系统使用数学建模为工业机器人建立机械坐标系，并引入机器视觉技术来获取工件及其周围环境中的图像信息，再使用图像学处理手段去除信号噪波，提取出目标工件的坐标信息，并驱动机器人模型来完成对目标工件的坐标定位、抓取和分类摆放等操作，课题研发出一套完整的低成本、较高可靠性的五轴工业机器人智能控制系统。

本文主要的研究流程如下：提出了一种简易但可靠性较高的计算机单目视觉的技术方案；通过建立数学模型对整个五轴工业机器人的工作区域进行了坐标系标定；利用 PC 机的高性能数据处理能力编程实现对机械手臂位置与姿态的分析与控制；通讯系统则采用了有线串口控制方式来建立上下位机的数据传输通道，同时也引入了 Bluetooth 无线通讯技术来实现短距离无线控制调节；通过对微处理器的编程优化，有针对性地对本系统的伺服电机实现了多轴联动控制；根据工业机器人软件控制平台的特点，采用了虚拟仪器编程软件 LabVIEW 来对上位机的数据融合部分提供工业级的分析处理。最后做出实物模型进行了实践验证。

本文所研究开发的控制平台创新之处在于：①用模块化编程模式弱化了对特定硬件系统的依赖而提升了软件可移植性；②独特的“点对点”运动控制算法设计，区别于以往复杂的运动学迭代方程计算，同时继续保障了其对控制精度的要求；③针对小资源 MCU 芯片单线程工作模式在控制多个伺服电机联动上的乏力，提出了一种全新的“分段式”任务调度模式，在不使用多线程处理芯片或更高级芯片的情况下完成了对机械手的控制设计任务。

**关键词：**工业机器人； 机器视觉； 图形分拣； 姿态计算； 上下位机通讯

# **Design Of The Five-axis Industrial Robot Control System With Machine Vision**

## **Abstract**

In this paper, we study the control platform of industrial robot with machine vision system. Mathematical Model is used in the system, which builds the mechanical Coordinate system for industrial robot. And the machine vision technology is introduced in order to get the information of artifacts' image and the surrounding environment. The system uses the image processing method to remove the signal noise, then it can get the coordinates of the work-piece and drive the robot model to complete such the operation as coordinate setting、fetching and assortment of the work-piece. We find an intelligent control system of the five-axis industrial robot with low cost and high reliability.

The mainly research process of this paper is as follows: we put forward an easy and high reliable technical proposal with the computer monocular vision; we define the coordinate system for the five-axis industrial robot by the mathematical model; it can analyze and control the position and posture of the mechanical arm by programming on the PC with high-performance Data Processing; communication system adopts the wired serial control mode to establish the data transmission channel of the upper and lower machine, and also it introduces the Bluetooth wireless communication technology to realize the short-distance wireless control; through the programming and optimization of the microprocessor, the servo motor realizes the multi-axis linkage control; according to the characteristics of the industrial robot control software platform, the virtual instrument software Lab-view is utilized to analyze and deal with data fusion part of the upper monitor. Finally, the physical models are verified.

In this paper, the innovation of this system lies in: ①the modular programming can weaken the dependency of the specific hardware system and enhance the portability of the software; ②the special “point to point” control algorithm design is different from the complex algorithm kinematics iterative equation ,while it can assure the control of precision; ③The single-threaded mode of little resource MCU controls multiple servo motor on the weak linkage, so the fresh segmented scheduling model is put forward, and it can finish work without the use of multi-threaded processing chip or more advanced chip case.

**Key words:** Industrial Robot; Machine vision; Graphic Sorting;  
Calculating Posture; Computer Communication

# 目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
1 绪 论.....	1
1.1 工业机器人的现状与发展趋势 .....	1
1.2 机器视觉技术在工业机器人中的应用 .....	2
1.3 课题研究的目的与意义 .....	4
1.4 本文所研究的主要内容.....	5
2 控制平台方案设计 .....	7
2.1 机器人系统结构设计.....	7
2.2 机器视觉控制系统方案设计 .....	9
2.2.1 采集相机的选取 .....	9
2.2.2 采集相机的定位与环境光源模式的选择 .....	9
2.2.3 采集相机的取景的物理优化.....	10
2.3 机器视觉控制系统的人机交互设计 .....	12
3 单目视觉方案的标定与实施 .....	13
3.1 图像获取与处理方案的选择 .....	13
3.1.1 LabVIEW 虚拟仪器软件的选用 .....	13
3.1.2 图像处理系统总体设计思路.....	13
3.2 目标物件图像的获取与处理 .....	14
3.2.1 单帧图像的获取 .....	14

3.2.2	图像的处理分析 .....	15
4	运动控制卡方案设计 .....	20
4.1	坐标系的标定 .....	20
4.2	机械手臂的位姿分析.....	21
4.2.1	位姿描述.....	22
4.2.2	建立简化的数学模型 .....	23
4.2.3	运动位姿角度的标定 .....	25
5	视觉控制系统设计与运动算法实现 .....	30
5.1	基于 LabVIEW 的机器视觉系统设计.....	30
5.2	基于 Arduino 运动控制卡方案设计.....	31
5.3	视觉系统与机器人运动控制卡的通信 .....	33
5.4	抓取目标物件实验.....	35
6	控制系统性能分析、优化与改进 .....	38
7	总结与展望.....	40
7.1	本课题总结 .....	40
7.2	展望 .....	41
	参考文献.....	42
	附件 1 运动控制卡原理图（实验引用非原创设计） .....	44
	附件 2 运动控制卡源码层次分析.....	45
	附件 3 LabVIEW 上位机前面板 .....	47

# 1 绪 论

## 1.1 工业机器人的现状与发展趋势

机器人作为 20 世纪最伟大的发明之一，近些年来在现代先进生产制造业起到越来越重要的作用。与此同时其在家庭应用领域也正在逐步推进，为千万家庭的生活带来前所未有的便利与变革。机器人技术的发展必然会对人类未来的发展起到强有力的推动作用。

在工业应用领域，对工业机器人的深入探讨与研究具有非常重要的意义。它们不仅仅可以让人类摆脱枯燥、单调的重复劳动和危险恶劣的作业环境，而且相对于人工的效率与品质保障，工业机器人有着其无可比拟的优越性。机器人严格按照控制系统所设计的最优方案，时刻保持高效可靠的状态，全天候无休止的不间断工作。因而广受各行各业需求者的青睐。目前工业机器人实际运用的领域大部分集中在汽车、航空航天这样的重工业领域，从事着冲压、热处理、焊接、涂装、电镀、塑料制品成形、机械加工、简单装配、搬运、码垛等各类繁重或对人体有伤害的作业。伴随着工业机器人技术研究的深化与成熟，相信工业机器人会在未来的工业领域中，在半自动化生产系统变革到全自动化柔性制造系统(FMS)的飞跃中发挥不可替代的关键作用。

从目前的工业机器人应用状况来看，大部分应用在重工业巨头企业，其中有一个至关重要的因素便是由于直居高不下的价格，虽然经过多年的技术改良与成本控制，工业机器人的价格相比于过去已经下降许多，但相对于中小企业来说，仍然是一笔价格不菲的“奢侈品”，这个让目前工业机器人的发展受到了很大的制约。不过随着经济浪潮的影响，全球范围内的劳动力成本的急剧上扬，而工业机器人的成本随着技术发展又不断下降，这就给工业机器人提供了一个难得的市场扩张契机，其应用量在未来几年内将实现较快速度的增长。

纵观国内外工业机器人现状，不难发现工业机器人的研发生产已经被众多国外厂商占据大半“江山”，像日本的 FANUC、安川电机，瑞典的 ABB 机器人、德国的 KUKA 等都是国际知名的工业机器人厂商，他们所生产的机器人也代表了当今世界工业机器人的最高技术水平<sup>[1]</sup>。

我国的工业机器人起步比较晚，同时又面临了诸多国际贸易条约中的技术封锁，所以初期发展的异常艰辛。随着国家的重视工业机器人的研究工作被纳入国家计划中，有了资金与人才技术合作上的支持，其发展速度明显加快，使得我国机器人技术的研究不断取得了重大成果。例如在我国沈阳建立的国内最大的工业机器人研究与生产产商新松机器人便是此重点项目中孕育的产物，代表着国内机器人自动化领域最高水平。

对机器人技术的研发涉及到多学科交叉运用，与之相关的有机机械设计与分析、电子设计、计算机仿真、通讯、控制协调等多个方面。仅就其分类来说，按低级到高级的发展程度，机器人便可分为以下几类：第一代机器人，只能工作在示教再现模式下；第二代机器人，带有一系列相关的传感器设备用来感知外界数据信息，然后通过自反馈调节适应对应的工作环境；第三代机器人为智慧型机器人，具有多种感知功能，可进行复杂的逻辑推理、判断及决策，可独立行动在作业环境当中，具有发现问题并自主决策解决问题的能力，这类机器人具有高度的自适应性和自治能力；第四代机器人，其为情感机器人，它具有与人类相似的情感，情感型机器人是机器人技术发展的最高层次<sup>[2,3]</sup>。

就目前的工业机器人来说，其正朝智能机器的方向发展，即上述分类中的第三类智慧型机器人，技术特点为：功能结构的模块化；控制接口的开放化；信息网络化；多传感器数据融合化；系统设计的冗余化和作业的柔性化等方面<sup>[4]</sup>。

## 1.2 机器视觉技术在工业机器人中的应用

机器视觉技术也叫计算机视觉技术，机器视觉就是用机器代替人眼来做测量和判断。机器视觉系统是指通过图像摄取装置将被摄取目标转换成图像数据信息，然后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，转变成对应的数字化信号，图像系统对这些信号进行各种运算来抽取目标的特征，进而根据这些特征作出判别，控制现场的设备动作。

正是由于机器视觉技术本身所拥有的诸多先天性优越条件，在工业机器人应用领域得到了很好的应用。国外在对机器视觉的理论基础部分起步较早，在实践中加以运用并取得了很多突破性成果，例如 ABB 公司开发的 FlexPicker IRB360 的并联结构拾取机器人（如图 1-1 所示），具有操作速度快，占用空间面积小等优势，在机器视觉系统的帮助下，可以实现两次/秒的速度快速拾取传送带上的

物品；ESPON 公司开发的视觉工业机器人（如图 1-2 所示）则是通过机器视觉技术完成对流水线上的不同物件进行精确的分类回收；2007 年日本机器人顶级荣誉获得者——FANUC 公司的超快双臂工业机器人系统（如图 1-3 所示），该系统装配有两个 M-430iA 机器人手臂和可视跟踪功能的食品、药品操作系统，它的每只手臂每分钟可以精确的拾取 120 件物品且可以每天 24 小时不间断的工作；生产流水线上广泛使用基于机器视觉的工业机器人（如图 1-4 所示），这样让其拥有更强适应性，能够对作业目标进行识别操作<sup>[1]</sup>。



图 1-1 ABB 公司展示的 FlexPicker 工业机器人

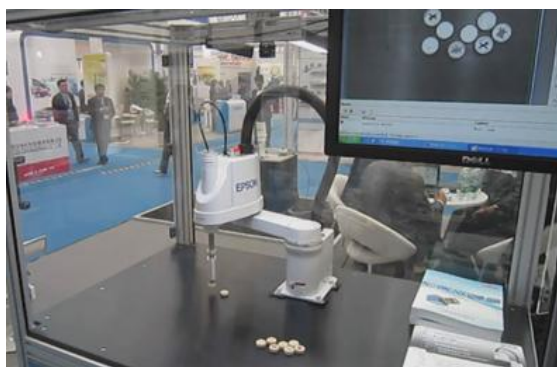


图 1-2 EPSON 公司展示的分拣机器人



图 1-3 FANUC 公司的超快双臂工业机器人系统





图 1-4 生产线上的码垛与卸垛工业机器人

### 1.3 课题研究的目的与意义

作为工业机器人的主要分支之一的搬运机器人，自诞生以来便广受各行业从业人士的青睐，在众多已应用的工业机器人的总数当中，搬运机器人也占有了相当大的比例，其应用行业也广泛分布于食品、医药、电子、机械加工以及物流等领域，可见搬运工业机器人已经作为一个新的经济增长点在推动着社会的发展。

目前在自动生产线上应用的搬运机器人系统大多都是上文中总结的第一类机器人，即以示教再现的运动方式运行的工业机器人，通过预先定义的编程模式实现点到点的运动，如果工作环境发生少许的变化，那么就得进行一次大规模的编程“洗礼”，这种模式对于工业机器人从业人员来说是一件非常耗时的事情，极大的消耗了从业人员的脑力，同时也浪费了计算机丰富的计算资源，而且工作在这样一种模式下的工业机器人也无法完成像分拣排序等这样的复杂动作。基于以上考虑，工业机器人对计算机视觉技术的引进就显得至关重要了。在增加少许成本的前提下（采集相机与数据采集卡是必要的），机器人通过计算机视觉的技术，能够对工作环境中的目标进行精准的识别，这将大大提升整个搬运机器人的工作效率与可靠性。

本文所研究的是一种低成本、较高可靠性的工业机器人控制平台，不刻意仿照目前市面上具体某一型号的搬运工业机器人，通过对控制平台工作原理的分析与改进，在此基础上搭建了一套物理模型来论证本文的论点，以展示其可行性。本文的研究意义在于通过引进计算机视觉技术，对传统的第一代工业机器人进行改进，通过使用计算机视觉技术对目标物体及其周围环境的检测，从所获得的原始数据中进行分析识别得到目标物体的方位信息，让计算机决策控制系统输出控制脉冲，从而控制五轴机械手臂对工件目标完成定位抓取、分类放置等操作。这

不但提高了搬运工业机器人的效率与可靠性，而且也扩展了应用领域，这将对国内企业搬运工业机器人的发展研究与技术改造具有现实意义。

## 1.4 本文所研究的主要内容

本文的研究对象主要分为软硬件两个层面：硬件方面所采用的是以传统 PC 机作为主控制核心，辅以 Arduino 开源硬件为运动控制卡，机械手臂关节选用 Power HD 公司推出的 Power HD 1501MG 模拟舵机（一种微型伺服电机）为受控核心，120W 开关电源通过 DC to DC 稳压模块为机械手臂提供动力电（PC 除外）；软件方面则是以 LabVIEW 开发出上位机工作界面，以 C 语言编程对 Arduino 开发板进行下位机运动控制算法开发，图像分析处理类算法使用 OpenCV 函数库进行分析验证，数学模型分析则使用 Matlab 进行验算论证。

本文所研究的方法是利用视觉传感器（即采集相机）采集工件目标的位置信息，使得五轴工业机器人能够通过运算先对工作区域内的目标外观进行分析排序，然后驱动机器手对准目标进行定位抓取，最后对抓取目标进行分类摆放，本文中所出现的被识别目标为矩形和圆形两类。

本文的层次结构主要分为七个章节来分析：

第一章首先对工业机器人的现状与发展趋势进行介绍，紧接着便是分析了机器视觉技术的优势以及在工业机器人应用领域中使用这项技术的重要意义，再进一步阐述了本课题的研究目的与意义，最后给出了本课题的主要内容的具体分析安排；

第二章介绍了单目视觉体系的五轴工业机器人控制平台方案设计，包括元件选材、光源的选取、硬件平台的搭建，视觉技术采用方案以及控制方案的分析；

第三章将就机器视觉控制平台的视觉的分析与实践做出详细的说明，包括计算机视觉技术的原理实现与数字图像分析处理流程介绍；

第四章的着重点将放在运动控制卡方案的具体设计方案，先对机械坐标系与图像坐标系以及摄像机的位置做出标定，再提出一种专门针对本课题搭建的工业机器人模型所优化的运动控制方案；

第五章将会对以第三、四章为理论基础所搭建的软硬件模型以及功能模块进行分析介绍；

第六章将从系统可靠性和系统优化这两个方面来对本控制系统进行综合性性能分析与判定；

第七章将是本文的最后一章，是对本文探索研究课题的一个总结，并结合亲身体会展望今后需要更进一步拓展研究的方向。

## 2 控制平台方案设计

本章将对整套基于机器视觉的五轴工业机器人控制系统的各个环节进行详细的介绍和说明。系统从功能结构上细分为：图像采集、上位机图像处理、下位机运动控制、机器人本体以及相关稳压供电模块这五大层次。

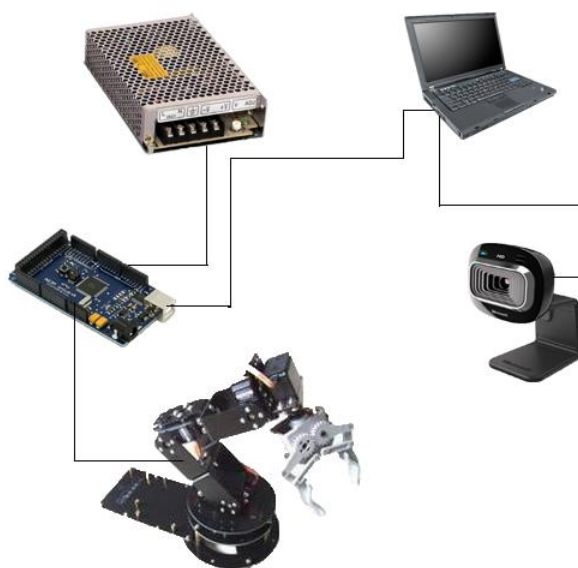


图 2-1 基于机器视觉控制平台系统组成图

在本文搭建的验证模型中所选用的器件为：摄像头使用了微软公司的 HD3000 型摄像头；上位机控制端使用普通的 PC 机，这里使用的是笔记本电脑，操作系统平台使用了 Windows 7 系统；运动算法控制板的硬件部分采用的是开源硬件平台开发板 Arduino mega 2560 R3，运动控制算法为自行设计；机械手臂部分采用了支撑架结构并以航模模拟舵机为主运动关节；动力供电部分采用的是 AC 220V to DC 12V 的开关电源，后经稳压模块让输出电压为 DC 6V（标准舵机正常工作电压）。

### 2.1 机器人系统结构设计

本文所搭建的机器人模型主体结构主要分为本体和运动控制板这两个部分。

机器人本体部分又可细分为微型伺服电机（这里选用的是常见的航模模拟舵机）、承载部分和物件抓取部分。结构如图 2-2 所示。结构上继承了工业机器人

的特点，主要由旋转底座、承载臂、大臂、小臂和手腕五个主运动部分，添加机械爪作为执行末梢以实现抓取功能。各个功能部件之间的连接部分都分布了航模模拟舵机来作为机器人的关节轴。由于对机器人的坐标有影响的关节是旋转底座、承载臂、大臂、小臂和手腕，爪子部分仅仅是为了实现抓取动作，对实际运动控制没有影响，故此机器人只能定义为五轴六自由度机器人。

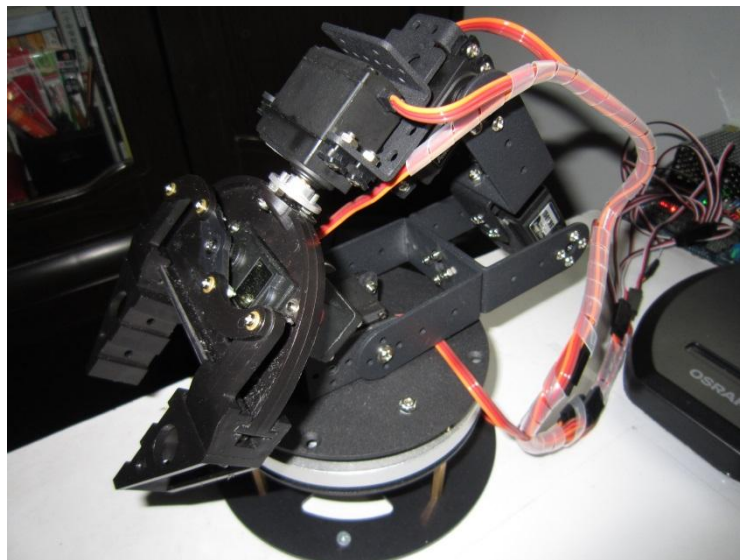


图 2-2 机器人结构本体实景

机器人运动控制卡选用了开源硬件平台——Arduino，此次设计所采用的开发板具体型号为 Arduino mega 2560 R3 作为硬件载体，之所以没有采用自制 PCB 板，主要因素是从时间成本和经济成本的角度来考虑的。此次设计旨在开发一套低成本、高可靠性的自动化控制解决方案，最大程度降低对硬件系统的依赖，重点在软件系统的集成设计。故此选用了目前在全球范围内推广的开源硬件 Arduino 标准化平台，运动控制卡设计如图 2-3 所示：



图 2-3 运动控制卡与供电模块实景

## 2.2 机器视觉控制系统方案设计

### 2.2.1 采集相机的选取

本次设计中所采用的是视频采集装置为最普通的 USB 摄像头，从采集性能的角度来考虑，最好能使用分辨率不低于  $640 \times 480$ 、采集帧率不低于 30 帧/秒的 CMOS 成像元件的摄像头（市面上家用摄像头通常为 CMOS 成像）。图像采集设备的质量好坏对后续图像分析处理起着不可替代的作用。在计算机视觉系统里面的分析处理流程可分为图像获取、图像处理、图像理解和图像存储等功能模块，但是图像获取却是所有流程的前提。工业上应用的相机通常选用的是 CCD 芯片，工作效果比普通的 USB 摄像头的摄像效果好。

### 2.2.2 采集相机的定位与环境光源模式的选择

在机器视觉领域中，还有一些会直接影响到图像采集设备成像效果的关键因素便是采集相机摆放角度和环境光照强度。有过拍摄经历的朋友都知道对于同一个景致在不同角度、不同光照强度下所拍摄意境是各不相同的，同样的道理，采集相机的采集瞬间所保存的图像质量好坏也与这两个因素密切相关。

对于相机摆放角度，在众多工业机器视觉控制系统的应用当中，常被广泛应用的方式是镜头垂直于待测目标物件向下，视距高度以镜头视野范围完全覆盖工作区域为准。

对于环境光的设置通常情况下有如下几种常见方式：直接照明光源模式、散射照明光源模式、背光照明光源模式、同轴照明光源模式和特殊照明光源模式。

直接照明光源模式就是光源直接照射到被检测物体上，它的特点是照射局域集中、亮度高和安装方便，可以得到清楚的影像。常见的直接照明方式有沐光方式、低角度方式、条形方式和聚光方式。

沐光方式常用的是 LED 环形光源，如图 2-4 所示。高密度的 LED 以阵列形式排列在伞状结构中，可以在照明区域产生集中的强光<sup>[5]</sup>。被检测的物体在图中所示的 Work 区域。在实验中，我们采用的是沐光光照模式。



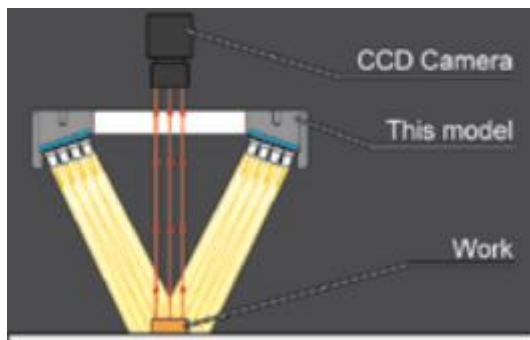


图 2-4 沐光光照模式

该种照明方式的优点是亮度大、灵活、容易适应包装要求；缺点是：阴影和反光；常见的应用应用是：检测平面和有纹理的表面。其照明效果如图 2-5 所示，左边是实物图，右边是照明效果图，可以看到，在沐光方式下，芯片表面的字迹显示的非常清晰<sup>[6]</sup>。

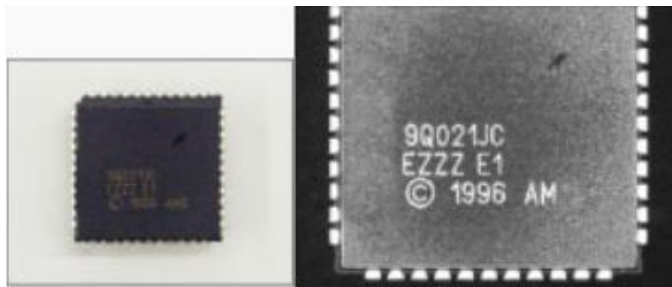


图 2-5 沐光光照模式效果图

## 2.2.3 采集相机的取景的物理优化

在确定好光源模式后，还可以通过一定其他的技术手段对照片进行物理上的优化，常用的方式有两种：色彩增强与使用滤光片。

### 2.2.3.1 色彩增强技术

对于不发光体来说又可分为透明体和不透明体两种，大部分是不透明体。不透明体都具有反射或吸收不同波长的色光的能力，被吸收掉的色光我们是看不见的。只有反射回来的色光才直接作用于我们的眼睛，所以我们看到的不透明体的颜色是反射光的颜色。如果用红光照射红色的物体，能得到最高的亮度；若用红色光照射绿色物体，可以得到最低的亮度，或者说图像几乎是黑色的，因为绿色物体基本不反射红色光。用一种颜色照射它相对的颜色，基本是黑色；照射其它颜色，物体亮度依次增加；照射同样的颜色，可以得到最大的亮度。所以，适当的选择光源颜色，可以增强图像的对比度。图 2-6 展示了 BGA 焊点分别在红

色光和蓝色光下的成像实例；在红色光下，芯片中央的条纹依然清晰可见(图中)，这为引脚检测引入了一些干扰；在蓝色光下，芯片中央的条纹基本看不见了，仅留下 BGA 焊点的影像，便于后续检测。

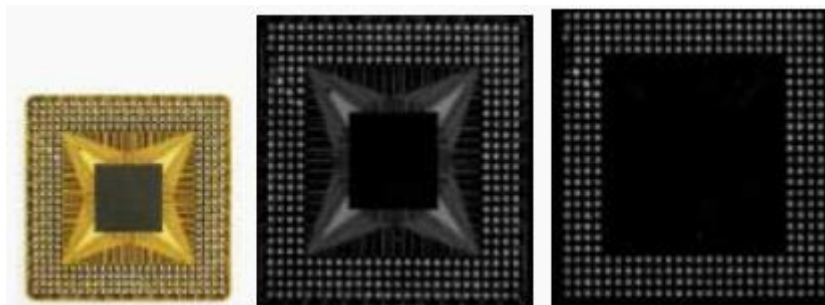


图 2-6 BGA 引脚分别在红色光和蓝色光下的成像实例

### 2.2.3.2 滤光片的采用

消除不必要的数据和噪声可以加快有用信息的处理速度。如果有条件使用滤光镜，可以限制进入相机光线。常见的滤光镜有偏光镜、波通镜和阻隔镜。它们的作用类似滤波器，滤掉符合一定条件的信号，保留得到预先设定的信息。

在本次实验中，考虑到待测目标的体积小于光源的发散体积，实验场景类似于太阳光在地球某一小块日照面的平行光效果，同时实验的主要识别方式是待测目标的外轮廓，所以选择了直照沐光光照模式来作为本实验的光源设置方式，实验实景图如图 2-7 所示。

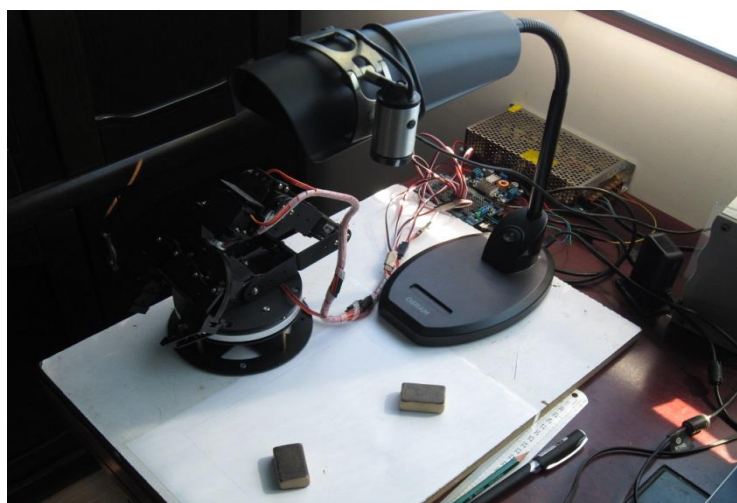


图 2-7 沐光光源模式下的实验实景

本实验中台灯的灯光为本实验系统的主光源，在机器视觉系统运行之前应该打开它，然后测试得到环境光阈值，以方便后期机器视觉系统 GUI 界面的参数调节。



## 2.3 机器视觉控制系统的人机交互设计

本次设计具有机器视觉的五轴工业机器人控制平台的控制流程图大致可以分为四个步骤：PC 机端的 GUI 程序作为控制总台，负责对待测目标的图像数据采集、分析和处理，同时会将处理得到的待测目标的工件坐标通过串行通信的方式实时发送给下位机，再由下位机根据运动控制算法对坐标信息进行解析，最后发送 PWM 脉冲信号对机器人本体进行精确控制。控制系统作业图如图 2-8。



图 2-8 控制系统作业流程图

### 3 单目视觉方案的标定与实施

如何让机器人能够快捷准确地检测到目标物体？需要解决的是设计一套合理的图像识别处理方案。这里采用的是在于 LabVIEW 平台下的单目视觉处理方案。该方案能够正确识别图像，分离出待测图形目标，完成图像坐标系与机械坐标系的坐标信息转换。

#### 3.1 图像获取与处理方案的选择

##### 3.1.1 LabVIEW 虚拟仪器软件的选择

在设计的初始阶段计划采用的研究模型都是在纯 C/C++ 编译环境下的 OpenCV (Open Computer Vision) 计算机视觉库中实现的，这是一套应用体系完整的开源数字图像处理软件包，设计中所有流程的原型都取自对 OpenCV 的算法实现，但是在后期进行上位机工作界面设计的时候发现需要花费大量的时间与精力，考虑到开发进度以及后期可维护性的因素，不得不舍弃此套方案，不过对整套视觉分析处理体系的思路却都继承下来，这也使在 LabVIEW 虚拟仪器平台的开发特别的顺利。借助使用 LabVIEW 虚拟仪器强大的自带控件库以及机器视觉开发包，可以方便地实现本实验系统的上位机工作界面的综合设计。

##### 3.1.2 图像处理系统总体设计思路

在实验的控制系统平台中，图像信息来自于 USB 摄像机所采集的 32 位 RGB 彩色图像。在图像输入后，对采集来的彩色图像进行灰度图像转换操作，将彩色图像转换为灰度图，此过程在色彩学里面有个专业的名称叫做抽色；接着便是对灰度图进行阈值分析处理，为的是让目标物件与背景色层进行初步分离，得到阈值图；之后便是对得到的阈值图进行二值化处理，经过此步操作后的图像信息将会只剩下 0 与 1 所对应的黑与白的数值信息，方便计算机对目标物件的分割处理；经过二值化处理后的图像信息中会出现比较多的噪点与空洞，此时则需要对二值化图像进行形态学分析，所应用到的处理过程技术叫做“形态学腐蚀”和“形态学膨胀”；完成了形态学处理后，图像图形的几何特征就比较明显了，这个时候使用颗粒匹配这种图像分割技术将图形信息提取出来，再经过匹配运算就可以分

辨出图形的形状了；最后的操作便是通过颗粒图像分析处理步骤来对所提取到的颗粒图像进行信息筛选与处理了。在本实验中所开发的这套图形识别算法着重识别矩形与圆形图案，算法分析将在后面的章节中有具体的分析。

图像处理系统的设计流程图如下所示：

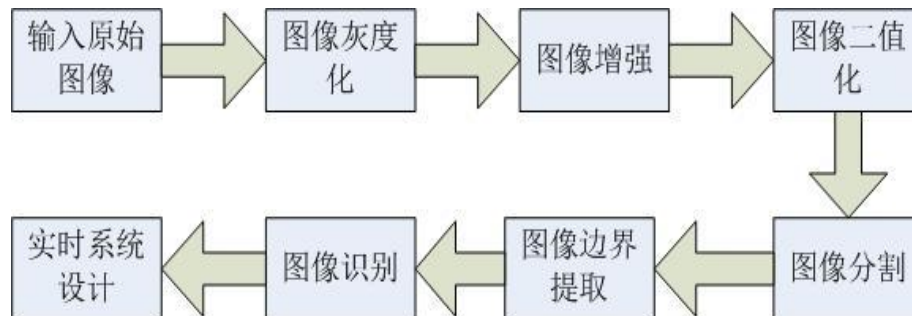


图 3-1 图像处理系统设计流程图

## 3.2 目标物件图像的获取与处理

### 3.2.1 单帧图像的获取

本实验案例中选用的 USB 摄像头（COMS 感光元件）通过 USB2.0 传输通道接口可将抓取拍摄到的数字信号传输到控制 PC 中去，控制 PC 可以完成视频中的单帧数字图像的采集，数字图像在计算机中是以二维数组的 0 与 1 的编码存在，所存在的最大像素点即为摄像头的最佳采样分辨率，这里选用的是  $640 \times 480$ ，640 代表的是图像在水平方向上的像素点个数，而 480 则是图像在垂直方向上的像素点个数，这样，每一帧的数字采样图像便可最大容纳  $640 \times 480$  个像素点。采集到原始图像信息如图 3-2 所示。

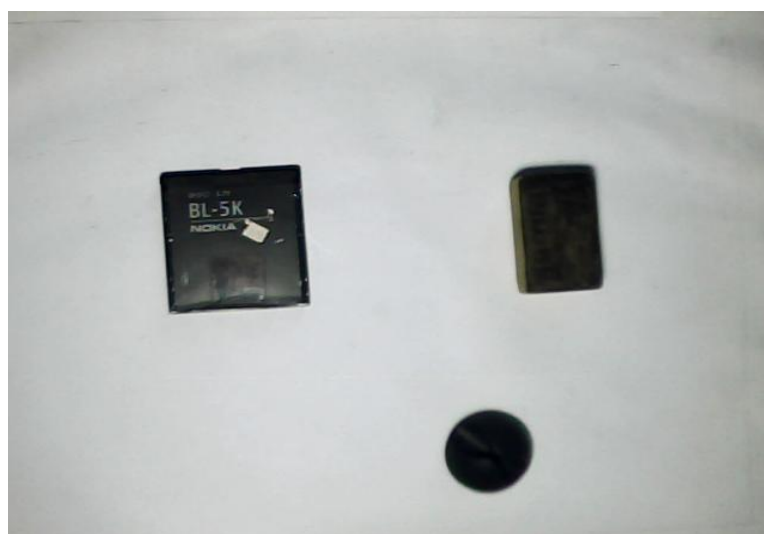


图 3-2 USB 摄像头采集到的原始图像

### 3.2.2 图像的处理分析

图像处理部分的主要实现流程是图像信息的灰度化、数字图像的阈值反转、图像的二值化处理、数字图像形态学处理、图像分割技术和颗粒中心坐标分析生成等。

#### 3.2.2.1 图像信息的灰度化

从 USB 摄像机设备采集而来的原始图像信息为 32bit 的 RGB 彩色图像，这种图像对于计算机图像处理来说，包含了过多的冗余信息。图像处理着重强调的是图像之间的特征匹配转换，通常决断也常常限制于 0 与 1 之间，这样不仅仅能加快计算机的图像处理速度，而且还能更为准确的提取所需目标的轮廓。

使用数字设备所采集到的数字图像信息，通常情况下都为彩色图像（少数特殊用途的单色相机除外）用来模拟重现大自然的颜色（实际上大自然的色彩数量远远不止这个量级），而彩色图像中的每个像素点都存在 R、G、B 三个色彩分量，这便是光的三原色。每个色彩分量中又包含了 255 个分色值，这样便可以让 RGB 色彩模型所能表现的颜色变化多达 1600 多万（ $255 \times 255 \times 255$ ）种，灰度图像是 R、G、B 色彩体系中的一种特殊色彩形式，它出现的情况便是当 R、G、B 三个色彩分量的信息值相等时便会出现一种灰度颜色，其中的  $R=G=B$  所表现的值便是灰度值。因此，灰度图像每个像素只需要一个字节的单位空间存放灰度值（又称为强度值、亮度值），变化的范围则是在 0-255 之间。灰度化后的图像信息如图 3-3 所示。

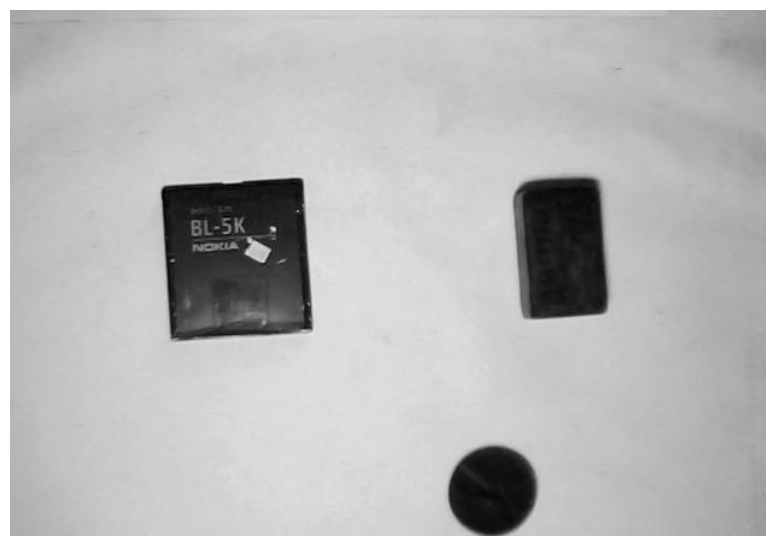


图 3-3 灰度化处理后的图像

### 3.2.2.2 图像信息的阈值反转与二值化

在实现了图像的灰度化操作之后，接下来的工作便是要对图像进行阈值反转与二值化，两者的操作实际上都为了让目标工件图像信息与背景色分离，达到图像分割的目的。

在得到的灰度图像信息后，此时图像中的灰度值仍然分布比较分散(0-255)，所以需要将所得到的灰度图像进行一个阈值划分判别。阈值判别法就是通过获取灰度图像中各个像素点亮度值的大小后，再来对该像素点进行分类处理，再通过图像二值化处理后便会分为 0 或者 1，即人眼所视的白色和黑色，所设定的判定值的名称叫做阈值<sup>[7]</sup>。

阈值设定的作用便是先给定一个具体的灰度数值，当处理灰度图像时，灰度图像中的像素点的灰度值小于这个设定值便会被标记成 0，当大于这个值时便会保留数值，再通过图像二值化处理后的图像将保留的数值进行标记成 1，这样最后得到的图像信息就变成了一张单一的 0 与 1 单通道色彩图。灰度图像二值化的数学形态如下：

$$f(x, y) = \begin{cases} 1 & f(x, y) > T \\ 0 & f(x, y) \leq T \end{cases} \quad (3-1)$$

对于阈值的标定，常用的选取方法为自动阈值标定与手动阈值标定。在自动阈值标定法中，由于图像采集的阈值信息即便是在稳定光源情形下，也跟环境光强度的变化息息相关，环境光强的变化会对实验中所使用的稳定光源造成不可逆转的影响，所以在自动阈值标定法中，需要收集环境光变化值的信息，绘制得到光强与阈值变化相关的曲线图，需要根据光线传感器收集到的环境光信息来选取合适的阈值；而手动阈值标定法相对而言比较简单，通过人为地设定一个阈值来进行判定，不过此法应用的要求：需要在稳定光源的环境下进行实验，而且在实验期间环境光对实验的影响必须可以忽略不计，甚至完全不造成任何影响。在本实验中，为了简化外围电路设计，同时也采用了相对理想的实验环境，故选用了手动阈值标定法进行实验。目标工件表面被涂黑，工作台则是选用白色背景，两者色彩对比度明显，便于后期图像处理工作。实验地点选在室内进行，环境光相对稳定光源光强来说非常微弱，对实验的进行不会造成客观上的影响。阈值二值化后所得到的图像如图 3-4 所示。

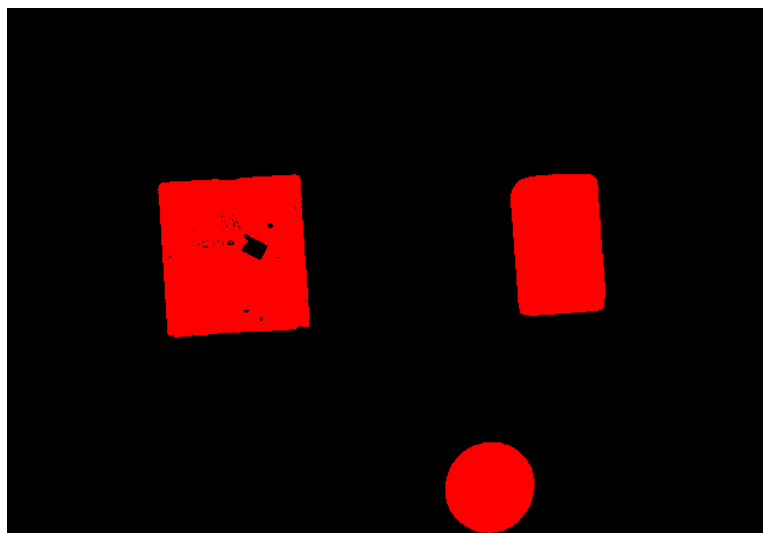


图 3-4 经过阈值二值化后处理的图像

### 3.2.2.3 数字图像形态学处理

常见数字图像形态学运算有腐蚀（Erosion）和膨胀（Dilation）两种。腐蚀：就是删除对象边界某些像素；膨胀：就是给图像中的对象边界添加像素。通常情况下，图像形态学处理中我们感兴趣的主要是二值图像，因为经过图像形态学处理之后的二值图像信息将会把目标物件的外形特征充分暴露出来，让外形轮廓更加清晰。这样更加便于识别确认以及后阶段的处理工作。此处采用了膨胀形态学处理技术，经过数学形态学图像处理后的图像如图 3-5 所示。

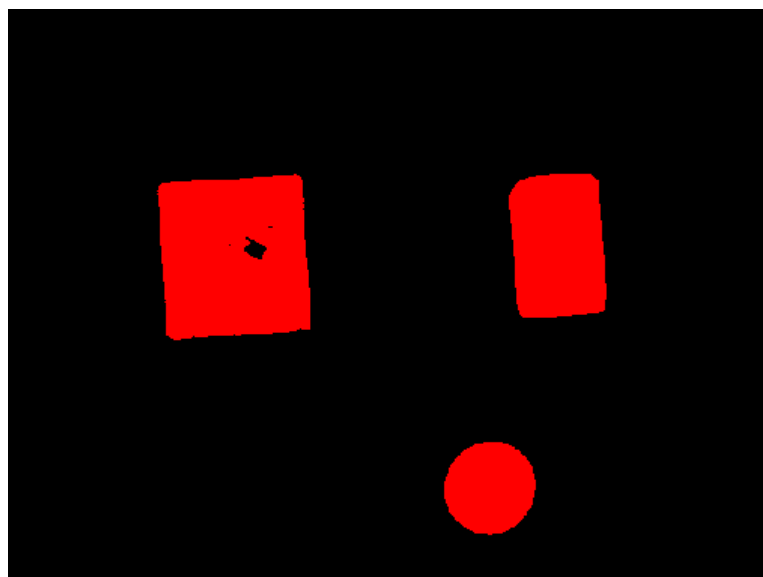


图 3-5 经过膨胀形态学处理过后的图像

### 3.2.2.4 数字图像分割技术

在通过灰度、阈值反转二值化以及形态学处理后的数字图像往往依然不能达到我们的要求，因为在图像中依然存在许多冗余的信息，图片质量依然显得很毛糙，这个时候就需要采用图像分割技术来对数字图像进行修补工作，通过对图像中各个特征区域的修补裁剪处理，提取出 ROI（Region Of Interest）区域。

图像分割的技术细节当中，这一片 ROI 常常被称为目标或者前景（相对应的其他信息部分叫做背景），为了得到这一部分细节，所需要采用的方法便是需要将这一部分信息从众多背景或者干扰信息中有效的提取出来，然后再在此基础上进行更进一步的目标测量匹配与图像图形分析。所以说图像分割技术就是一种将图像分割成具有显著特征的区域并提取出感兴趣信息的技术过程。

对于常用的图像分割技术实现，常常会采用三种不同的方式来进行：对图像的区域进行分割，即把各个像素所代表的信息划分到各个物体特征区域内；对图像的边缘信息进行提取，先判断边缘像素信息，比如提取连续的 0 与 1 的分界线，然后连接散点得到一条清晰的边缘轮廓线；使用区域增长的方法进行，即从像素触发，将“有用”的属性一致原则进行分类，将属性相近的像素点全部连接在一起，组合成各自的区域。

不过值得注意的是，任何一种图像分割技术都不能说可以应对所有的图像信息，也就是说没有唯一的或是标准的分割技术，具体情况需要具体分析，在应对不同场合中出现的图像时，可以针对性的采用其中的一种或者几种图像分割技术进行具体的目标提取，只要能准确提取出目标的分割方案就是最合适的方案。经过图像分割处理后的图像如图 3-6 所示。

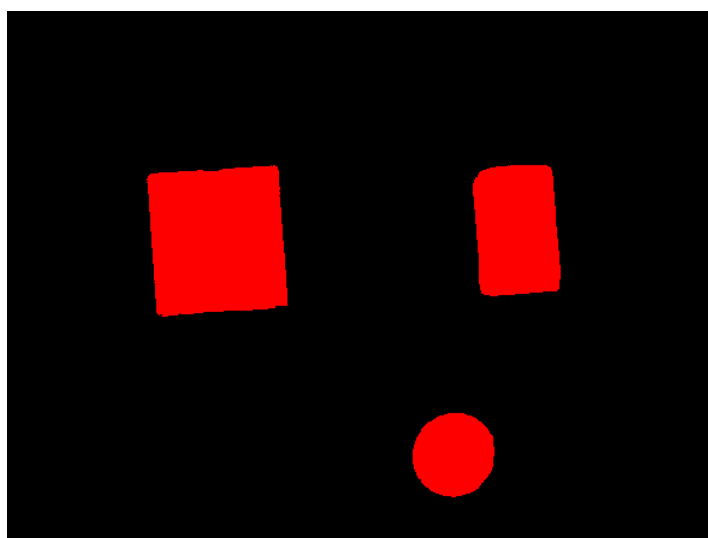


图 3-6 图像分割处理后的图像

### 3.2.2.5 颗粒分析技术

在实验中完成了上述一系列的图像处理操作后，便可以得到较为清晰的目标图像图形了，当然此时还可以使用一些边缘提取算法来对目标物件的图像信息进行更进一步的提纯，但是在本实验中，这一步不是必需的，所以接下来的操作便是直接对得到的图像信息进行颗粒分析，也就是根据目标几何的不同性质来进行综合分类。颗粒分析模块有统计分类、模糊分类和神经网络分类。这里我们在 LabVIEW 设计中使用统计分类。

经过 LabVIEW Vision Development Module 的颗粒分析模块所提供的分析工具包所得到的分析数据如图 3-7 所示。

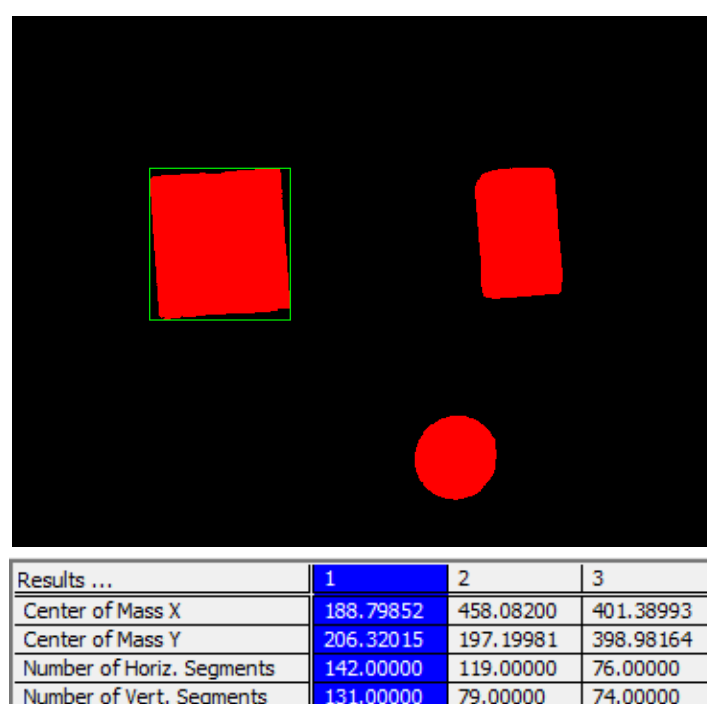


图 3-7 LabVIEW 颗粒分析工具

根据 LabVIEW 颗粒分析工具所提供的信息当中，我们可以很清晰的读取其中一些结果参数。在通过甄选后所得到的数据组中，对本实验进行起到关键重要的数据主要是以下六种数据：Center of Mass X (实体中心 X 坐标值), Center of Mass Y (实体中心 Y 坐标值), Number of Horiz.Segments (水平方向坐标量分段值), Number of Vert.Segments (垂直方向坐标量分段值), Average Horiz. Segment Length (水平段值平均量), Average Vert. Segment Length (垂直段值平均量)。我们由此可以确定所检测得到的目标工件的中心坐标点、长宽比及圆度信息，这样使用简单的判定依据就可以实现对目标工件的检测识别分类了。



## 4 运动控制卡方案设计

本章将把实验的重心放在运动控制卡的控制方案设计上,包括图像坐标系的比例分布、机械手臂位姿分析等多个方面内容。

### 4.1 坐标系的标定

为了对目标物体精确定位,在对实验的面阵摄像机的位置进行标定时,需要建立机械坐标系与图像坐标系这两类坐标系。

机械坐标系的建立是在整个系统体系的工作范围内进行坐标设定,建立机械坐标系的目的是为了让摄像机、机械手臂、作业平台和目标工件处于同一坐标系内,这样建立坐标系的好处便是让这四者之间的相对位置固定,方便图像视觉控制系统对目标物件的坐标标定,以便作业机械手臂能够准确定位。这样一个作业系统的建立可以大大简化控制系统的数学模型数据计算,也让整个控制方案得到简化。

图像坐标系的建立是根据摄像机的采样位置来确定。在实验中所应用的采样模型如图 4-1 所示,摄像机所采集得到的是一张二维平面图,本实验中所采用的 USB 摄像机最大支持的图像分辨率为  $640 \times 480$ ,也就是说需要在  $640 \times 480$  这个有限的范围内容纳所有目标工件,视场范围跟摄像机所摆放的高度成正比关系,也就是图中所示的工作距离,距离越远,图中的视场范围也就越大。

这里需要涉及到一个图像坐标系比例尺计算:在本实验中,实验平台所覆盖的一个作业平面(即图 4-1 中的视场)最大幅面仅为一张 A4 纸面大小,考虑到作业面积较小的特点,设定在作业平面内最多能同时追踪 5 个目标物件的坐标点信息,多次实验后得到最佳情况下摄像机镜头与工作平面距离为 31CM,视场覆盖尺寸长为  $18\text{CM} \times 24\text{CM}$ ,有公式计算:

$$\begin{cases} 640 \div 240 \approx 26.67 \\ 480 \div 18 \approx 26.67 \end{cases} \quad (4-1)$$

由此对应得到比例尺 1: 26.67(由于在本系统中的数据是按像素坐标点计算,所以此比例尺单位可以理解为厘米/像素),通过这些数据便完成了对整个摄像机

的坐标位置标定。同时，也得到了特征分辨率，也就是本图像算法中所要求物体最小特征需要用两个像素的规定，可以按如下公式计算表示<sup>[34]</sup>：

$$\text{特征分辨率} = \text{视场} / \text{分辨率} \times 2$$

例如在本实验当中的横向视场是 240MM，故横向的特征分辨率为：240 / 640 × 2 = 0.75MM。

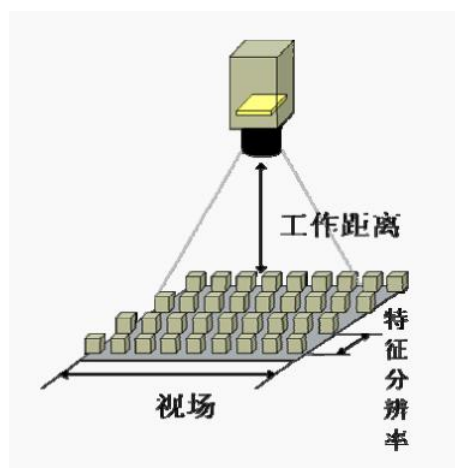


图 4-1 摄像机标定图

另外值得注意的是，在 Windows 操作系统体系当中的像素坐标标定的方式与常见的笛卡尔直角坐标系标定略有不同，它的原点坐标位于图像左上角，横向方向坐标轴为 X 轴，竖直方向坐标轴为 Y 轴，由于摄像机的成像原理，镜头的焦点始终位于图像的中心点位置 O 点，图像坐标系 s 信息如图 4-2 所示。

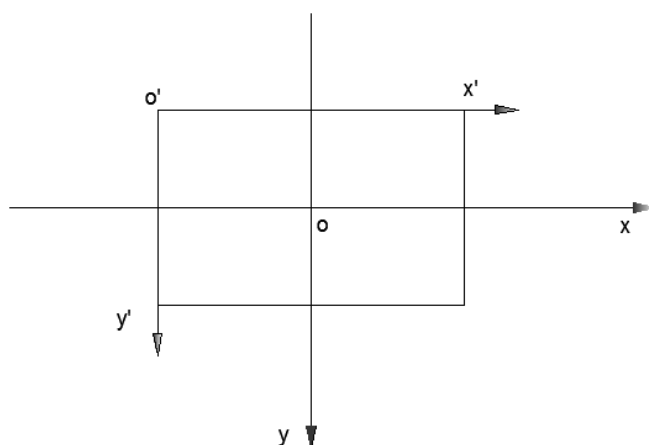


图 4-2 图像坐标系坐标标定

## 4.2 机械手臂的位姿分析

针对于不同的工业机器人，所采用的位姿计算方法也都各不相同。目前在生产线上广泛使用的示教再现模式的工业机器人的运动坐标与轨迹都相对固定，只能完成特定工种、特定轨迹的作业，而在应对复杂多变的工业生产环境中就显得捉襟见肘了。机器视觉控制系统的引入便对整个工业机器人的运动控制提出了更高的要求。机器视觉系统中图像处理部分输出的最终结果通常都是目标工件的坐标。在应对多变的坐标位置时，就需要建立一套标准的运动学方程式来对工业机器人的位姿进行规划解析。

在目前对工业机器人的学术研究领域当中，常常运用一套通用的运动学正逆解方程实现整个工业机器人运动方式的规划，其研究的重心在于分析各个连杆之间的位移、速度和加速度的关系。在本实验案例，将提出一种新的针对机器视觉分拣机器人运动经过优化后的简化模型控制方案，通过对实验的验证，证明是可行的。

#### 4.2.1 位姿描述

在对机器人的研究当中往往需要对机器人本身的活动关节进行细致的分析，也就是要对机械自由度的研究。任何存在于空间内的一个物体都拥有三个位移坐标  $XYZ$  以及三个旋转坐标  $UVW$ ，即物体的位置自由度和姿态自由度。机器人学里面将这六个自由度量称之为物体的位姿，当物体的位姿量被确定之后，那么整个物体在空间内的绝对位置也就被确定了。

在本实验中所搭建的工业机器人模型中，总共存在着六个关节自由度，分别是：旋转关节、承载臂关节、大臂关节、小臂关节、手腕关节以及爪子，关节结构图如图 4-3 所示。



图 4-3 机械手臂关节自由度结构图

旋转关节作为机械手臂的底座部分，提供整个机械手在工作半径内进行0-180度的旋转自由度；承载臂关节作为整个机械手臂的“主梁”，提供机械手臂的伸缩自由度；大臂和小臂工作机制相同，为机械手臂提供俯仰自由度；手腕关节则是为机械手臂的运动末梢提供旋转自由度；爪子关节实际上对整个机械手臂在运动坐标系中的运动位置没有任何影响，主要是驱动机械手抓取目标物件。

本实验中的机械手臂运动模型自由度分布图如图4-4所示（爪子部分除外）。

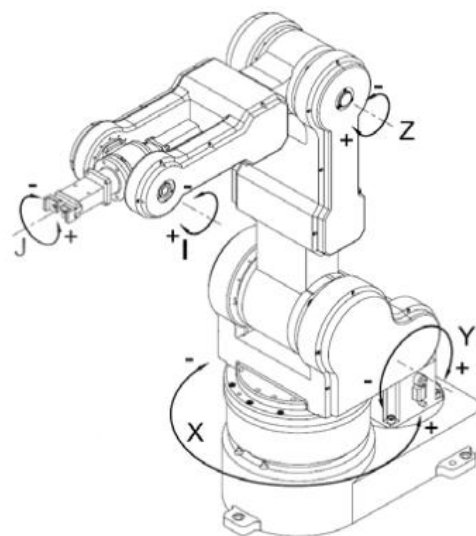


图 4-4 机械手臂自由度分布图

#### 4.2.2 建立简化的数学模型

在本实验案例中的运动数学模型的建立不同于常见的机器人运动学的正反解运算算法，而是以示教再现模式为对象进行优化改良后的数学模型，旨在综合两者的优点，得到一种新的计算模型。

常见的示教再现机器人在工业生产中所呈现出的弊端显而易见：单一点对点式操作，不能及时感知外界的变化，工作环境的轻微变化都有可能直接导致作业失误率增高，同时在适应一个新的环境过程中需要专业技术人员进行重复编程校准，所以工作效率都大打折扣。基于对此问题的考虑，机器人学界便出现了一种基于运动学正反解的数学模型式的控制算法，让工业机器人的精度大幅提高。虽然这种控制方式虽然有着其技术优越性，但也让技术门槛也有了质的提升，对研究设计人员提出了更高的要求。

在本实验案例中便就结合以上两者的利弊特点，提出了一种新的数学模型：具有示教再现模式的轻便性，与此同时又不失正反解的精确性，辅以机器视觉技术的引入，提升了机器人的普遍适应性。

在笔者设计的机械手臂模型中，旋转底座的旋转中心在机械坐标系中是固定的，旋转底座的旋转角度范围由安装在旋转关节的舵机决定。1501MG 模拟舵机的旋转在 0-180 度之间，故整个机械手臂的作业半径也就被限制在了 0-180 之间。这里，我们以机械手臂的旋转作业半径建立一个极坐标系，旋转底盘的旋转中心作为该极坐标系的原点。将机械手臂所有关节都延展至水平所能达到的最远距离将作为该极坐标系所能覆盖的最远点。收缩机械手臂的各个关节，使机械手爪的末端接触至旋转底盘的边缘作为该极坐标系的所覆盖范围的最近点。由此可以得到以整个机械手臂所建立的极坐标系的最远与最近的之间的覆盖范围，即整个机械手臂的工作半径范围。机械手简化作业半径如图 4-5 所示（蓝色为极近距，红色为极远距）。

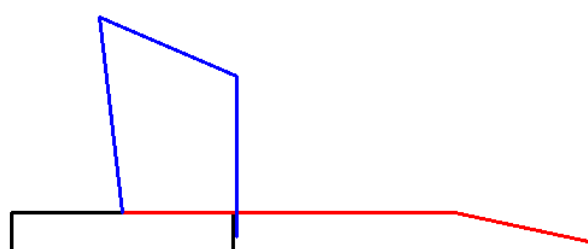


图 4-5 机械手臂作业范围侧面演示

在上章摄像机的标定部分介绍了的摄像机视野范围内所实时监控的工作区域，而工作区域中坐标的标定是基于笛卡尔直角坐标系的一块矩形区域，在本实验中为了让机械手臂能够准确定位到工作区域范围内的任意一点，需要将整个视场都置于机械手臂的工作半径之中，为了让两个不同的坐标系实现统一，这样便涉及到了一个极坐标系与笛卡尔直角坐标系之间的坐标相互转化的问题。

机械手的底座旋转中心摆放坐标位于图 4-2 中的 Y 轴正方向上，且与摄像机的焦点中心（即 XY 轴交点）的距离为半个视场距加上旋转底座半径之和。由此，不妨仍然以图像坐标系在机械坐标系的投影原点作为新坐标系的工作原点。因为以图像坐标系建立坐标系原点，在上位机控制系统给运动控制卡发送目标物件坐标数据时可以大大简化坐标之间的差值转化计算量，另外机械手臂的底座旋转中

心相对于新坐标系的原点固定，故机械手臂的极坐标系范围内的所有点均可以依照此方式对应得到该点在新笛卡尔直角坐标系中的位置。坐标系的标定图例如图 4-6 所示。

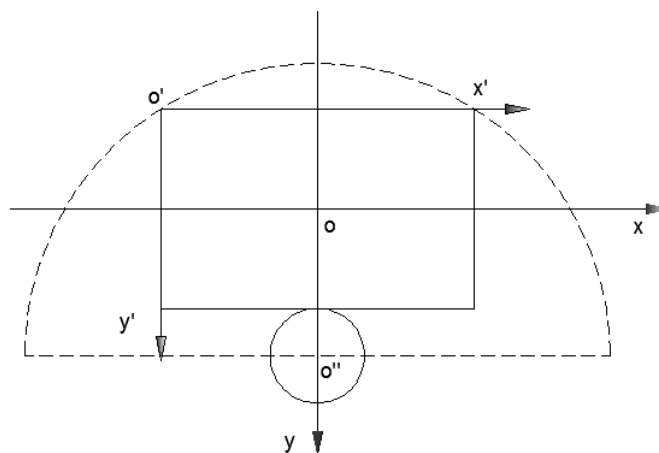


图 4-6 坐标系的标定图例

在上图中所示的  $X' O' Y'$  笛卡尔直角坐标系即新的机械坐标系，同时也是机器视觉系统图像坐标系；以机械手臂底座旋转中心点  $O''$  为原点，以虚线为半径的范围为机械手臂的作业范围，其中实线圆形代表机械手臂的旋转底座所覆盖的直径圆范围。

### 4.2.3 运动位姿角度的标定

在新的坐标系被确定之后，现在便需要对机械手的运动角度进行划分了，在本实验案例的设计方案中，舍弃了较为复杂的运动学正逆解运算，沿用了示教再现模式的方案来对机器人运动位姿角度进行设定。

在本实验所设计的标定方案中，机械手臂的旋转底座的旋转中心位于新的机械坐标系之中，沿用示教再现模式的末梢定位法，首先确定机械手臂所达到的最近点，即图示 4-7 中表示的线段  $O'' B$ ，这是机械手臂在本视觉图像坐标系中所能达到的最短距离，其次，线段长  $O' O''$  为机械手臂在图像坐标系中所能达到的最远距离半径。

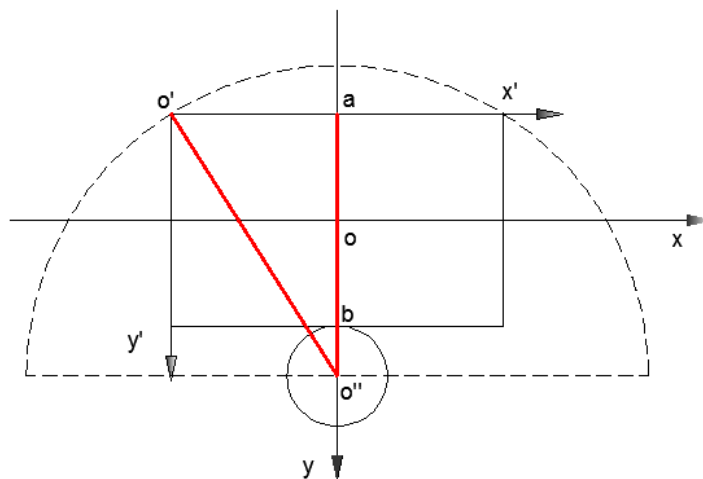


图 4-7 机械手臂运动角度标定轨迹

对机械手臂的结构特征进行模型抽象化分析会发现，能够对机械手臂在作业半径内的运动起到直接影响作用的关节自由度只有三个，分别是：承载臂自由度、大臂自由度和小臂自由度。如图 4.8 所示（省去旋转底座高度）。

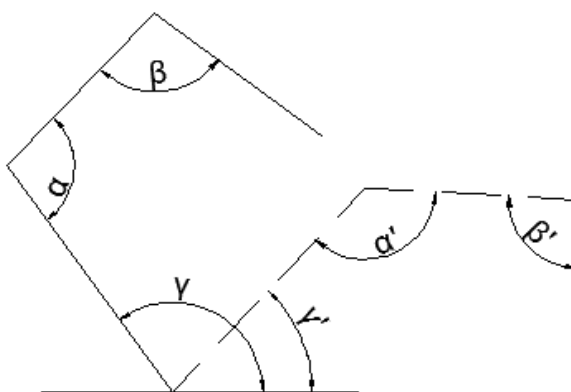


图 4-8 机械手臂运动角度关系分析图

为了模拟真实分拣工业机器人的结构，我们将约定小臂的伸展方向始终向下垂直于作业平面。因为在分拣机器人的实际应用当中，执行末梢通常采用真空泵吸管替代机械手爪，这样不仅仅增强了目标工件的吸附力度，也对电机（抓取末梢在执行抓取动作时会形成短暂的堵转电流，有损电力设备）起到一种很好的保护作用。至此，剩下需要进行角度分析的机器人位姿角度就只有承载臂关节以及大臂关节了。在本套实验设计方案当中，角度的标定是通过对机械手臂在机械坐标系中视场最远点与最近点之间的工作轨迹选定多组测量点，将得到的关键测

量点进行数据分析，经过数据拟合成两个运动自由度之间的线性关系方程，从而完成对机械手臂的位姿数据计算。

具体的实现方法如下，先编写设计一段运动控制卡的位姿角度读取代码，烧写入运动控制卡当中，然后将运动控制卡所读取到的各个关节的角度值通过串口通信的方式实时反馈到上位机的控制界面进行处理，上位机软件将收集得到的数据进行打包，输出到 Excel 数据表格中进行数据汇总，使用 Excel 中的散点图绘制功能绘制出各个关节角度变化的线性相关性散点图，然后利用其数据拟合功能拟合出最能体现位姿角度相关性的数学线性表达式。散点图数据拟合公式如图 4-9 所示。

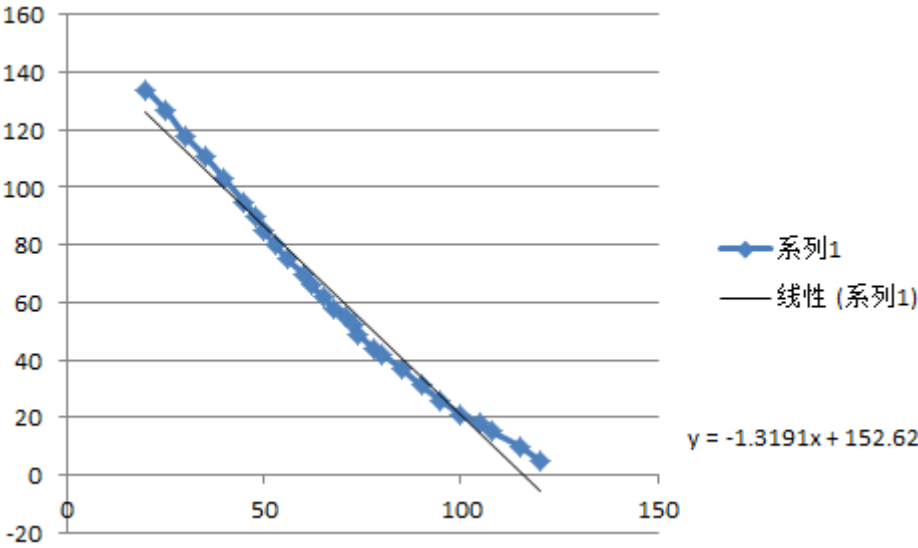


图 4-9 位姿角度数据拟合散点图

在数据拟合得到承载臂旋转角度与大臂旋转角度之间的线性方程后，还需要测定机械手臂的转角度与执行末端（即机械手爪的指尖）伸展后所处的坐标位置相对于旋转底座中心的距离之间的关联。同样的方法，我们设定了 9 个特定位置点进行标定，同时也给出了底座旋转角度的测定，每个标定点的坐标信息都会通过串口通道实时传输给控制系统记录存储后，将数据导出 Excel 表格进行汇总。一次连续取 9 次坐标，连续取三次，这样所得到的坐标信息便有 27 组。得到的数据表格如表 4-1 所示。



表 4-1 机械手臂执行末梢距离点标定

	X point	Y point	Distance	Degree
1	31	50	26.7	115
	31	52	26.63	115
	38	53	26.48	115
2	324	50	24.13	91
	324	51	24.09	91
	325	54	23.98	91
3	606	53	26.06	67
	608	55	26.02	67
	610	49	26.26	67
4	29	242	20.47	124
	35	237	20.5	123
	34	241	20.39	124
5	319	246	16.78	92
	319	248	16.71	92
	319	284	15.36	92
6	610	241	19.83	59
	609	237	19.94	59
	610	240	19.86	59
7	29	429	15.19	139
	33	421	15.27	138
	32	426	15.18	139
8	327	397	11.79	92
	323	431	9.85	93
	316	418	10.35	94
9	611	422	14.49	45
	605	423	14.3	45
	599	420	14.23	46

距离计算公式如下：

$$Distance = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (4-2)$$

式子中  $x$ 、 $y$  坐标值为测定值， $x_0$  和  $y_0$  为旋转底座中心值，即图 4.7 中的  $O''$  点的坐标值。

得到了机械手位姿的角度与执行末梢的距离之间的关系后，我们便可以对坐标位置点的角度值与距离值进行匹配，这样就完成了对机械手臂运动位姿的分析，我们便可以依据得到的方程式所机械手臂的作业半径内的任何一点进行坐标转换了。

另外有一点需要说明的是为了方便机械手爪能够平稳地抓取目标物件，我们设定了让手腕关节的舵机旋转的方向与角度始终以能让机械手爪平行于机械坐标系的  $X$  轴方向为准，具体计算方法是：

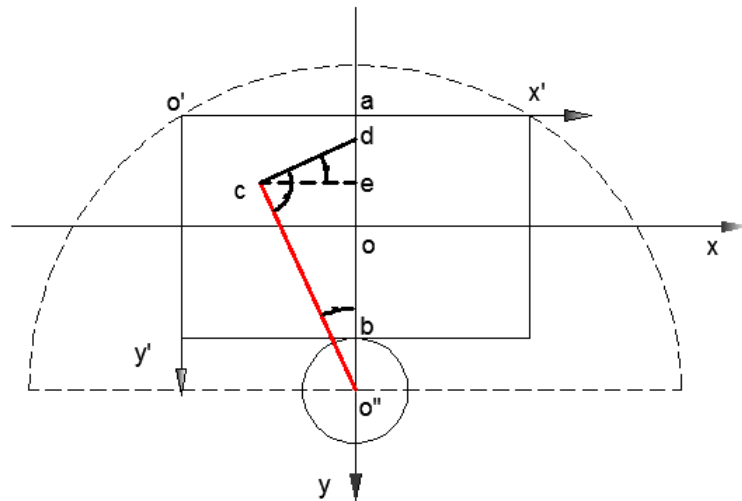


图 4-10 手腕旋转角度解析

如图 4-10 所示， $\angle DCE$  即手腕关节需要旋转的角度，最终是让机械手重合置于线段  $CE$  上，由于  $C$  点坐标已知（即  $C$  点目标物件的中心坐标值）， $O''$  点的坐标是机械手臂的旋转中心坐标，这样便很容易得到  $\angle CO''D$ ，又因  $\angle CO''D = \angle DCE$ ，故可以得到其旋转值；旋转方向的判定可以根据底座的旋转角度得到，大于  $90$  度则手腕右转，反之则手腕左转。

## 5 视觉控制系统设计与运动算法实现

本章将针对之前几章的理论原理部分进行实践设计验证,所要介绍的主要内容包基于 LabVIEW 开发平台的上位机机器视觉系统 GUI 设计、基于开源硬件 Arduino 硬件载体的下位机运动控制卡算法设计以及本实验系统的扩展功能部分的设计等。

### 5.1 基于 LabVIEW 的机器视觉系统设计

在本实验案例中的上位机 GUI 设计部分,是完全基于 LabVIEW 设计平台进行设计的。界面主体部分应用的是 LabVIEW 中输入显示控件来发送数据和显示所接收到的反馈信息,图像处理部分使用了 Vision Development Module 视觉处理模块以及与之对应的 Vision Acquisition Software 设备驱动程序;通讯部分则是使用 VISA 驱动模块来实现串口通信驱动。控制系统 GUI 界面如图 5-1 所示。

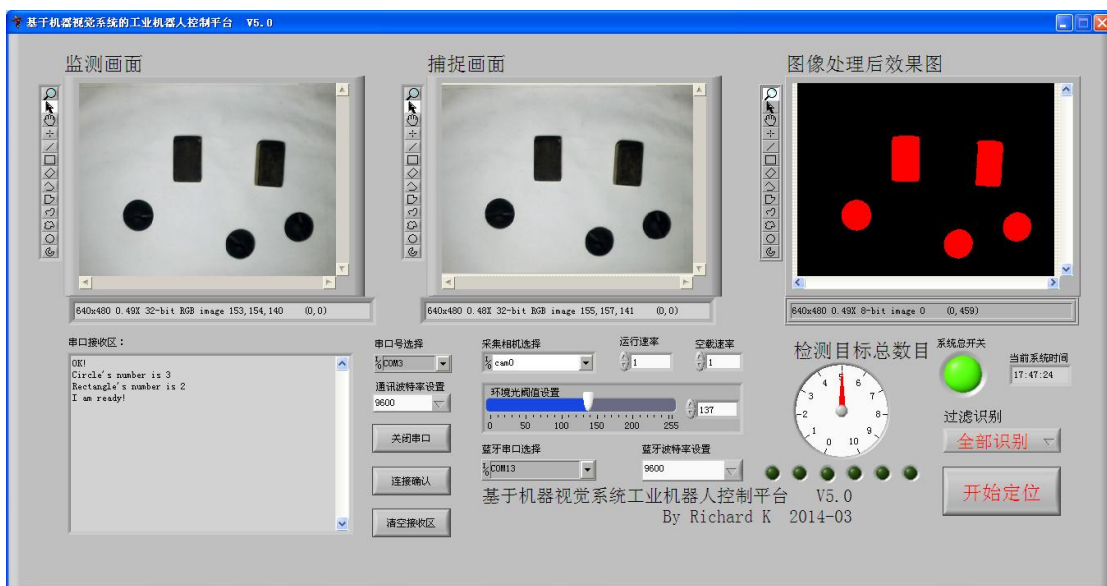


图 5-1 上位机系统 GUI 界面

在本实验上位机系统 GUI 界面中,主要分为三大部分:图像监控与处理版块、串口通信与反馈版块以及运动控制模式选择与调节显示版块。

上位机工作界面前面板包含摄像机选择(应对使用多摄像机环境);图像监控、图像捕捉、图像处理显示窗口;应对不同光源环境下作业的环境光阈值调节功能;设定了一个用于显示检测视场范围内目标工件总数目的表盘;串口通信与反馈版块,包含串口通信端口选择项、波特率条件选项、下位机反馈信息串口显

示区，以及一些下位机连接确认和清空接收区这样的辅助功能；运动控制模式选择与调节显示版块的内容包括机械手臂多级运动速度参数调节、空载速率参数调节，图像识别抓取模式选择等功能。图例 5-2 中显示了本系统的图像识别抓取模式中的四种模式选项。

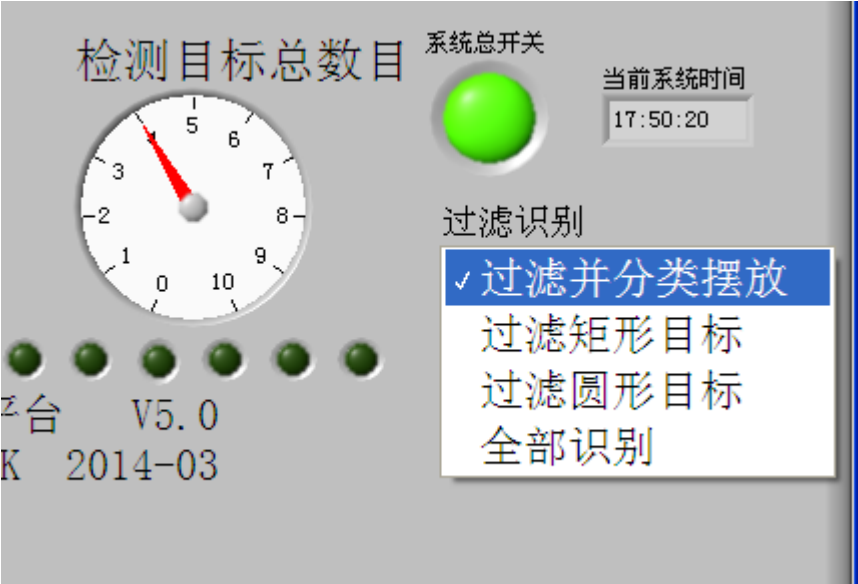


图 5-2 图像识别抓取模式功能选项

全部识别模式是依据摄像机拍摄得到图像信息，由计算机自动判别出现在视场范围内的目标工件位置并自动给出一套抓取顺序；过滤圆形目标模式是在全部识别模式的基础之上，有针对性的只对视场内出现的圆形外观目标物件进行抓取动作；过滤矩形目标模式与过滤圆形目标模式类似，只针对视场内的矩形外观目标进行抓取；过滤并分类摆放模式则是综合了过滤圆形目标与过滤矩形目标模式，将这两类目标先进行分类识别并按照设定的排序算法进行排序，最后通过机械手臂摆放至指定位置。

## 5.2 基于 Arduino 运动控制卡方案设计

在本实验中所应用到的下位机运动控制卡是以开源硬件平台 Arduino 作为硬件载体，硬件设计部分是一套开放的标准化的设计方案，这样可以减少对特定硬件的依赖性。所采用的具体型号是 Arduino mega2560 R3，其处理器核心是 ATmega2560，其规格参数如表 5-1 所示。其实物图如图 5-3 所示。

表 5-1 Arduino Mega2560 R3 规格参数：

分类属性	说明
处理器	ATmega2560
工作电压	5V
输入电压（推荐）	7-12V
输入电压（范围）	6-20V
数字 IO 脚	54 (其中 16 路作为 PWM 输出)
模拟输入脚	16 个
IO 脚直流电流	40 mA
3.3V 脚直流电流	50 mA
Flash Memory	256 KB （AT mega2560, 其中 8 KB 用于 bootloader）
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
工作时钟	16 MHz

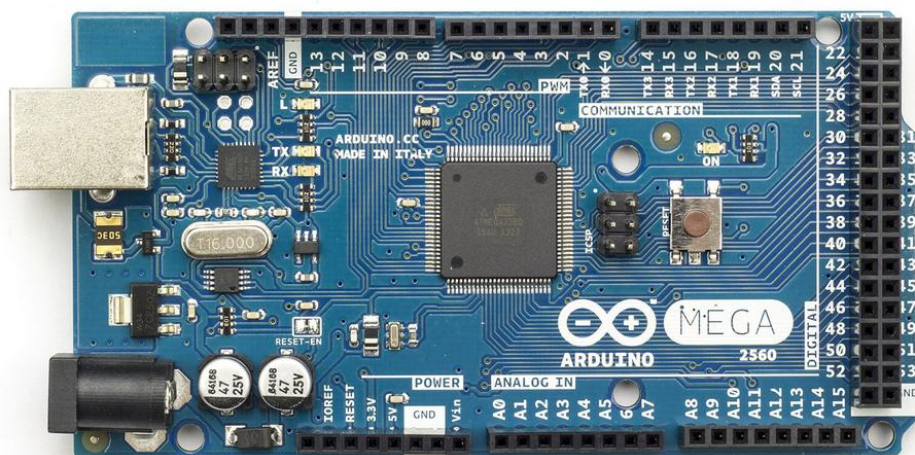


图 5-3 Arduino mega2560 R3 正面实物图

在本实验当中对机械手臂的控制实际上是在对关节上的舵机进行控制调节，而舵机是通过接受 PWM 信号来确定其旋转角度的，所以本实验中仅仅选用了 Arduino mega2560 R3 的 14 路 PWM 信号（0-13）输出引脚中的 6 个引脚（6-11）用于对舵机关节的控制；与上位机进行串口通讯的引脚也选用了 TX0 与 RX0；与蓝牙无线设备的串口通讯则使用了 TX3 与 RX3 引脚，其他引脚将为以后的扩展或改进功能做预留。

运动控制卡的主要功能是负责接收来自上位机控制系统关于目标物件的信息，包括目标物件的中心坐标信息、目标物件的数目总和、物件的长宽比、圆度信息、电机的运行速率比以及空载加速度变化值等。在接收到这些信息之后，运动控制卡需要进行解运算，依据之前建立的算法把这些信息转换成机械手臂的角度控制动作，完成一整套操作。最后，运动控制卡会将运行过程中需要反馈的信息再次通过串口通道返回给上位机系统，实现实时监测。

运动控制卡的关键功能在于实现对多个伺服电机的联动控制。在本实验中所使用的开发板 Arduino mega2560 R3 的 MCU 是一片 8 位的单线程处理器芯片，这相比于工业级的多线程处理器来说，不仅数据吞吐量差距太大，而且由于没有多线程的技术支持，让联动控制显得更为困难。所以本实验结合了资源稀缺型 MCU 在不使用 RTOS（实时操作系统）的情况下，设计了一种分段式解决方案。

分段式操作，顾名思义是将本该一部走完的路线分成多步来走，并且让多个任务交叉进行完成，这样便很好的解决了在小资源 MCU 上的“多线程”任务处理。

具体实现方案是：首先读取当前伺服电机所处角度位置，将预计到达的目标点新坐标与当前位置坐标取差值，差值的正负属性便是伺服电机正逆时针旋转的方向依据，而差值的绝对值便是伺服电机从当前位置旋转到下一位置的相对角度值。在多伺服电机的情况下，还需要对得到的一组相对角度值进行排序操作，以从小到大的顺序操作电机循环动作，当旋转角度较小的伺服电机旋转完毕时便会自动退出操作，依次到最大旋转角度的伺服电机运动完毕。这样便实现了联动控制。由于其架构的简洁性，理论上没有对电机数目的限制，而且由于角度是依次进行的，即便是中途一个循环中有电机没动作，那么下一次循环也会让其旋转，所以也达到了很好的容错效果。

### 5.3 视觉系统与机器人运动控制卡的通信

在本实验案例当中，我们选用的是以 RS232 串口协议为基础的通信方式来实现让机器视觉系统与机器人运动控制卡进行对接的。

串口配置端的基本参数设置为：波特率上下位机都设定在 9600bps，无校验位，数据位字节为 8 位，停止位为 1。

整个串口通讯流程为：在建立了基本连接后，运动控制卡会不断监听串口信号。在基于 Processing 的 Arduino 编程当中是通过 Serial.available()函数来实现的。

如果上位机控制系统的数据被触发发送,那么运动控制卡将立即做出反应,并向上位机系统返回“I get it!”字符串信息用于接收确认;在机械手臂运行过程中也会将运行的末端坐标位置通过串口反馈给上位机系统,这样方便工程技术人员对机械手臂的运行状态能有更为准确的了解,同时也可防备机器运行过程中可能出现意外情况,方便工程技术人员随时紧急停止机械手臂操作;另外在每次运动控制卡上电的自检初始化过程完毕之后,也会通过串口向上位机系统发送“I am ready!”字符串来表示运动控制卡已正常启动并连接正常,每次任务执行完毕之后也会反馈“OK!”来通知工程技术人员可以进行下一步操作;如果在控制系统的运行过程中不确定下位机是否在线,也可以通过点击控制界面面板里面的“连接确认”按钮来判定运动控制卡是否在线,如果在线,串口信息提示框里面将显示“I am online!”,如果没连接上将没有任何显示,这个时候就需要检查下串口连接以及手动操作复位运动控制卡了。

在对本实验的串口通信方面,我们还设定了一个独立于运动控制卡与上位机控制系统的串口通道来实现蓝牙无线控制。硬件方面使用了基于 Bluetooth 2.0 的蓝牙转串口模块为本控制系统提供了一个开放的无线通讯端口,这样便大大扩展了本实验系统的便携性。做此性能扩展部分的目的是针对目前工业生产线上的一些弊端所提出的一种解决方案。在生产线上,通常情况下一台工控 PC 往往会通过工业总线形式连接到多台工业机器人,总控制台离生产线也有一段比较远的距离,对于生产线上的工业机器人维护技术人员来说,一款手持控制器可以大大提升他们的工作效率,省去了维护过程中需要经常往返于控制台与生产线之间的折返路程,随时停机、开机调试以及参数设置。这是一项非常必要的功能设计。在控制总台的上位机 GUI 界面中我们也设定了一组指示灯来显示远程端对控制平台的远程操作流程<sup>[1]</sup>。控制系统作业流程图如图 5-4 所示。

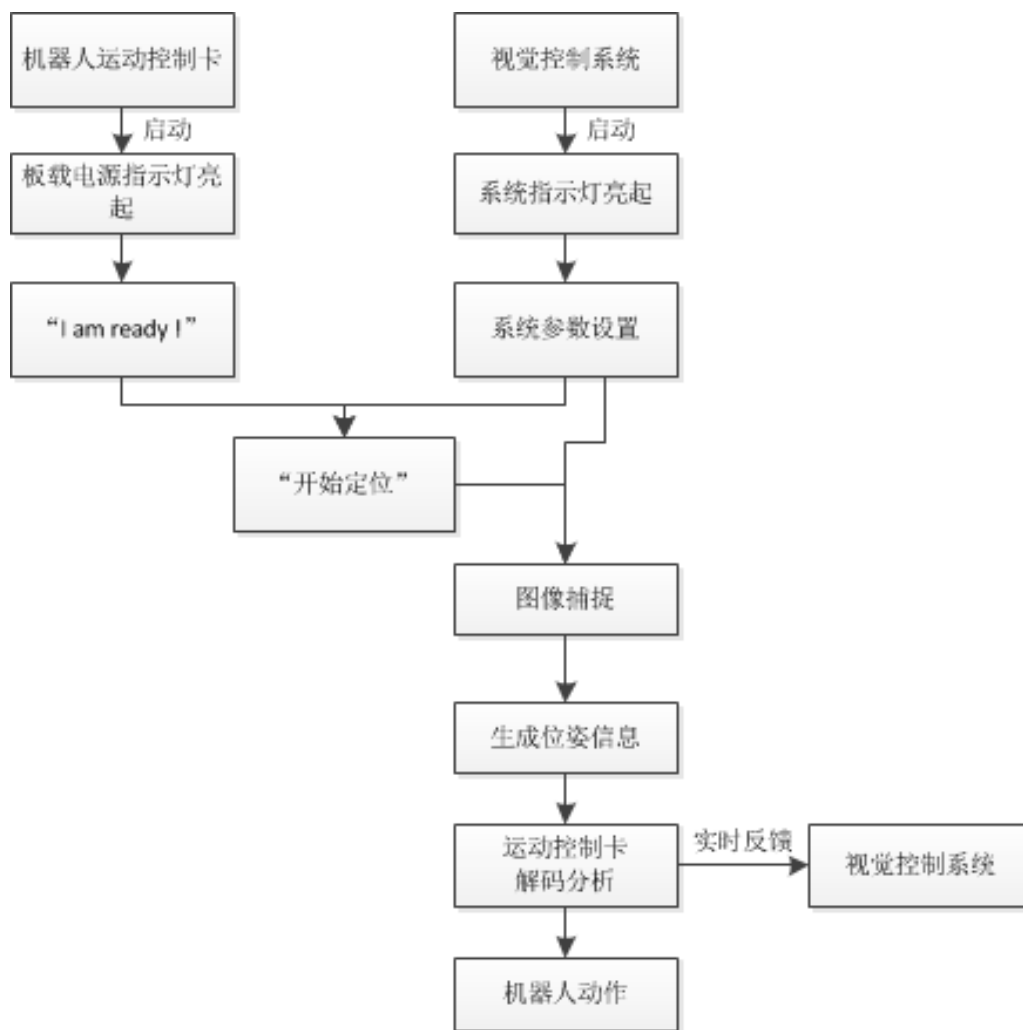
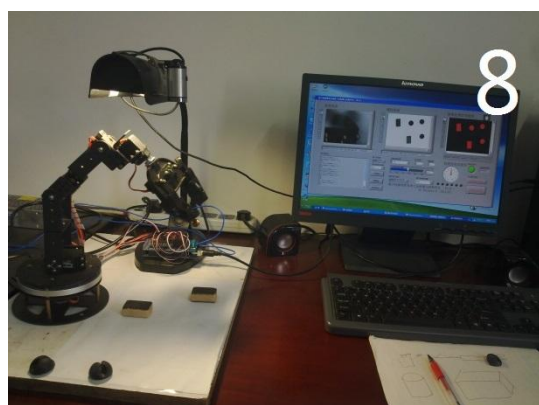
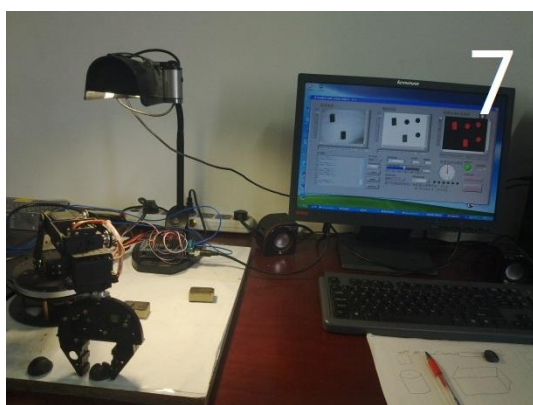
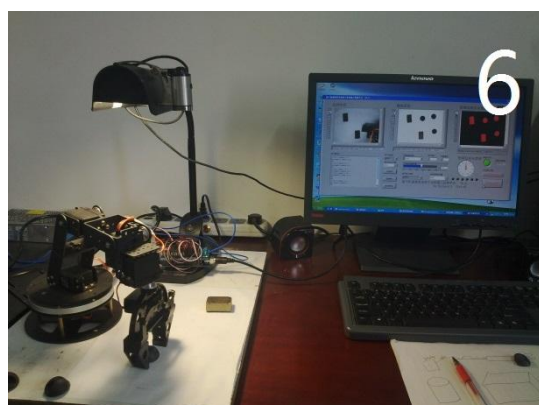
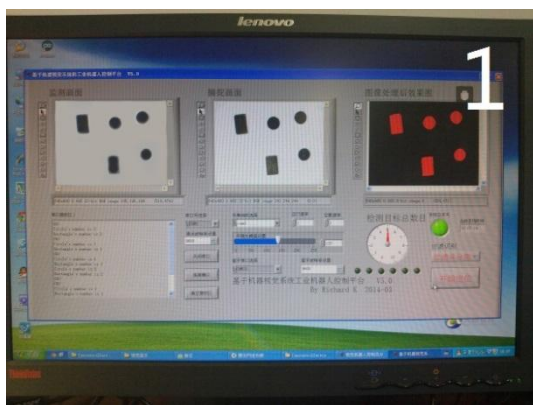


图 5-4 控制系统作业流程图

## 5.4 抓取目标物件实验

通过上文一系列对视觉机器人工作原理的分析与运动轨迹的计算，我们搭建了实物模型进行验证，通过程序的编写与优化，得到的实践结果完全证实了本控制系统设计方案的可行性与可靠性。最终实现了对特定尺寸大小的圆形外观目标物件以及矩形外观目标物件的定位，机械手臂位姿计算、控制，机械爪抓取物体并分类摆放等操作。实验结果非常理想，符合我们的预期。具体的机器人识别、抓取、分类摆放物体过程的实验细节如图集 5-5 所示。





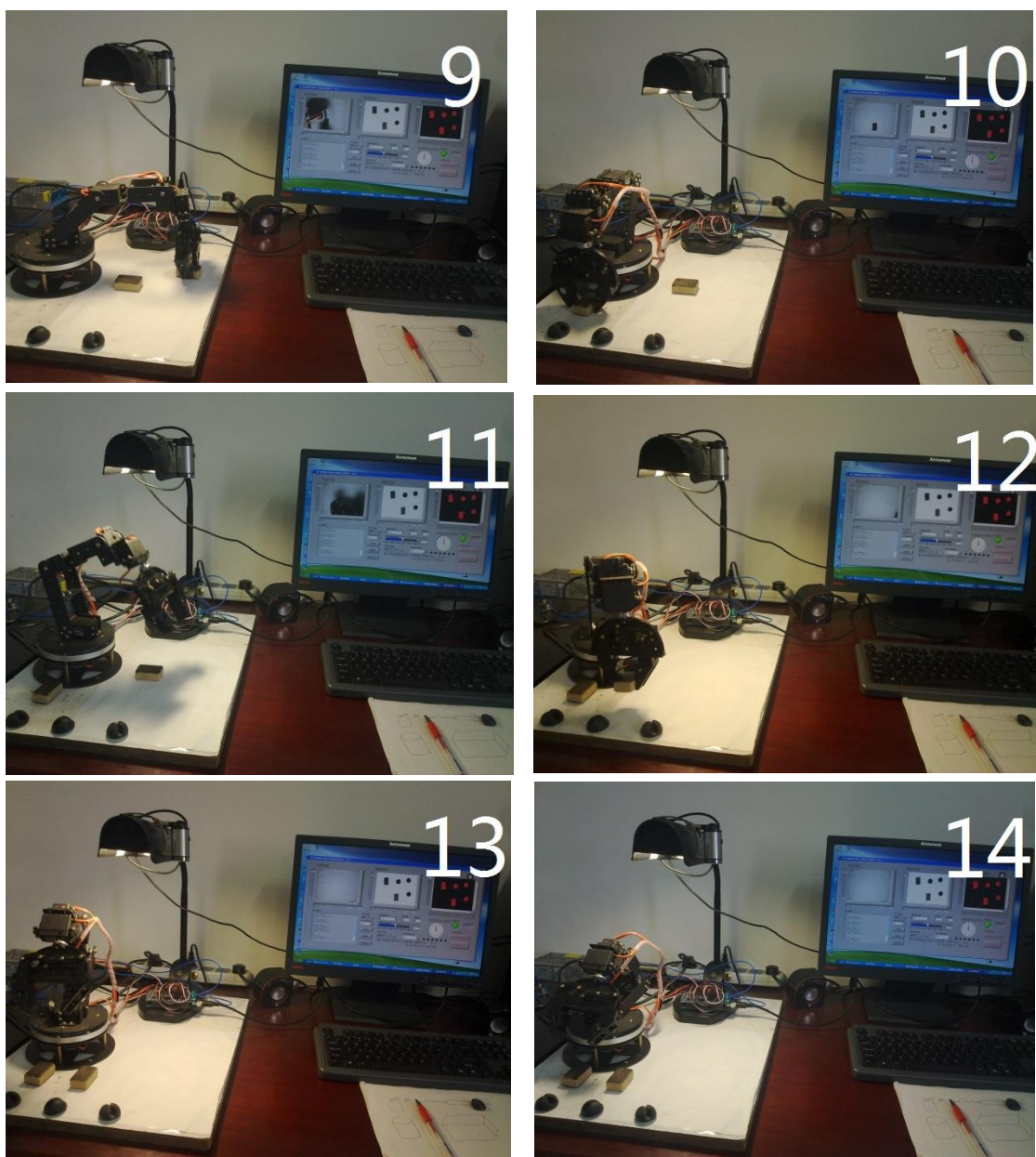


图 5-5 分类摆放模式下的实验细节图

## 6 控制系统性能分析、优化与改进

一套优良的控制系统从需求分析到样机下线，所经历的过程不能仅仅局限在设计层面，能否真正适应实际的工程应用工作才是关键。测试一套控制系统的工作性能是在现场应用之前一个必不可少的重要环节。这里我们将从可靠性与系统优化这两个方面来对本次实验的系统性能作一个简短的分析。

可靠性的测试分为软件可靠性测试与硬件可靠性测试。在软件可靠性测试方面，本实验的程序部分中上下位机采用了经典的模块化设计，一整套系统可以分为多个功能模块，每个模块都有各自的功能实现算法，每个模块之间没有直接的耦合性，即便是某一功能模块失效也不会影响到其他模块的正常运行，正是因为模块化编程的明显优势，让整套系统在出单模块漏洞的情况下也不会影响到整个系统的运行，另外运动解析运算过程是在下位机执行的，进一步减轻了对串口通信线路的依赖，避免了因过多的数据堆积而影响到系统的正常运行；而在硬件的机械特性方面主要采用的是铝合金钣金支架结构，这是本实验中的所出现的一个致命的弱点，在运动过程中尤其是在机械手臂的启停瞬间，会出现明显的颤动，这对本实验的实验效果影响是巨大的，很大一部分程度上降低了本实验模型的精度，鉴于本文的侧重点在于软件系统集成，实验硬件部分的机械手仅做实验效果展示之用，故此不作深究。

从系统优化方面来讲，本实验系统的优化程度还远远不够，就目前通过硬件实验得来的数据分析而言，系统在对机械手臂运动控制的路径规划方面所做的工作有明显的不足，例如在执行抓取、摆放这两个过程中，完全可以通过插补运算，得到一条优化的返回路线来缩短机械手臂的运转行程，这对提升整个机械手臂的运行效率将会是非常有意义的；另外上文提到的“多任务”处理机制，在针对本实验的硬件系统中这是一个比较理想的方案，或者在简单的任务操作现场可以以较低的成本达到理想的设计要求，但是这样的一种设计还是不能与真正意义上的多线程多任务处理机制相提并论，特别是在执行更为复杂的运动控制操作时，多线程多任务处理机制在实现多伺服电机联动控制方面有着不可比拟的优越性；在软件系统方面还有一个比较值得改进的部分是对离线编程系统功能的支持，这样

的一种设计方案可以让在生产线上作业的工业机器人在不停机的情况下进行运动仿真模拟，这对机器人编程人员来说是一项很有必要的设计，不仅可以在不影响生产力的同时进行程序改进，而且还能降低因对机器人的误操作而面临的各项风险。

## 7 总结与展望

### 7.1 本课题总结

本课题针对目前广泛应用的搬运机器人适应环境能力较差的问题，提出一种低成本、高开发效率、较高可靠率的示教搬运机器人解决方案。通过引入机器视觉技术对目标及目标环境进行识别和定位，最终控制机械手爪自动对其进行抓取和分类摆放的操作。本课题中所做的主要工作包括：

（1）设计了一套完整的具有机器视觉的五轴工业机器人控制平台解决方案。创新性地提出了一种在示教技术上有明显改良的设计方案。设计中采用模块化编程，弱化对硬件系统的依赖性，提高了软件的移植性。也应用了“分段式”任务调度模式来应对多个伺服电机的控制；

（2）结合机器视觉技术的应用环境，选定了光源并应用到本实验案例中；

（3）在单目视觉技术方案中，提出了一种简单且行之有效的摄像机标定方法，并阐述了在不同环境下的应用；

（4）在解决机械坐标系与图像坐标系的坐标融合问题中，提出一种将极坐标系向笛卡尔直角坐标系进行坐标转换的方法，最终在实验验证中用该方法取得了较为理想的效果；

（5）在研究分析机器人的结构当中，通过对其位姿角度的分析得到机械手臂运动角度控制量散点图，通过数据拟合得到各个角度元素之间的关系公式，以此为基础编程可以提升系统在轨迹方面的控制精度；

（6）在实践过程中，通过利用 LabVIEW 以及 Arduino 开源控制卡实现了“点对点”的运动算法，给本实验的理论方案做了一个很好的实践说明。通过对一组特定圆形与矩形外观的目标物件进行定位抓取和摆放动作，验证了笔者提出的行动方案具有实际可行性；

（7）运用系统可靠性与系统优化分析的理论对本实验系统进行了综合的评价与分析。本系统在调试过程中，实现了系统可靠性和轨迹控制精度方面的一些优化设想。

## 7.2 展望

不可否认的是：当前完成一系列的实验操作都是在比较理想的状况下进行，而应对复杂多变的工业应用环境，当前所做的工作还远远不够。从实验到实践之间还有一段很漫长很艰辛的路要走！不过从实验的结果看来，方案的设计证明了所走的方向是正确的，走进实际应用的层面还需要从控制系统的普遍适应性、高精度、高速率等方向进行更进一步的工作。



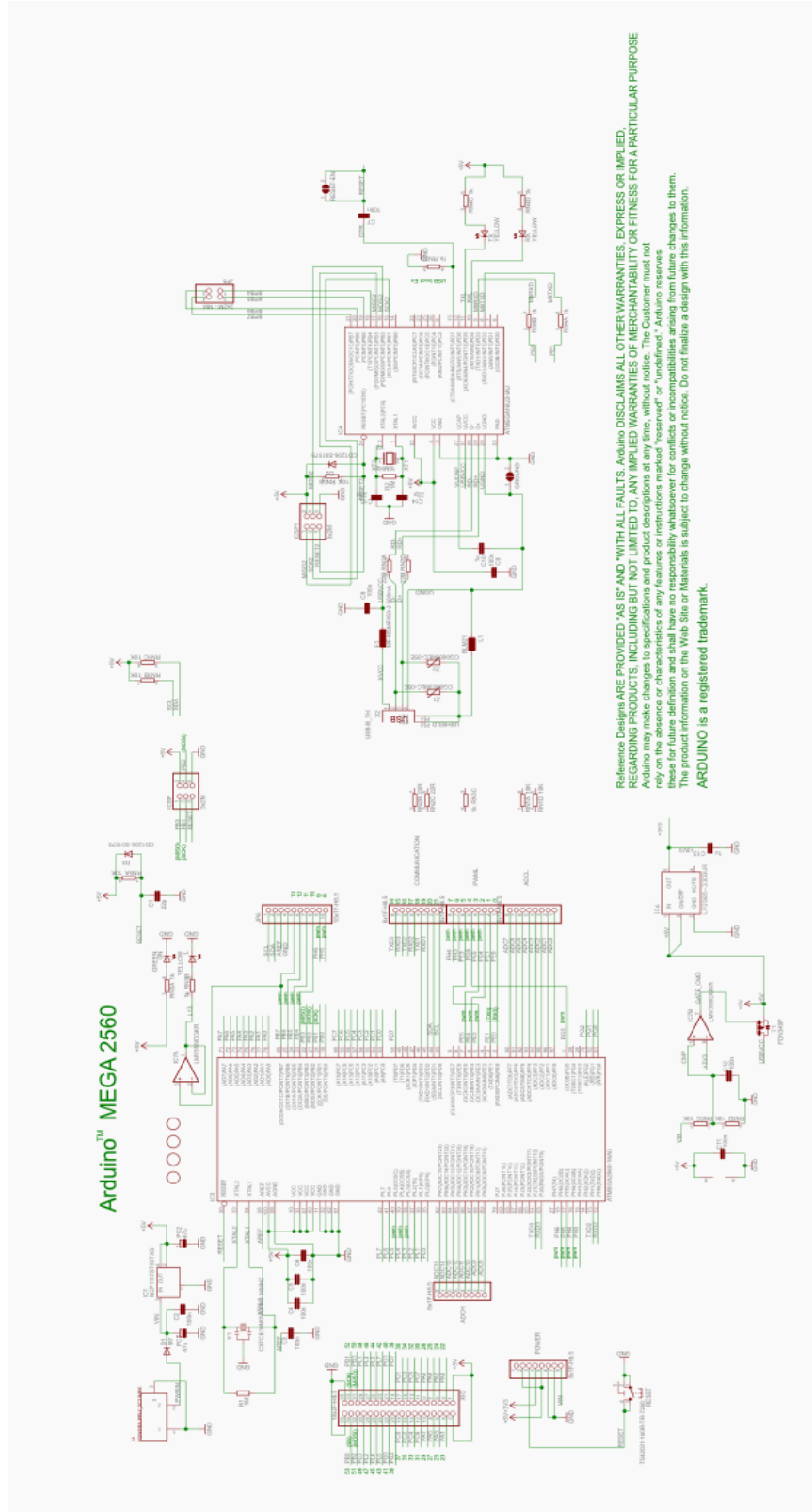
## 参考文献

- [1] 董文辉. 基于机器视觉的工业机器人抓取技术的研究, 硕士研究生学位论文, 华中科技大学, 2011.5
- [2] 张朋飞, 何克忠, 欧阳正柱, 张军宇. 多功能室外智能移动机器人实验平台 - THMR 机器人, 2002
- [3] 李刚俊, 陈永. 机器人的三维运动仿真[J]. 西南交通大学学报, 2002, 37(3): 273-276.
- [4] 潘存云, 高里基. 通用工业机器人运动仿真系统 IRKSS. 机器人. 1994(2) 94-97
- [5] 耿瑞芳. 基于视觉系统的六轴机械手的设计与实现---视觉系统的设计与实现[D]. 北京化工大学. 2006, 12.
- [6] 杜森森. 基于 PC 的乒乓球机器人的机器视觉的程序设计, 硕士研究生学位论文, 浙江大学, 2006.5
- [7] 朱瑞. 机器视觉及其应用 (系列讲座) [J] 《应用光学》- 2007
- [8] (美) 冈萨雷斯. 数字图像处理[M]. (第 2 版), 电子工业出版社, 2007
- [9] 王树文, 闫成新, 赵广州. 数学形态学在图像处理中的应用[J]. - 《计算机工程与应用》- 2004
- [10] 段峰, 王耀南, 雷晓峰等. 机器视觉技术及其应用综述[J]. 自动化博览, 2002,
- [11] 左建中, 张新荣, 李乃华. 将数学形态学应用于检测芯片机器视觉的研究[J]. 制造业自动化, 2004
- [12] 朱小娟, 江兴盟. 利用 LPC213X / 214X 系列单片机的 PWM 功能实现对舵机的控制[J]. 济源职业技术学院学报, 2007
- [13] 侯国柱, 孔庆忠. 五自由度机器人的结构设计及其控制[J]. 机械制造与自动化, 2007.2
- [14] 徐德, 谭民, 李原. 机器人视觉测量与控制. 北京: 国防工业出版社. 2008.
- [15] 陈会羽. 基于形态学和活动轮廓模型的活体细胞图像分割算法[J]. - 计算机辅助工程- 2006
- [16] 田中强. 一种五自由度机器人机构的研究与开发及运动学分析[D]. 西安理工大学. 2004, 3.
- [17] 王红涛. 基于视觉的工业机器人目标识别定位方法的研究[D]. 西安理工大学. 2007, 3.
- [18] Tephenn Prata. C++ Primer Plus[M]. (第五版) 中文版. 北京: 人民邮电出版社. 2005, 5.
- [19] 谭浩强. C 程序设计 (第二版) [M]. 北京: 清华大学出版社. 2000, 1.
- [20] 程晨. Arduino 开发实战指南[M]. 机械工业出版社, 2012
- [21] Massimo Banzi (美) 著 于欣龙 等译. 爱上 Arduino[M]. 人民邮电出版社, 2011
- [22] 郁有建, 张运杰. 基于 HT46R24 的自动绘图和擦除仪[J] - 计算机时代, - 2009
- [23] 朱冰莲, 潘哲明, 李单单. 一种中值滤波的快速算法[J], 信号处理, 2008, 24(4): 684—686.

- [24] 曹金学. 工业点焊机器人离线编程软件的国产化开发及应用[ J ], 计算机应用与软件, 2011, 28(12): 99-100.
- [25] 宋鹏飞, 和瑞林, 苗金钟, 单东日. 基于 Solidworks 的工业机器人离线编程系统[ J ], 制造业自动化, 2013.5
- [26] WeiWu,GengHaiFei,GuoYan. Embedded Control System Design for Autonomous Navigation Mobile Robot, Asia-Pacific Conference on Information Processing,2009
- [27] Gary Bradski,Adrian Kaehler 著 于仕琪 刘瑞祯译. 学习 OpenCV[ M ],清华大学出版社, 2009
- [28] 王永明, 王贵锦. 图像局部不变性特征与描述[ M ], 国防工业出版社, 2010
- [29] 张宏林. 精通 Visual C++数字图像处理典型算法及实现[ M ] (第 2 版), 人民邮电出版社, 2008.7
- [30] 张毅, 罗元. 郑太雄, 等. 移动机器人技术及其应用[M],北京: 电子工业出版社,2007
- [31] 付梦印, 谭国悦, 王美玲. 一种基于单目视觉的移动机器人室内导航方法[ J ],光学技术, 2006, 32(4): 591-593.
- [32] 章毓晋. 图像理解与计算机视觉[ M ]. 清华大学出版社 , 2000.8.
- [33] Jungmaj, Jangi.S, Kimj H, Development of robot category soccer robots. Journal of Harbin Institute of Technology. 2001.8(3). 300-302
- [34] NI 机器视觉培训教程
- [35] 王志文, 郭戈. 移动机器人引导技术现状与展望[J]. 机器人. 2003. 25(5). 470-474
- [36] Li Qing, Zhang Wei, Yin Yinxin, Wang Zhiliang, Liu Grangjun. An Improved Genetic Algorithm of Optimum Path Planning for Mobile Robots. Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications. Jinan, Shandong P.R. CHINA. 2006. IEEE Computer Society. 2006. 637-642
- [37] 廖启征.空间机构(无球面副)位移分析的酉交矩阵法.北京:北京航空航天大学研究生院工学博士学位论文.1987
- [38] John Craig. Robot and Automation Simulation: Past, Presentand Future[J]. Robotics World, 1999, 17(6): 40.



## 附件 1 运动控制卡原理图（实验引用非原创设计）



## 附件 2 运动控制卡源码层次分析

```
#include <Servo.h>

/.调用 Arduino IDE 开发环境自带的 Servo 头文件库./

Servo myservo1;

Servo myservo2;

Servo myservo3;

Servo myservo4;

Servo myservo5;

Servo myservo6;

/.定义六个伺服电机的 Servo 子类./

void findArrMaxMin(int a[], int size, int *min, int *max)

{

/.矩阵元素比较函数，比较得到 a[]数组元素里面的最大值与最小值并返回输出./

}

void reachpos(int numdata[])

{

/.通过传参 numdata[]数组元素对应分配到六个伺服电机，旋转至指定角度./

}

void calc(int pos[],int n,int rate)

{

/.图像坐标系与机械坐标系坐标计算转换函数./

}

void putobject1()

{

/.圆形目标摆放坐标函数./

}

void putobject2()
```

```

{
/.矩形目标摆放坐标函数./
}

void backfunction()

{
/.机械手臂回零函数./
}

void setup()

{
/.Arduino 程序的初始化函数，初始化各个 IO 口，协定串口波特率，指定机
械手臂初试状态./
}

void loop()

{
/.Arduino 程序的主函数，主要调用各个功能模块函数，实现串口数据收发，
工件坐标传输./
}

```

附件 3 LabVIEW 上位机前面板

