

/// 工业机器人专业人才“十三五”规划教材

# 机器视觉与 传感器技术

邵欣 马晓明 徐红英 编著  
张方杰 主审



北京航空航天大学出版社  
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

/// 工业机器人专业人才“十三五”规划教材

# 机器视觉与传感器技术

邵 欣 马晓明 徐红英 编著

张方杰 主审



北京航空航天大学出版社

## 内 容 简 介

本教材采用项目式形式编写,主要介绍机器人视觉技术的基础项目,并重点阐述机器人视觉与传感器之间的关系。全书通过七个项目来讲述有关内容,包括:图像系统的构成、机器人系统中的视觉应用、机器人内部传感器、触觉传感器、力觉传感器、其他外部传感器、工业机器人传感器应用。

本书适于电气类、自动化类及机电类专业本科教学使用,适度删减部分内容后可作为电气类、机电类专业高职高专教学用书,也可作为控制类研究生教材或工程技术人员培训教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

机器视觉与传感器技术 / 邵欣, 马晓明, 徐红英编

著. -- 北京:北京航空航天大学出版社, 2017. 6

ISBN 978-7-5124-2448-7

I. ①机… II. ①邵… ②马… ③徐… III. ①计算机视觉②传感器 IV. ①TP302.7②TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 133411 号

版权所有,侵权必究。

### 机器视觉与传感器技术

邵 欣 马晓明 徐红英 编著

张方杰 主审

责任编辑 蔡 喆 李丽嘉

\*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: [goodtextbook@126.com](mailto:goodtextbook@126.com) 邮购电话:(010)82316936

北京兴华昌盛印刷有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:787×1 092 1/16 印张:13.5 字数:346 千字

2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-5124-2448-7 定价:29.00 元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

# 前 言

本书介绍的机器视觉与传感器技术主要应用于机器人领域,具有应用范围广、技术附加值高的特点。目前,机器视觉与传感器技术已广泛应用于汽车及汽车零部件制造业、机械加工行业、电子电气行业、橡胶及塑料工业、食品工业、木材与家具制造业等领域中。在工业生产中,诸如弧焊机器人、点焊机器人、分配机器人、装配机器人、喷漆机器人及搬运机器人等都被大量采用。为了检测作业对象及环境或机器人与它们的关系,机器人上安装了机器视觉、触觉传感器、视觉传感器、力觉传感器、接近觉传感器、超声波传感器和听觉传感器等,大大改善了其工作状况,使其能够更高效地完成复杂的工作。由于外部传感器为集多种学科于一身的产品,有些方面还在探索之中,随着其进一步完善,机器人的功能将越来越强大,能够在更多领域为人类做出更大贡献。

高等院校要面向企业岗位工作实际,培养出具备理论与实践能力和新技术应用水平的应用技术型专业人才,提高职业教育质量,为企业培养高素质的后备员工,以解决企业技术实际应用中调试与操作的“瓶颈”问题,这是国内职业教育及培训的重要任务。

本书针对这一重任,严格遵循行业与职业标准,遵照技术技能人才培养规律,以实际应用能力的培养为核心,以工作任务为主线,精选内容,结合机器视觉与传感器的典型案例,引领读者对机器视觉与传感器由浅入深地进行学习与操作,为培养“强基础、善应用、勇创新”的高素质技术技能人才提供服务。本书编委由教学经验丰富的高校教师与一线企业专家共同组成,贴近实际,务实创新。

本书编写的出发点是基于机器视觉与传感器的理论讲解与实际应用,通过工作项目与任务的教学方法,介绍了图像采集、图像处理、机器人内部传感器、触觉传感器、力觉传感器、其他外部传感器,并逐渐过渡到机器人传感器系统典型案例的分析与掌握。全书共7个项目,25个便于应用的教学任务,让学生通过任务全面掌握机器视觉与传感器的基本知识与使用要领,将“学做一体”的科学职业技能培养思想贯穿全书。

本书由天津中德应用技术大学邵欣博士(副教授)、马晓明、李云龙、檀盼龙、王峰以及天津机电职业技术学院徐红英教授共同编著,北京赛佰特公司副总经理张方杰担任主审、高级工程师唐冬冬协助校稿。参编人员具体负责的章节为:天津中德应用技术大学邵欣(项目二以及项目三,约8万字)、马晓明(项目四,约6万字)、檀盼龙(项目六,约6万字)、李云龙(项目七,约7万字)、王峰(项目一,约4万字),天津机电职业技术学院徐红英(项目五,约3万字)。

编纂期间,编委参考了同类书籍、教材和网络资料,并且获得了北京赛佰特公司的大力支持,于此处表示真诚感谢!

由于作者水平有限,书中疏漏之处,万望广大读者朋友斧正指点,可以将建议与意见发送邮件至:shaoxinme@126.com。

编 者

2017年5月

# 目 录

项目一 图像采集单元	1
任务一 镜头	2
任务二 光源	8
任务三 图像传感器	13
任务四 图像采集卡	20
项目二 图像处理单元	30
任务一 图像增强	31
任务二 图像分割	44
任务三 边缘提取	49
任务四 图像配准	56
项目三 机器人内部传感器	66
任务一 机器人位移与速度的测量	67
任务二 机器人中加速度传感器的应用	72
任务三 机器人平衡姿态的检测	77
项目四 触觉传感器	81
任务一 机器人被测目标的接触检测	81
任务二 机器人接近被测物的检测	84
任务三 机器人可靠抓取被测物的检测	93
任务四 机械手握力控制与支撑力检测	97
项目五 力觉传感器	107
任务一 关节力的检测	107
任务二 装配时的腕力检测	116
任务三 机械手指力的检测	119
任务四 力觉传感器在打磨机器人中的应用	122
项目六 其他外部传感器	127
任务一 机器人对距离的探测	127
任务二 机器人巡线检测	136
任务三 机器人对压力的检测	147



任务四 机器人对光源的检测.....	156
项目七 机器人传感系统分析.....	171
任务一 机器人装配传感系统.....	172
任务二 机器人导航系统.....	181
任务三 机器人手爪传感系统.....	190
参考文献.....	210

## 项目一 图像采集单元

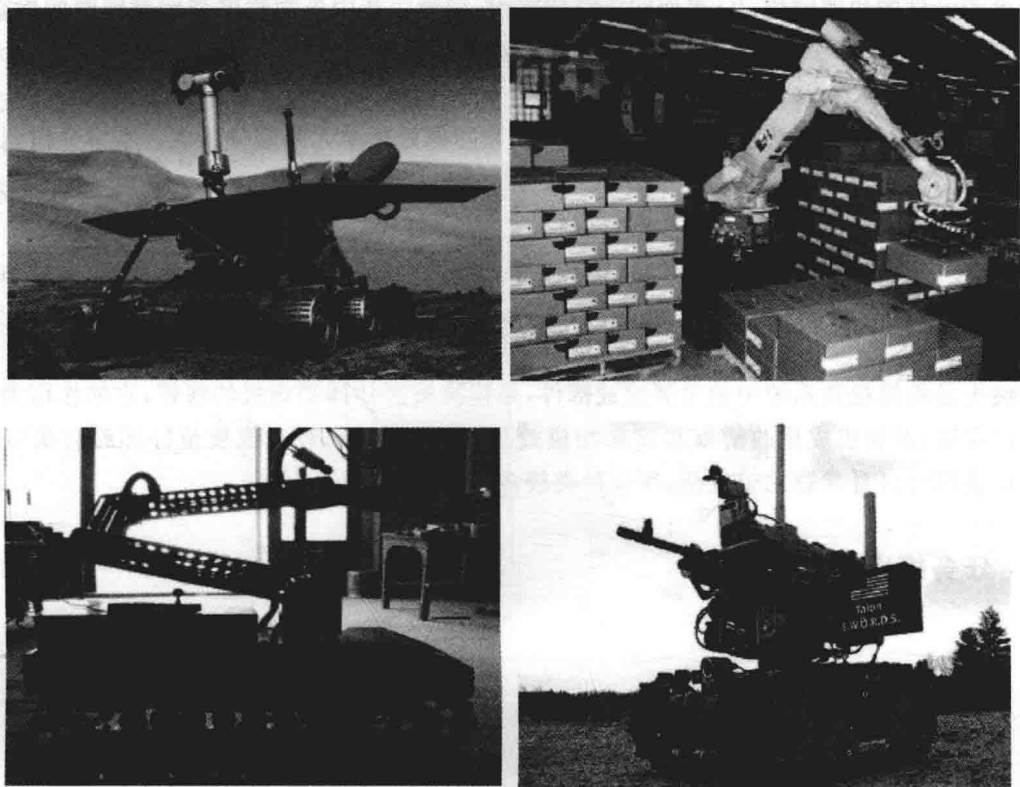


图 1.0-1 机器视觉的各种应用

现代生产涉及各种检查功能、测量功能以及识别功能。这些功能的具体应用场景包括：自动流水线上的元件定位、汽车配件的尺寸检查、纯净水瓶盖的印刷质量检测、产品外包装的条码检测和字符识别等，这些功能的共同特点是连续大批量生产以及外观质量要求较高。在很长一段时间内，这种具有高度重复性和智能性的工作一直由人工来完成。在工厂的流水线上，大量的检测工人来执行这道工序。其结果是不仅无法满足 100% 的检验合格率，而且给企业带来巨大的人工成本和管理成本。现代企业之间的竞争，已经不允许存在丝毫的缺陷，很多检测，比如微小尺寸的精准快速测量、匹配形状、辨识颜色等，人类的肉眼无法连续稳定地进行辨识，所以人们开始考虑将计算机的可靠性、快速性、可重复性与人类视觉的抽象能力和高度智能化相结合，由此产生了机器视觉的概念。

机器视觉使用机器代替人眼来做测量和判断，一般分为下面几个步骤：先使用相机将被拍摄目标转换成图像信号；根据像素分布、颜色和亮度等信息，图像信号会变成数字信号并传送给专用图像处理系统；专用图像处理系统对这些信号进行各种数字运算，抽取目标特征，包



括位置、数量、面积、长度等信息；最后根据预设条件输出最终结果，如角度、尺寸、个数、偏移量、合格/不合格、有/无等。机器视觉的特点是客观、自动化、高精度和非接触。与一般意义上的图像处理相比，机器视觉更多强调的是速度、精度以及工业现场环境下的可靠性。机器视觉非常适用于大批量生产过程中的检查、测量和辨识，如装配尺寸精度、零件装配完整性、位置/角度测量、零件加工精度、特性/字符识别、零件识别等。其一般应用行业为制药、汽车、制造、电子与电气、医学、包装食品等，如对汽车中仪表盘加工精度的检查、对管脚数目的检查、贴片机上电子元件的快速定位、IC表面印字符的辨识、胶囊生产中外观缺陷和胶囊壁厚的检查、轴承生产中破损情况和滚珠数量的检查、食品包装上对生产日期的辨识、标签贴放位置的检查等。

典型的机器视觉系统一般由图像采集单元和图像处理单元两部分组成。本章介绍图像采集单元部分。

## 任务一 镜头

镜头是机器视觉系统中的重要组成部件，是连接被测物体和相机的纽带，它的作用类似于人类的眼睛，对相机成像的清晰程度和拍摄效果有直接影响，对成像质量好坏起着决定性作用。镜头因为自身参数比较复杂，所以种类较多。

### 一、任务提出

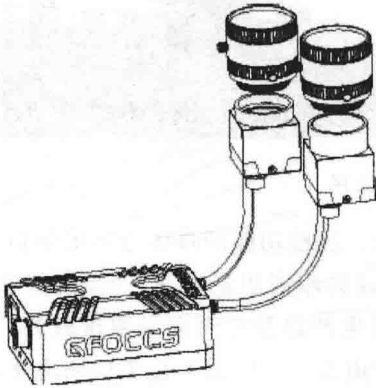


图 1.1-1 GFOCUS 相机



如图1.1-1所示，GFOCUS相机系统为什么使用镜头？什么是镜头？我们又该如何选择镜头呢？

### 二、任务信息

镜头是由若干共轴的透镜组成，这些透镜彼此有空气间隔。因为成像时光线要通过每个透镜并且产生多次折射，所以镜头实际成像光路图非常复杂。在几何光学领域，研究共轴球面理想光学系统成像时，一般忽略镜头的实际结构，从而将问题简化。





镜头的主要作用是把目标的光学图像聚焦,聚焦图像呈现在图像传感器的光敏面阵上。视觉系统处理的所有图像信息都是通过镜头得到的,镜头的质量直接影响视觉系统的整体性能。

在实际使用中,镜头的选择一般依赖于它的参数,下面详细介绍常用的镜头参数。

## 1. 镜头的参数

### (1) 焦距

平行光线经过镜头的折射,在其主轴上聚成一个清晰的点,叫做焦点,如图 1.1-2 中的点 F 和 F'。从镜头中心到焦点的距离,称作焦距。相机的焦距一般会印刻在镜筒的外圆周上,单位为 mm。

焦距跟成像大小有着直接的关系,其关系为:

$$h' = -f' \tan \omega \quad (1.1-1)$$

式中: $h'$ 为像高, $f'$ 为焦距, $\omega$ 为半视场角,负号表示所成的像是倒立的。

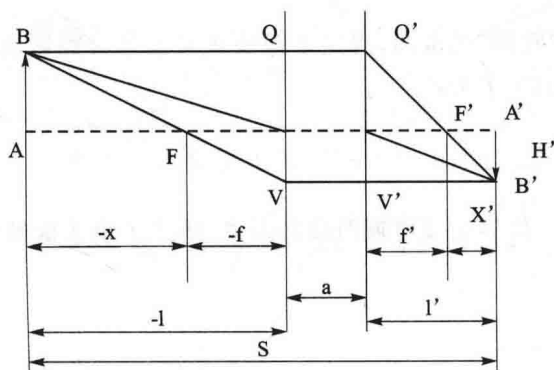


图 1.1-2 理想光学成像示意图

### (2) 相对孔径与光圈数 F

相机镜头是由多个透镜组成,这些透镜具有一定直径。一般还设置一个直径可变的金属光孔来限制进入镜头的光束大小,这个金属光孔称为“孔径光阑”。孔径光阑对它前方光学元件所成的像,称为“入射光瞳”,如图 1.1-3 所示。

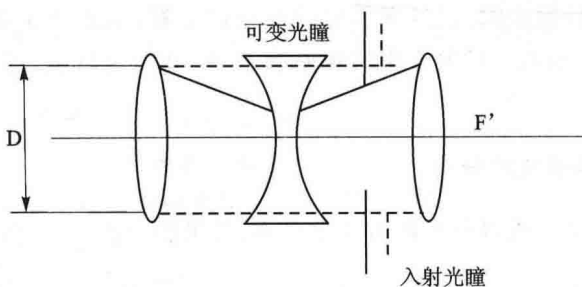


图 1.1-3 相对孔径示意图

相对孔径的定义是相机镜头的入射光瞳直径  $D$  与焦距  $f'$  的比值,即  $D/f'$ 。相对孔径的



倒数称作光圈数,用  $F$  表示,一般会标在镜头外径上。相对孔径跟像面照度的关联性很大。一般来说整个像面照度分布不均匀,由中心向边缘逐渐减弱。增加相对孔径有助于提高像面照度。

### (3) 视 角

视角描述了镜头能“看”多宽的能力,一般用  $2\omega$  表示。一般镜头的孔径光阑完全对称,而且镜头处于同一介质中,此时物方视角和像方视角相等,所以在使用中一般不区分物方视角和像方视角。

### (4) 工作距离

工作距离是被摄物体到镜头的距离,也可称为物距,用  $l$  表示。一般镜头可以看到无穷远处,所以不讨论镜头的最大工作距离,但是镜头存在最小工作距离,如果镜头在小于最小工作距离的距离工作,将无法得到清晰的图像。在镜头上有一个调节圈,通常比较大,可以用来调节工作距离。调节圈上面会标出镜头的工作距离。

### (5) 视 野

视野描述了镜头能“看到”的范围,规定了镜头正常工作时能覆盖的最大工作空间,用  $2h$  表示。视野与工作距离的关系为:

$$h = l \tan \omega \quad (1.1-2)$$

### (6) 景 深

景深指调焦平面前后能够生成清晰图像的距离,描述了镜头能够“看”清楚的“度”。计算公式如下:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 \quad (1.1-3)$$

$$\Delta_1 = \frac{FZ'l^2}{f'^2 - FZ'l} \quad (1.1-4)$$

$$\Delta_2 = \frac{FZ'\rho^2}{f'^2 + FZ'l} \quad (1.1-5)$$

式中: $\Delta_1$  为前景深, $\Delta_2$  为后景深, $F$  为光圈数, $Z'$  为弥散斑直径。

### (7) 镜头成像质量的评价

镜头成像的好坏一般用像差来描述。像差是实际成像与理想成像之间的差异。相差产生的原因有很多,如在设计镜头时,设计者需要一些近似计算,从而产生相差;在镜头生产时,由于加工精度不达标造成相差。目前常用的像差有 7 种,分别是彗差、球差、场曲、像散、位置色差、畸变和倍率色差。

## 2. 机器视觉系统中镜头的分类

镜头的结构复杂多样,所以分类的方法也很多,常见的分类方法有以下 3 种。

### (1) 按照焦距分类

依据焦距是否能够调节,镜头可以分为定焦镜头和变焦镜头两种,其中变焦镜头可以分为手动变焦镜头和电动变焦镜头两类。按照焦距长短,镜头可以分为短焦距镜头、中焦距镜头和长焦距镜头三种,焦距范围的划定随着画幅尺寸不同而改变。常见的 135 相机镜头的焦距一



一般为:

- ① 短焦距镜头, 焦距 7.5~28mm;
- ② 中焦距镜头, 焦距 35~85mm;
- ③ 长焦距镜头, 焦距 135~300mm;
- ④ 超长焦距镜头, 焦距 400~1200mm。

#### (2) 按照有效像场分类

最大像场范围的中心部位有一个区域, 它能使存在于无限远处的景物形成清晰影像, 这个区域称为清晰像场。相机的靶面一般都位于清晰像场之内, 这一限定范围称为有效像场。根据有效像场的不同, 镜头可以分为:

- ① 135 型相机镜头, 有效像场尺寸为 24mm×36mm;
- ② 127 型相机镜头, 有效像场尺寸为 40mm×40mm;
- ③ 120 型相机镜头, 有效像场尺寸为 80mm×60mm;
- ④ 大型相机镜头, 有效像场尺寸为 240mm×180mm。

#### (3) 按照镜头接口类型分类

相机跟镜头之间的接口有许多不同的类型。工业相机常用的接口有 EF 接口、C/Y 接口、SA 接口、OM 接口、C 接口以及 CS 接口等。接口类型的不同不会影响镜头的性能和质量, 但是接口类型不同, 生产商的制造方式和使用的传输协议就不同, 所以各种接口之间需要转接口。

除了以上几种常见分类之外, 镜头还可以根据相对孔径以及视场角等进行分类。

### 3. 镜头的选择

除了镜头的有关参数和分类, 在选择镜头时还要总结参数和像差之间的相互关系。

- ① 球差的大小与被拍摄物体光圈以及位置有关, 当被拍摄物体位置确定后, 光圈缩小 1 倍就会导致球差缩小 1 倍;
- ② 彗差的大小与光圈大小有关, 如果光圈缩小, 就可以减小彗差对成像的影响;
- ③ 像散的大小与视场的二次方成正比, 与孔径无关, 当工作距离已经确定时, 就应该选择较小的视场或较小的视角;
- ④ 场曲与孔径无关, 与视场的平方成正比, 减小像散的同时会遏制场曲;
- ⑤ 畸变与视场的三次方成正比, 与孔径无关, 在工作距离确定的时候, 畸变大小与  $\tan 3\omega$  成正比;
- ⑥ 倍率色差只跟视场的一次方成正比, 与孔径无关。

掌握了以上知识, 就可以正确地选择镜头了。

正确地选择镜头不是一件容易的事情, 有很多因素要综合考虑。下面用一个实际例子讲述镜头的选择。

当对帘子布进行拍照时, 布幅宽 1.5m, 即视场最小为 1.5m。选用的相机是 CCD 线阵相机, 感光元件的尺寸是 40.96mm×10 $\mu$ m, 工作距离最大是 2m。帘子布的运行速度为 50m/m, 相机的曝光时间比较短, 要求像面照度比较大。为了减小像差, 应该尽量选择小的光圈和小的视场, 但是因为布幅的限制, 视场最小为:



$$2h = 1.5m \tag{1.1-6}$$

像面边缘的照度是：

$$E_{\omega} = E_0 \times \cos\omega^4 \tag{1.1-7}$$

当  $\omega$  是  $30^\circ$  时,边缘照度只有中心的一半左右;当  $\omega$  是  $40^\circ$  时,边缘照度等于中心的  $1/3$ 。由此可以看出,视场角的增大对象面边缘照度的影响较大。所以在选择视场角时,应该满足  $2\omega$  小于  $80^\circ$ 。要想增大像面照度,应该选择相对孔径较大、光圈较大的镜头,但是当光圈增大时,球差和彗差也随之增大。因此,光圈要根据实际情况进行选择。

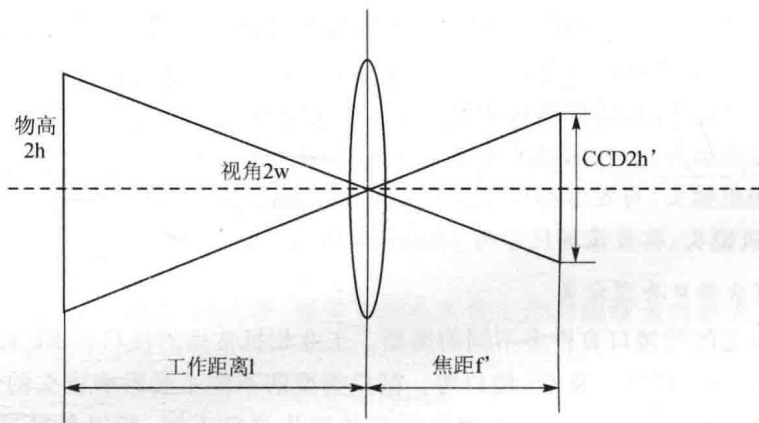


图 1.1-4 相机镜头焦距选取简图

在实际选择镜头时,可以按照图 1.1-4 所示进行近似计算。CCD 线阵相机的感光元件尺寸保持不变,即:

$$2h' \approx 40.96\text{ mm} \tag{1.1-8}$$

现在要做的工作主要是确定工作距离和焦距。由像面照度关系可知,如果选择  $2\omega$  等于  $60^\circ$ ,则工作距离为:

$$l = \frac{h}{\tan\omega} = 1.299m \tag{1.1-9}$$

计算结果小于 2m,符合工作距离的要求;

焦距结果为:

$$f = \frac{\tan\omega}{h'} = 35.4734mm \tag{1.1-10}$$

即可以选择 35mm 的镜头。

如果按照极限工作距离  $l$  等于 2 米计算,视角为:

$$2\omega = 41^\circ \tag{1.1-11}$$

这是视角的极限值,所以两倍的视角应该大于  $41^\circ$ 。

焦距的极限值为:

$$f' = l \times h' \times h = 54mm \tag{1.1-12}$$

即焦距可以小于 50 毫米。

根据以上计算结果,选择了两种镜头:一种是 35mm 定焦,F 值为 1:1.2,接口是 F 接口的镜头;另一种是 50mm 定焦,F 值为 1:1.2,接口为 F 接口的镜头。这两种镜头在应用中均符



合要求,而且经过图像矫正后,图片的质量可以提高很多,为后面的图像处理做好基础。

在选择镜头时,有时还需要考虑其他因素,如光源对成像的影响程度、景深对成像的影响程度等。本项目中拍摄的对象是帘子布,属于平面拍摄范围,因此对景深的要求不高。如果对景深有着较高要求,需要根据相关资料来确定景深的大小。


### 三、任务完成


GFOCUS 相机系统通过镜头将被测量对象反射的光折射在数字相机的像平面形成图像,是 C/CS 接口的镜头。

镜头是由若干共轴而又彼此有空气间隔的透镜组成,主要作用是将目标的光学图像聚焦在图像传感器(相机)的光敏面阵上。视觉系统处理的所有图像信息均通过镜头得到,镜头的质量直接影响到视觉系统的整体性能。在实际使用中,通常根据镜头的参数和实际应用情况进行选择。

### 四、任务拓展

想想看






图中所示为 GFOCUS 公司配备的 AOS 系列相机, 查找有关资料, 说明该系列相机配备的镜头参数是多大 ?

### 五、任务小结

镜头是图像采集的第一个器件,它好像人的“眼睛”一样。镜头的好坏关系到机器视觉系统中图像采集是否理想,选择镜头要考虑的因素比较多,只有综合考虑各个参数相互之间的联系及对成像的影响,选择出理想的镜头,才能拍摄出令人满意的图像。





## 任务二 光源

一个稳定可靠的机器视觉系统,不仅局限于在实验室获取一时性的优质图像,更重要的是在实际生产现场持续地获得高品质、高对比度的图像,即必须能够对工业生产现场可能出现的多种多样的外部条件的变化做出正确响应。这些外部条件中最可能出现不确定变化的就是环境光线的变化,所以提高照明光源的品质至关重要。

### 一、任务提出

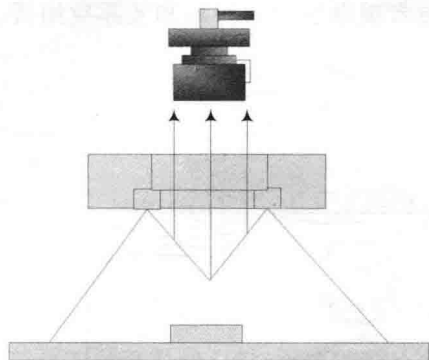


图 1.2-1 光源照射示意图



如图1.2-1所示,在该系统中,为什么相机要配合光源使用?

### 二、任务信息

图像采集是利用光源照射被观察对象,突出对象特征以利于镜头采集图像,进而为随后的图像分析及图像处理奠定基础。因此,光源的选择很大程度上决定了图像特征的采集及后续算法的复杂程度。合适的光源及照明技术有助于采集到特征明显的图像信息,从而使机器视觉系统达到最优化。

好的光源设计可以在突出图像特征的同时抑制不需要的干扰特征,在获得清晰的对比信息及提高信噪比的同时,减少光源位置及物体高速运动所带来的不确定性。而不恰当的光源设计则会造成非均匀照明的结果,进而导致图像亮度不均,使得图像特征和背景特征混淆,难以区分,干扰增加。

#### 1. 光源的主要参数

合适的光源需要有足够的亮度来突出拍摄目标的特征。机器视觉的对象大多是高速运动的物体,因此,适合的光源在物体位置发生变化时要具备稳定性和均匀性。与此同时还要考虑光源颜色、光源位置以及相机模式对图像采集的影响。

光可以分为可见光与不可见光,主要区别是波长的长短。不可见光主要指红外线、远红外线(波长大于760nm)、紫外线(波长小于380nm)等。可见光指波长在400nm到700nm之



间的光,如卤素灯、白炽灯、LED、高频荧光灯、氙灯等光源的光。机器视觉主要应用可见光照明,以下分析几种可见光的相关特性,其相关特性见表 1.2-1。

表 1.2-1 各种可见光相关特性

光源	寿命/小时	特点	颜色	亮度
白炽灯	1 000~2 000	发热多	白、偏黄	亮
卤素灯	5 000~7 000	发热多	白、偏黄	很亮
高频荧光灯	5 000~7 000	发热多	白、偏黄	亮
LED 灯	60 000~100 000	发热多	红、绿、蓝	较亮
氙灯	2 000~3 000	发热多	白	亮

在对可见光的特性进行分析的同时,要考虑不同光源是否能被制作成不同尺寸,从而达到对各个角度照明的目的,还需要考虑各种光源的反应速度是否足够敏捷,即是否能够在微秒级甚至于更短的时间内达到最大亮度,以及其使用寿命、成本及散热效果等。

最常见的光源是白炽灯,它可以将光传送到很多难以到达的地方,照明的同时产生大量的红外能量,且价格低廉,可以通过低压操作来延长使用时间,但白炽灯也存在很多问题,如发光效率低、反应时间长等;卤素灯光色不失真,使用时间长,但发热量较多;高频荧光灯使用寿命长,发热少,但显色性能不好,不容易做成不同尺寸来对各个角度照明;LED 灯单色性好,产生热量少,基本上实现了可见光的所有颜色,并且发光响应速度快,能够在纳秒级的时间内达到稳定状态且功耗极低,在面对高速运动的物体时,LED 灯抗冲击性以及防震性好,因此是当前主流的机器视觉光源。

## 2. 光源位置的选择

在选定 LED 作为光源的情况下,它的形状和位置的选择也十分重要。光源的位置主要包括结构光照明、前向照明以及后向照明。LED 光源的形状包括环形光源、背光源、同轴光源以及位光源。环形光源主要应用于需要不同颜色组合和照射角度的物体;背光源能够提供高强度背光照明,突出物体特征;同轴光源可以对表面不平整物体带来的阴影干扰起到较好的屏蔽作用;位光源一般应用于高速运转、精度高、体积小的物体。

将 LED 光源的形状及位置结合起来可以得到如下结论:

① 前向照明,将光源放在相机和被测物体的前方,如图 1.2-2 所示,涉及的光源有条形光源和环形光源。前向照明需要考虑的因素包括背景图像与被测特征的区别度,主要针对低速运动物体表面斑点、缺陷或者其他细节特征。

② 后向照明,将光源放在被测物体及相机的后面,如图 1.2-3 所示,涉及的光源有点光源、背光源等。后向照明需要考虑的因素包括光通量及被测物体的透明度,主要应用场合包括具有光通量物体特征的检测及透明物体斑点检测。

③ 结构光照明,如图 1.2-4 所示,是指通过透镜、光圈等技术手段,使光源发出的光具有一定形状,能够满足被测物体与其他背景之间的划分。结构光照明涉及的光源包括 AOI 专用光源及球积分光源等,主要应用场合包括三维图像及半球面内壁检测。

本节使用帘子布的斑点特征为对象。为了最大限度地 will 斑点特征与背景图像分开,采用后向照明。后向照明需要验证光通量。光通量是人眼能感觉到的辐射能量,单位是流明。光



通量作为发光强度的主要指标,可以表示为

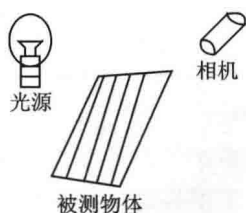


图 1.2-2 前向照明

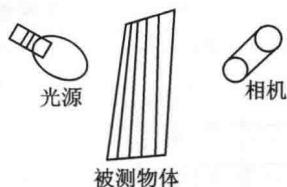


图 1.2-3 后向照明

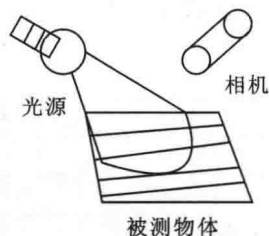


图 1.2-4 结构照明

$$E = \frac{Ix}{D^2} \quad (1.2-1)$$

其中,  $D$  是光源到被测物体的距离,  $x$  是发光强度。因为帘子布疵点检测使用后向照明, 所以需要考虑光源所处角度的不同所带来的发光强度不同, 如图 1.2-5 所示。

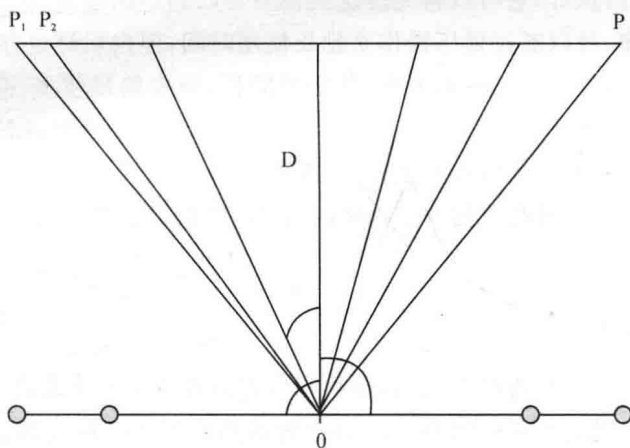


图 1.2-5 后向照明光源分布

后向照明光源到达各个位置的光照强度是

$$E_j = \sum_{i=1}^N \frac{l}{D^2 \left[ l + \left( \tan\left(\theta_j - \frac{d_i}{D}\right) \right) \right]} \quad (1.2-2)$$

其中,  $E$  是光照强度,  $\theta$  是光源与参考点的角度。

对于二维空间来说, 可以推导出光源强度是

$$E_{ij} = \sum_{i=1}^N \frac{l}{D^2 \left[ l + \left( \tan(\theta_j) - \frac{d_i^x}{D} \right)^2 + \left( \tan(\sigma_i) - \frac{d_i^y}{D} \right)^2 \right]} \quad (1.2-3)$$

其中  $d_i^x, d_i^y$  是光源在二维空间中的坐标位置。

在机器视觉领域, 针对不同的物体特征, 需要考虑的光源因素各不相同。本项目通过线阵 CCD 相机对帘子布织物的疵点特征的直面拍摄, 选取 LED 作为光源并采取后向照明的方式, 从而获得清晰的织物疵点图像。





### 3. 光源颜色对照明效果的影响

在实际应用中,还要考虑光源颜色对照明效果的影响程度。使用光源的目的是把背景与被测物体之间的特征差别尽量放大,从而获得高对比度、区别明显的图像。光源颜色对处理精度和速度的影响很大,对整个系统的成败起决定性作用。因此,可以通过控制光源的颜色,找出适合在不同照明情况下识别图像特征的最佳光源颜色,从而提高图像的分辨率,进而为后续的图像特征提取与算法编写做好准备。

#### (1) 光源的优化

光的三原色红( $R$ )、绿( $G$ )、蓝( $B$ )为互补色。所有的光都是由不同比例的红、绿、蓝三原色组合而成。光照在被测物体上时,被测物只反射和自身颜色相同的色光,而不同色光照在互补色物体上的时候完全不反光。

三原色的色光叠加是白光,色彩叠加是黑色。因此,可以将光源分解为对应的红、绿、蓝三原色来分析,同时假设红、绿、蓝三原色的光谱不重叠,从而分析出适合相机感应区域的红、绿、蓝对应值,也就是合适的光源颜色。

$$\begin{aligned} R &= \int_{\lambda_{R2}}^{\lambda_{R1}} i(\lambda) s(\lambda) f_R(\lambda) d\lambda \\ G &= \int_{\lambda_{G2}}^{\lambda_{G1}} i(\lambda) s(\lambda) f_G(\lambda) d\lambda \\ B &= \int_{\lambda_{B2}}^{\lambda_{B1}} i(\lambda) s(\lambda) f_B(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (1.2-4)$$

式 1.2-4 中, $s(\lambda)$ 是光谱反射率; $i(\lambda)$ 是光源颜色的功率谱; $f_R(\lambda)$ 、 $f_G(\lambda)$ 、 $f_B(\lambda)$ 是相机对色光的光谱响应函数。

在通常情况下,图像是否清晰取决于色彩对比度,清晰的图像一般意味着对比度大。在对比度较小的时候,图像的特征不明显,画面显得灰蒙蒙。因此,如果想要获得高清晰度的图像特征,就需要找到合适的色彩对比度。所有光色都可以通过红、绿、蓝调和得到。因此,通过定义光的三原色红、绿、蓝的对比度,就可以得到色彩对比度的最大值。

$$\Delta = (\Delta_R(i_R, \lambda_R), \Delta_G(i_G, \lambda_G), \Delta_B(i_B, \lambda_B)) \quad (1.2-5)$$

其中,

$$\begin{aligned} \Delta_R(i_R, \lambda_R) &= |R_1 - R_2| = i_R f_R \cdot |s_1(\lambda_R) - s_2(\lambda_R)| \\ \Delta_G(i_G, \lambda_G) &= |G_1 - G_2| = i_G f_G \cdot |s_1(\lambda_G) - s_2(\lambda_G)| \\ \Delta_B(i_B, \lambda_B) &= |B_1 - B_2| = i_B f_B \cdot |s_1(\lambda_B) - s_2(\lambda_B)| \end{aligned}$$

要想得到 $|\Delta|$ 的最大值,即色彩对比度的最大值,可以通过分别最大化 $\Delta_R$ 、 $\Delta_G$ 、 $\Delta_B$ 得到。因为光谱响应函数 $f_R$ 和光谱反射率 $s_R(\lambda)$ 已知,因此可以通过选择光源功率谱 $i_R$ 得到 $\Delta_R$ 的最大值,从而得到 $|\Delta|$ 的最大值。定义

$$i_R(\lambda_R) = \frac{R_{\max}}{f_R(\lambda_R) \max\{S_1(\lambda_R), S_2(\lambda_R)\}} \quad (1.2-6)$$

其中, $R_{\max}$ 是成像系统可以得到的 $R$ 的最大值, $f_R$ 是成像系统对应红光的光谱, $S_R$ 是测量物对红光的光谱反射率。通过上式得到 $\Delta_R$ ,从而得到 $|\Delta|$ 的最大值。

#### (2) 光源中滤光镜的使用

图像特征的分辨率理论上取决于光源的功率谱分布,但在现实中,光源三色光的功率谱一