

# 第1章 绪论

人眼与大脑的协作使人们可以获取、理解及处理视觉信息。人类利用视觉感知外界环境信息的效率很高,其中有80%左右是通过视觉得到的。近年来,随着计算机技术和数字信号处理技术的迅猛发展,人们学会了使用相机获取环境图像并将其转换成数字信号,然后利用计算机实现对视觉信息的处理,这样就形成了一门新兴的学科——计算机视觉。计算机视觉是一门研究如何使机器“看”的科学,而机器视觉则是建立在计算机视觉理论上,关注图像的处理结果,使机器感知环境中物体的形状、位置、姿态、运动等几何信息并控制其接下来行为的技术。目前,机器视觉技术已经在传统行业中得到广泛应用,尤其是在一些不适合人工的危险工作环境或人眼难以满足要求的场合,常利用机器视觉来替代人工视觉,不仅提高了生产效率,并且在精度、质量和速度方面展现出巨大优势。由此可见,未来机器视觉的发展一定有非常广阔的前景。本章针对机器视觉的基本原理以及应用进行解释和说明。

## 1.1 机器视觉的概念及系统构成

### 1.1.1 机器视觉的概念

提起视觉,人们会自然地联想到人眼。人的眼睛是人获知外界事物多元信息的一个重要渠道,其将获得的信息传入大脑,由大脑结合人类知识经验处理分析信息,完成信息的识别<sup>[1-3]</sup>。通俗来讲,机器视觉是机器的“眼睛”,但其功能不仅包括模拟视觉对图像信息的接收,还包括模拟大脑对图像信息的处理与判断<sup>[4-5]</sup>。

机器视觉涉及的领域非常广泛且复杂,因此目前还没有明确的定义。美国制造工程师学会(Society of Manufacturing Engineers, SME)机器视觉分会和美国机器人工业协会(Robotic Industries Association, RIA)的自动化视觉分会对机器视觉进行了如下定义:“机器视觉是研究如何通过光学装置和非接触式传感器自动地接收、处理现实场景的图像,以获得所需信息或用于控制机器人运动的学科。”机器视觉系统通常通过各种软硬件技术和方法,对反映现实场景的二维图像信息进行分析、处理后,自动得出各种指令数据,从而控制机器的动作。例如,通过检测产品表面划痕、裂纹、磨损、粗糙度、纹理等,进而划分产品质量,

从而达到质量控制的目的<sup>[6-8]</sup>。

与人类视觉相比,机器视觉有很多优势,具体如下。

(1) 安全可靠。观测者与被观测者之间无接触,不产生任何损伤,因此机器视觉可以广泛应用于不适合人工操作的危险环境或长时间恶劣的工作环境中,十分安全可靠。

(2) 生产效率高,成本低。机器视觉能够快速地检测产品,适用于高速检测场合,大大提高了生产效率和生产的自动化程度,同时机器不需要停顿,能够连续工作,这也极大提高了生产效率。机器视觉早期投入成本高,但后期只需要支付机器的保护、维修费用即可。虽然人工和管理成本逐年上升,但是随着计算机处理器价格的下降,机器视觉的性价比越来越高,长远来看,机器视觉的成本会越来越低<sup>[9]</sup>。

(3) 精度高。机器视觉的精度能够达到千分之一英寸(1英寸=0.025 4m),并且随着硬件的更新,精度越来越高<sup>[10]</sup>。

(4) 准确性高。机器视觉检测不受主观控制,只要具有相同配置的多台机器参数设置一致,即可保证精度相同。

(5) 重复性好。人工重复检测产品时,即使是同一种产品的同一特征,也可能会得到不同的检测结果;而机器视觉检测具有固定性,可以一次次完成检测工作并得到相同的检测结果,重复性好。

(6) 检测范围广。除肉眼可见的物质外,机器视觉还可以检测红外线、超声波等,扩展了视觉检测范围。

机器视觉系统的应用领域越来越广泛,在工业、农业、国防、交通、医疗、金融甚至体育、娱乐等行业都获得了广泛应用,可以说,其已经深入人们的生活、生产和工作的各个方面<sup>[11-13]</sup>。

### 1.1.2 机器视觉系统构成

随着技术的演进,在实际工作中,机器视觉系统的工作流程如图 1-1 所示。

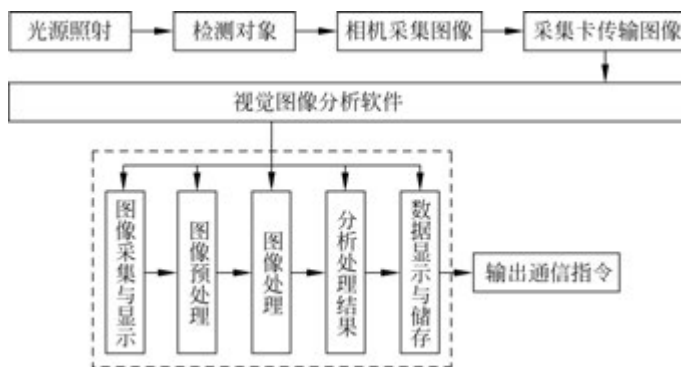


图 1-1 机器视觉系统的工作流程

当机器视觉系统工作时,待光照环境准备好后,检测目标进入相机视野范围,此时图像采集卡开始工作,相机对其进行扫描并输出相关信号;其次,图像采集卡接收图像模拟信号或数字信号并将其转换成数据流并传输到图像处理单元,机器视觉软件中的图像采集部分将图像存储到计算机内存中,并对图像进行识别、分析、处理,以完成检测、定位、测量等任务;最后,机器视觉系统显示处理结果,并将结果或控制信号发送给外部单元,以完成对机

器设备的运动控制。

典型的机器视觉硬件系统一般包括光源、镜头、相机、图像采集单元、图像处理单元、交互界面等,如图 1-2 所示。

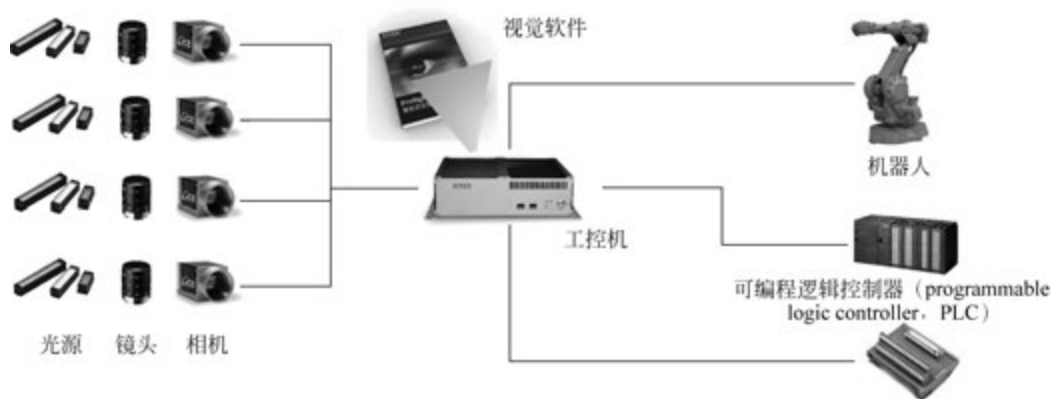


图 1-2 典型的机器视觉硬件系统

### 1. 光源

光源作为辅助成像设备,是机器视觉系统的重要组成部分,它为机器视觉系统获取图像提供足够的光线<sup>[14]</sup>。在机器视觉系统中,光源的作用具体如下:①显现被测物的重要特征;②消隐不感兴趣区域;③保证成像效果有利于图像处理;④保证图像稳定;等等。因此,光源直接影响相机成像质量,进而影响机器视觉系统性能。

### 2. 镜头

镜头的主要作用是将目标成像在图像传感器的光敏面上。如果将机器视觉系统与人类视觉系统进行类比,那么镜头类似于人眼的晶状体。只有有了镜头,相机才可以输出清晰的图像。在机器视觉系统中,镜头和相机常作为一个整体出现,其质量直接影响机器视觉系统的整体性能,因此合理地选择和安装镜头是决定机器视觉成像子系统成败的关键<sup>[15]</sup>。

### 3. 相机

相机,又称工业相机,俗称摄像机,是一种将影像转化成数字信号或者模拟信号的工具。相比于传统的民用相机,它具有高的图像稳定性、传输能力和抗干扰能力等,是机器视觉系统中的一个关键组件。选用相机时,要考虑到检测产品的精度要求,检测物体的速度,是动态检测还是静态检测,相机的类型、参数、价格等。

### 4. 图像采集单元

图像采集单元通常采用的是图像采集卡的模式,图像采集卡的功能是将图像信号采集到计算机中,以数据文件的形式保存在硬盘中。实际上,图像采集卡并不是在任何情况下都可以使用,而是要考虑工业相机的接口问题,一般相机连接(camera link)接口是一定需要图像采集卡的,而网络接口与 USB2.0、USB3.0 接口由于采集卡已集成到计算机主板上,基本不再需要采集卡。

### 5. 图像处理单元

图像处理单元主要通过计算机处理信息,之后将其输入控制机构进行具体操作。本书主要运用 HALCON 图像处理软件对图像进行增强、平滑、特征提取、识别与理解等。

## 6. 交互界面

交互界面是指人和计算机进行信息交换的通道,用户通过交互界面向计算机输入信息,进行操作;而计算机则通过交互界面向用户提供信息,以供阅读、分析和判断。软件的交互界面是用户直接看到的内容,也是使用软件操作的平台,因此,交互界面的设计应以简洁易做、可操作性强为主。

## 1.2 机器视觉的应用

近几年,随着人工智能技术的发展,机器视觉逐渐得到应用,对比人工,其精度、质量和速度都拥有极大优势。如今,我国机器视觉技术在工业、医学、交通、农业和生活等领域得到广泛应用。

### 1.2.1 在工业领域的应用

机器视觉在工业领域的应用比较广泛,尤其是在检测方面,其在保证产品质量和可靠性的同时,大幅度提高了生产速度。例如,在进行食品包装加工、饮料行业的各种质量检测以及半导体集成块封装质量检测时,机器视觉极大地提高了其生产速度。此外,在装配机器人视觉检测、搬运机器人视觉导航方面,机器视觉也有广泛应用。

### 1.2.2 在医学领域的应用

在医学领域,随着人们对药品以及医疗器械安全性问题的日益关注,许多医院利用机器视觉技术辅助医生进行医学影像分析。在医学疾病诊断方面,如机器视觉技术基于X射线图像、超声波图像、显微镜图像、核磁共振图像、计算机断层扫描(computed tomography, CT)图像、红外图像、人体器官三维图像等进行病情诊断和治疗,帮助医护人员进行病人检测与看护。另外,机器视觉技术还可以应用在自动细胞计数与统计方面,其利用数字图像的边缘提取与图像分割技术,对细胞医学图像数据进行检测,不仅节省了人力与物力,而且提高了工作效率。

### 1.2.3 在交通领域的应用

随着计算机技术的不断普及,国内外许多科研机构、高等院校以及汽车厂商等将机器视觉技术大量运用于汽车辅助驾驶系统中,主要包括视频检测系统、安全保障系统、车牌识别系统等。在视频检测方面,机器视觉技术主要运用图像处理技术与计算机视觉技术对图像进行分析,以实现车辆、行人等交通目标运动的识别与跟踪。另外,机器视觉技术通过识别系统对交通行为进行解析,从而完成各种交通数据的采集、交通事件的检测等。在汽车辅助驾驶方面,机器视觉技术主要用于进行车流量监控、车辆违规判断及车牌照识别和汽车自动驾驶等。

### 1.2.4 在农业领域的应用

当前,在农业领域,机器视觉技术主要用于进行果蔬采摘、果蔬分级、农田导航及各种作

物生长因素检测等。作为传统的农业生产大国,机器视觉技术在我国农业生产上的应用前景不言而喻,其在农产品升级、实行优质优价方面,可以产生更好的经济效益,意义重大。

### 1.2.5 在生活领域的应用

在生活中,机器视觉技术也得到了广泛应用。在大数据、物联网的时代背景下,智能家居正走入寻常百姓家,无论是自动感知光强的智能窗帘,还是能自动避障的扫地机器人,都离不开机器视觉技术。随着科技的发展进步,无人驾驶技术的实用化进程加快,相信在不久的将来,曾经出现在科幻电影中的场景会成为人们期盼已久的现实。此外,定位导航作为人们生活中不可或缺的一部分,其定位准确性需要加强,而机器视觉技术在该应用中发挥着重要作用。

## 本章小结

本章主要介绍了机器视觉的概念、系统构成及应用。后续章节将从编程软件(MATLAB)、硬件(工业相机、镜头、光源)、算法(预处理、分割、特征表示与描述)、应用案例等方面进行详细展开,系统地介绍机器视觉系统及其应用。

## 参考文献

- [1] CHEN Y R, CHAO K, KIM M S. Machine vision technology for agricultural applications[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2002, 36(2-3): 173-191.
- [2] SNYDER W E, QI H. *Machine vision*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [3] RANFT B, STILLER C. The role of machine vision for intelligent vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2016, 1(1): 8-19.
- [4] LABUDZKI R, LEGUTKO S, RAOS P. The essence and applications of machine vision[J]. *Tehnicki Vjesnik*, 2014, 21(4): 903-909.
- [5] GOLNABI H, ASADPOUR A. Design and application of industrial machine vision systems[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2007, 23(6): 630-637.
- [6] BENBARRAD T, SALHAOUI M, KENITAR S B, et al. Intelligent machine vision model for defective product inspection based on machine learning[J]. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 2021, 10(1): 7.
- [7] PATEL K K, KAR A, JHA S N, et al. Machine vision system: a tool for quality inspection of food and agricultural products[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2012, 49: 123-141.
- [8] CUBERO S, ALEIXOS N, MOLTÓ E, et al. Advances in machine vision applications for automatic inspection and quality evaluation of fruits and vegetables[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2011, 4: 487-504.
- [9] CHEN T, WANG Y, XIAO C, et al. A machine vision apparatus and method for can-end inspection[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2016, 65(9): 2055-2066.
- [10] SHEB H, LI S, GU D, et al. Bearing defect inspection based on machine vision[J]. *Measurement*, 2012, 45(4): 719-733.
- [11] AL-KINDI G A, BAUL R M, GILL K F. An application of machine vision in the automated inspection of engineering surfaces[J]. *The International Journal of Production Research*, 1992, 30(2): 241-253.

- [12] REN Z, FANG F, YAN N, et al. State of the art in defect detection based on machine vision[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2022, 9(2): 661-691.
- [13] WANG J, FU P, GAO R X. Machine vision intelligence for product defect inspection based on deep learning and Hough transform[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2019, 51: 52-60.
- [14] SIECZKA E J, HARDING K G. Light source design for machine vision[J]. Optics, Illumination, and Image Sensing for Machine Vision VI, 1992, 1614: 2-10.
- [15] LAM E Y. Compact and thin multi-lens system for machine vision applications[J]. Machine Vision Applications, 2008, 6813: 43-50.

## 第2章 机器视觉——硬件

视觉检测系统的硬件部分分别由相机、镜头、光源组成,其选型与组成对后期图像处理算法有至关重要的影响,甚至决定整个项目能否顺利进行下去。因此,为了满足视觉检测的需求,必须选择合适的硬件方案,以实现图像的采集。

### 2.1 相机

机器视觉技术应用的第一步就是图像输入,而图像的输入离不开相机(图 2-1)。相机是一种将现实场景的影像转化成数字信号或模拟信号的工具,是采集图像的重要设备。下面将对相机的分类、主要参数以及智能相机等进行详细介绍。



图 2-1 相机

#### 2.1.1 相机的分类

作为机器视觉系统中的核心部件,相机对于机器视觉系统的重要性是不言而喻的。按照不同的分类方式,相机又分为很多种,具体如下。

##### 1. 按色彩分

相机可以分为黑白相机和彩色相机。黑白相机直接将光强信号转换成图像灰度值,生成的图像是灰度图像;而彩色相机能获得景物中红、绿、蓝 3 个分量的光信号,输出彩色图像。一般除需要检测颜色的情况外,通常都是选择黑白相机,因为黑白相机更加高效,而且即使采集了彩色图像,将其输入软件中也是先转换成黑白图像后再进行后续处理。

## 2. 按感光芯片的技术分

相机可以分为电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)相机和互补金属氧化物半导体(complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS)相机,其芯片主要差异在将光转换为电信号的方式方面。对于 CCD 传感器,光照射到像元上,像元产生电荷,电荷通过少量的输出电极传输并转换为电流、缓冲、信号输出;对于 CMOS 传感器,每个像元自己完成电荷到电压的转换,同时产生数字信号。在大多数情况下,CCD 相机的成像质量是优于 CMOS 相机的,因此需要根据项目的需求选择合适的相机。例如,在弱光低速的检测环境下,可以选择 CCD 相机,有助于获得更丰富的图像细节;若追求高性价比、高成像速度和成像质量,可以选择新式的 CMOS 相机<sup>[1]</sup>。

## 3. 按传感器的像素排列方式分

相机可以分为面阵相机和线阵相机<sup>[2]</sup>。面阵相机是将图像以整幅画面的形式输出的,因此其可以应用到面积、形状、尺寸、位置甚至温度等测量方面;而线阵相机则是将图像逐行输出的,其可应用于图像区域是条形或者高速运动物体成像等方面。此外,两者在价格上也不同,面阵相机广泛应用于一些不需要太高精度的扫描场合,而线阵相机则主要应用于一些需要高精度扫描数据领域,因此线阵相机的市场价格相对于同一类型的面阵相机昂贵得多。

### 2.1.2 相机的主要参数

在选择相机前,首先对相机进行基本了解,相机参数一般在各厂商提供的产品信息中都有详细介绍。下面将介绍与机器视觉相关的相机主要参数。

#### 1. 分辨率

分辨率是指相机每次采集图像的像素点数,其主要用于衡量相机对物像中明暗细节的分辨能力,一般用  $W \times H$  的形式表示,其中  $W$ 、 $H$  分别表示图像水平方向/垂直方向上每一行/列的像素数。例如,30 万像素的相机,其分辨率一般为  $640 \times 480$ ,总像素数为 307 200,即 30.72 万像素。就同类相机而言,分辨率越高,相机的档次也越高。但是,选择相机时,并不是其分辨率越高越好,一般要求相机像素精度不小于项目测量精度。

#### 2. 像素尺寸

像素尺寸是指每一个像素的实际大小(单位:  $\mu\text{m}$ )。在分辨率一样的情况下,像素尺寸越小,得到的图像越大。

#### 3. 像素深度

像素深度是指每位像素数据的位数。一般 8bit 表示黑白图像,24bit 表示彩色 RGB 图像。总体来说,像素的深度越大,图像的颜色信息也越丰富,但相应的图像文件也越大。

#### 4. 帧率

帧率是指相机每秒拍摄的帧数。对于面阵相机,帧率一般为每秒采集的帧数(单位: f/s);而对于线阵相机,帧率一般为每秒采集的行数(单位: Hz)。帧率越大,每秒捕捉到的图像越多,图像显示越流畅。通常,一个系统要根据被测物的运动速度大小、视场大小、测量精度计算得出需要什么速度的相机。

#### 5. 曝光方式(exposure)和快门速度(shutter)

面阵相机有帧曝光、场曝光和滚动行曝光等几种常见方式;线阵相机都是逐行曝光的

方式,可以选择固定行频和外触发同步的采集方式,曝光时间可以与行周期一致,也可以设定一个固定的时间。数字相机一般提供外触发采图的功能,其快门速度一般可到  $10\mu\text{s}$ ,高速相机还可以更快。

## 6. 数字接口

相机的接口用于输出相机数据,一般有 USB2.0、USB3.0、Fire Ware、GigE、Camera Link 等类型。

### 2.1.3 智能相机

典型的机器视觉系统的图像采集功能由相机及图像采集卡完成,图像处理则是在图像采集/处理卡的支持下,由软件在计算机中完成。智能相机是一种同时具有图像采集、图像处理和信息传递功能的小型机器视觉系统,也是一种嵌入式计算机视觉系统(embedded machine vision system)。它将图像传感器、数字处理器、通信模块和其他外部设备集成到一个单一相机内,使相机能够完全替代传统的基于计算机的计算机视觉系统,可以独立完成预先设定的图像处理和分析任务。由于采用一体化设计,智能相机可降低系统的复杂度,并提高系统的可靠性,同时系统的尺寸也大为缩小。

## 2.2 镜头

镜头是一种与相机配套使用的成像设备,如图 2-2 所示。选择相机后,就可以考虑选择合适的镜头了。镜头的主要作用是将成像目标聚焦在图像传感器的光敏面上。



图 2-2 镜头

### 2.2.1 镜头分类

#### 1. 按焦距能否调节分

镜头分为定焦镜头和变焦镜头两大类。在机器视觉系统中,常用的是定焦镜头,其光学品质较为出众,但缺点是当拍摄距离确定后,其拍摄视角也就固定了,若要想改变视角画面,则需要拍摄者移动位置。依据焦距的长短,定焦距镜头又可分为鱼镜头、短焦镜头、标准镜头、长焦镜头四大类。需要注意的是,焦距的长短划分并不是以焦距的绝对值为首要标准,而是以像角的大小为主要区分依据,所以当靶面的大小不等时,其标准镜头的焦距大小也不同。变焦镜头涵盖了从超广角镜头到超望远镜头的各种焦距选择,目前专业级的变焦

镜头在光学品质方面几乎能够和定焦镜头相媲美。

## 2. 按镜头接口类型分

镜头和相机之间的接口有许多不同类型,物镜的接口有3种国际标准:C接口、CS接口和F接口。其中,C接口和CS接口是工业相机较为常见的标准接口,适用于物镜焦距小于25mm且物镜尺寸不大的情况;F接口是通用型接口,一般适用于焦距大于25mm的镜头。接口类型的不同与镜头性能及质量并无直接关系,只是接口方式不同,一般可以找到各种常用接口之间的转接口。

## 3. 按特殊用途分

### 1) 显微镜头

显微镜头一般是指成像比例大于10:1的拍摄系统所用镜头,但是现在的相机的像元尺寸已经做到 $3\mu\text{m}$ 以内,所以一般成像比例大于2:1时,也会选用显微镜头。

### 2) 微距镜头(macro)

微距镜头一般是指成像比例为(1:4)~(2:1)特殊设计的镜头。在对图像质量要求不是很高的情况下,一般可采用在镜头和相机之间加近摄接圈或在镜头前加近拍镜的方式达到放大成像的效果。

### 3) 远心镜头(telecentric)

远心镜头主要是为纠正传统镜头的视差而特殊设计的镜头,它可以在一定的物距范围内,使得到的图像放大倍率不随物距的变化而变化。这对被测物不在同一物面上的情况是非常重要的应用。

### 4) 紫外镜头和红外镜头

一般镜头是针对可见光范围内的使用设计的,而同一光学系统对不同波长的光线折射率不同,导致同一点发出的不同波长的光成像时不能会聚成一点,产生色差。常用镜头的消色差设计也是针对可见光范围的,紫外镜头和红外镜头即是专门针对紫外线和红外线进行设计的镜头。

## 2.2.2 镜头参数

### 1. 分辨率

分辨率表示镜头的空间极限分辨能力,常用拍摄正弦光栅的方法来测试。镜头的分辨率越高,成像越清晰。选择分辨率时,关键要看图像细节的要求。同时,镜头的分辨率应当不小于相机的分辨率。

### 2. 物距与焦距

物距是目标对象与相机的距离,而焦距指目标对象在镜头的像方所成像位置到像方主面的距离。焦距体现了镜头的基本特性,即在不同物距上,目标的成像位置和成像大小由焦距决定。对于相同的感光元件,搭配的镜头焦距越长,视场角越小,反之也成立(排除枕形畸变的影响)。图2-3所示为镜头焦距与视野间的关系。

### 3. 最大像面

最大像面是指镜头能支持的最大清晰成像范围(常用可观测范围的直径表示),超出这个范围所成像的对比度会降低,而且变得模糊不清。机器视觉成像系统中的传感器多制成长方形或正方形,因此镜头的最大像面常用它可以支持的最大传感器尺寸(单位为in,靶