



机器视觉 系统原理与应用

郑 睿 郅新凯 杨国胜 编 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

机器视觉系统原理与应用

郑 睿 郅新凯 杨国胜 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

目前市面上大多关于机器视觉的书籍都偏重于算法的介绍,本书则从系统设计的角度出发,对机器视觉系统的各方面进行了全方位介绍,因为实现可用的机器视觉系统是一项综合性工程,单独从算法方面着手可能会陷入困境。

全书共七章。第一章分析了机器视觉系统的组成,包括光源、相机和镜头的选型问题。第二章介绍了在机器视觉领域常用的三种函数库:OpenCV 函数库、MATLAB 图像处理工具箱和 HALCON 开发包以及它们的配置。第三、四章是算法和理论,我们对其推导部分进行了简化,以实现不需要太多理论基础就能理解的目的。第五至七章选择了机器视觉领域的经典案例,分析了其系统组成以及算法实现,相信读者通过这些案例的学习,对于大部分的工程问题都能参照并形成解决问题的思路。

本书适合大专院校相关专业作为选修课程的教材,也适合工程技术人员作为参考用书。

本书提供实例源代码,读者可以从中国水利水电出版社网站或万水书苑上免费下载,网址为: <http://www.waterpub.com.cn/softdown/>和 <http://www.wsbookshow.com>。

图书在版编目(CIP)数据

机器视觉系统原理与应用 / 郑睿, 郅新凯, 杨国胜
编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2014. 6
ISBN 978-7-5170-1881-0

I. ①机… II. ①郑… ②郅… ③杨… III. ①计算机
视觉 IV. ①TP302. 7

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第070325号

策划编辑: 周益丹 责任编辑: 李 炎 封面设计: 李 佳

书 名	机器视觉系统原理与应用
作 者	郑 睿 郅新凯 杨国胜 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)、82562819 (万水) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
经 售	
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	北京蓝空印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 10.5印张 218千字
版 次	2014年6月第1版 2014年6月第1次印刷
定 价	32.00元



凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换
版权所有·侵权必究

前 言

由于计算机技术和数字成像技术的进步,机器视觉技术如今蓬勃发展,其应用范围涵盖了工业、农业、医药、军事、航天、气象、天文、公安、交通、安全、科研等国民经济的各个行业。本书所描述的机器视觉技术定义为通过数字成像方法对控制对象进行二维信息采集,经过一定算法处理后,获得处理结果用于操作执行器对控制对象进行分类等操作的技术手段,是自动化技术领域的前沿。

目前我国正处于技术转型期,由于劳动力成本的不断提高,传统的劳动密集型生产方式,正在向以规模经济带动的技术升级模式转变,因此对能够提高生产效率,降低人工成本的机器视觉应用方案将保持旺盛的需求。据《2013-2017 年中国机器视觉产业发展前景与投资预测分析报告》数据显示,当前我国机器视觉市场规模达到 8.3 亿元,同比增长 48.2%,其中智能相机、软件、光源和板卡的增长幅度都达到了 50%,工业相机和镜头也保持了 40%以上的增幅,皆为 2007 年以来的最高水平。但目前高校培养的学生对于技术问题缺乏具体的感性认识,较难将所学的理论知识与工程实践相结合,而企业也面临所招聘的技术人员不能快速上手解决工程实际问题的困难。

本书从现实出发,首先对机器视觉领域的基础理论和技术问题进行了介绍,然后选择了农业、交通、科研等领域的一些经典机器视觉问题作为案例,对其解决方案以及用到的算法进行了详细的描述,使读者能够对如何将这些技术应用到具体问题有直观的认识,从而进一步启发读者产生设计解决方案的思路。需要说明的是,在机器视觉领域没有通用的解决方案,因此作为系统工程师需要在器件选型、数字图像处理、模式识别等相关技术领域具有一定积累的基础上,对自己面临的技术问题进行详细的分析,通过原型系统不断验证,才能找到成本低且有效的解决方案。

传统的解决方案基本架构为工控机加成像系统,随着数字信号处理器(DSP)和可编程阵列(FPGA)等技术及辅助工具的发展,一些复杂的算法更易于固化在硬件中并与成像系统整合,未来的机器视觉系统将更加精简、高效且可靠。

本书成书正值教育部“卓越工程师教育培养计划”推行三年之际,由于本书从工程实践出发,因此适合大专院校用作培养工程师选修课程的教材,也适合工程技术人员用作参考书目。

本书在成书过程中得到了中央民族大学“一流大学一流学科建设”项目的资助。邹新凯、杨国胜两位同事为本书做出了大量努力,东莞市奥普特自动化科技有限公司为本书提供了大量实际应用中采集的案例与器件图片,在此致以衷心的感谢。

编者

2014 年 3 月

目 录

前言

第一章 系统结构与器件选型	1	3.4 连通区域	63
1.1 光源选型	2	3.4.1 递归式区域增长算法	64
1.1.1 光线传播方式	3	3.4.2 迭代式分析算法	65
1.1.2 光线频谱	8	3.4.3 其他算法	66
1.2 相机与镜头选型	13	3.5 形态学	67
1.2.1 相机选型	13	3.5.1 基本操作	67
1.2.2 镜头选型	18	3.5.2 相关算法	71
第二章 编程环境	23	第四章 其他相关理论与算法	75
2.1 OpenCV 函数库	23	4.1 摄像机标定	75
2.1.1 编程环境配置	23	4.1.1 畸变校正	75
2.1.2 数据结构与基本函数	30	4.1.2 线性模型	76
2.2 MATLAB 图像处理工具箱	36	4.1.3 标定方法	78
2.2.1 导入和导出图像	37	4.2 立体视觉	81
2.2.2 显示和探查图像	38	4.2.1 基元检测	81
2.2.3 图像前处理和后处理	39	4.2.2 极线约束	84
2.2.4 分析图像	41	4.2.3 三维重建	85
2.2.5 空间变换和图像配准	42	4.3 模式识别	90
2.2.6 使用大图像	43	4.3.1 贝叶斯分类器	90
2.3 HALCON 开发包	43	4.3.2 近邻法	91
2.3.1 简介	44	4.3.3 人工神经网络	92
2.3.2 入门	45	4.3.4 支持向量机简介	97
第三章 数字图像处理	51	第五章 水果分拣系统	101
3.1 颜色模型	51	5.1 系统设计	102
3.1.1 RGB 模型	52	5.2 算法设计	102
3.1.2 CIE 模型	52	5.2.1 大小分级	103
3.1.3 HSL 模型	53	5.2.2 形状分级	105
3.1.4 YCbCr 模型	54	5.2.3 损伤检测	108
3.2 图像滤波	55	5.2.4 颜色分级	110
3.2.1 空间滤波	55	第六章 车辆识别系统	113
3.2.2 频域滤波	57	6.1 系统设计	113
3.3 边缘提取	61	6.2 算法设计	114

6.2.1 特征提取	115	7.2.3 位姿计算	140
6.2.2 分类算法	117	7.3 实验测试	142
6.2.3 跟踪算法	122	7.3.1 二维码布置	142
第七章 机器人定位系统	130	7.3.2 测试平台	143
7.1 系统设计	130	7.3.3 结果与结论	144
7.2 算法设计	132	附录 OpenCV 中英对照函数速查表	146
7.2.1 轮廓检测	132	参考文献	157
7.2.2 后期处理	137		

第一章 系统结构与器件选型

一个完整的机器视觉系统通常由光源、镜头、相机、计算机、执行器五部分组成，如图 1-1 所示，其中计算机需要安装图像采集卡和 IO 控制卡。

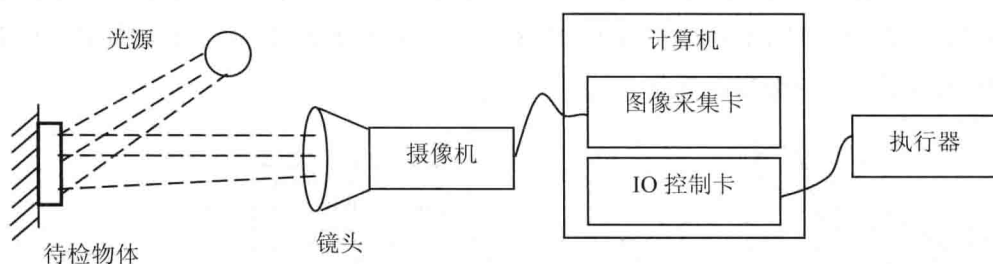


图 1-1 机器视觉系统基本组成

图 1-1 所示的系统中，光源产生的光线照射到待检物体表面使其产生特定的图像或增强其特征，通常使用特定波长的光源，并对光源中发光器件排列方式进行设计达到均匀的照射效果。有时光源系统与被测物体会被整合在一个系统中如显微成像系统，这样的系统可用于进行细胞计数或是基于干涉条纹进行高精度的加工精度测量，如图 1-2 所示。图像采集卡的作用是将摄像机采集的模拟信号转换为数字图像，图像采集卡的接口通常为 PCI，可以直接插在计算机的主板上，也有少量支持 USB 接口的图像采集设备。图像处理算法在计算机中运行，将采集到的图像处理为有意义的结果，根据这些结果通过 IO 控制卡驱动执行器进行操作。计算机通常采用满足工业现场作业防尘、电磁屏蔽等要求的工控计算机机型，操作系统通常为 Linux 或 Windows CE，也有使用 Windows 2000 或 Embedded XP 系统的，Linux 系统相对稳定，适合于需要持续工作的场合，而基于 Windows 平台的程序开发实现周期短，用户可以根据需要选择开发平台。

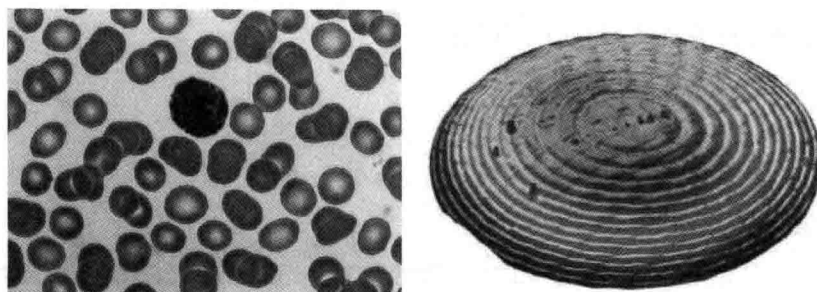


图 1-2 细胞计数（左）与利用干涉条纹测量隐形眼镜厚度（右）

在一些要求更为苛刻的场合，如需要极高的实时处理速度而算法也适合用并行处理方式实现时，可以采用图 1-3 的系统结构，即 DSP 和 FPGA 相结合。早期的 DSP 芯片非常昂贵，主要应用于军事领域，除利用 GPS 系统定位外，在导弹导航中经常使用实时的地形图片与卫星图片对比以确定导弹的实际坐标。如今 DSP 芯片已经广泛应用于各个行业，DSP 和 FPGA 可以组成所谓的片上系统（SoC）来替代传统方案中的计算机，这种基于硬件的实现方式由于集成度高，因此可靠性可以大大提高。此外在这种结构下，可以将摄像机中的成像部分的电路集成至 SoC 中，这样免除了摄像机中的数模转换和采用图像采集卡进行的模数转换，减少了信息损耗，组成的系统由于自身具有图像处理功能被称为智能相机，但这种架构的缺点是开发周期较长，因为 DSP 只支持使用汇编语言和 C 语言，而且 DSP 强大的并行处理能力也需要有一定的编程经验才能充分提高效率。

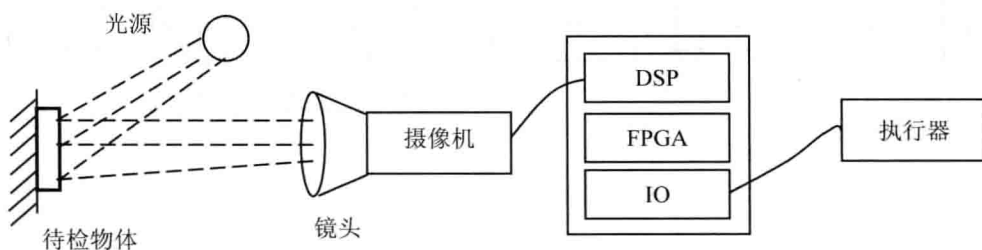


图 1-3 基于 DSP 和 FPGA 的机器视觉系统

以上是对机器视觉系统的组成结构的介绍，下面将结合一些具体应用场合对组成结构中涉及的器件选型问题进行分析。

1.1 光源选型

光源是机器视觉系统关键组成部分之一，因为其直接影响到输入信号的质量，故重要性不言而喻。良好的光源照明设计可以使图像中的目标信息与背景信息得到最佳分离，从而改善整个系统的分辨率，大大降低图像处理的算法难度，同时提高系统的精度和可靠性。

机器视觉系统中的光源主要有以下作用：

- （1）照亮目标，提高亮度。
- （2）形成有利于图像处理的成像效果。
- （3）克服环境光干扰，保证图像稳定性。
- （4）用作测量的工具或参照物。

目前工业中使用的光源大部分以 LED 二极管作为发光器件，二极管发光能耗低，且其可以近似为点光源，体积小巧方便，能以各种形式组合。图 1-4 所示为几种典型光源，面阵光源

通常用作背光；高角度入射光源指光线入射角度和被检测表面的夹角接近垂直，光源中心的圆孔用于放置相机；同轴光源中 LED 产生的光线经过了过滤，其光线的方向基本都是平行同轴的，在某些场合使用同轴光可以明显提高获取的数字图像质量。

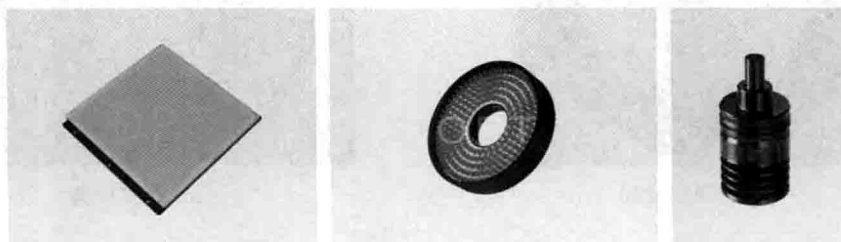


图 1-4 面阵光源（左）、高角度入射光源（中）与同轴光源（右）*

下面根据光源产生光线的传播方式和色谱的不同，分别对各种光源的应用进行介绍。

1.1.1 光线传播方式

根据光源中光线的传播路径可以将光源分类为直射光和漫射光，如图 1-5 所示。直射光指发光器件的发射光线直接照射物体表面，漫射光需要在发光器件前放置中间介质来实现，如毛玻璃可以达到更为均匀的照射效果，采用这种方式可以避免在被检测表面形成局部高亮点，如形成会成为最终数字图像中的干扰噪声。在直射光源中，入射光的角度——高角度、低角度可以实现不同的照射效果。

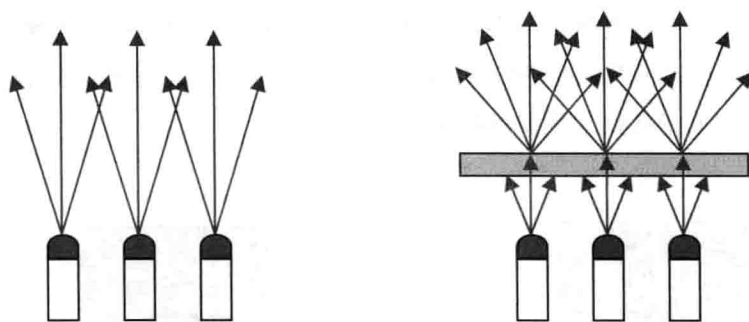
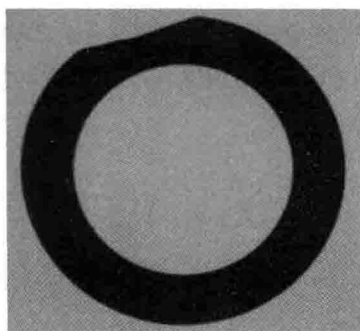


图 1-5 直射光（左）与漫射光（右）

漫反射背光源是最常用的照射方式，在透明体表面、透明体内部不透明异物、脏污检测、透明体和半透明体突变型和部分渐变缺陷、镂空打标检测等方面应用广泛。图 1-6 所示为使用背光源的部分案例，其中图（a）为检测圆形器件的缺陷曲线；图（b）为检测平板上的裂纹；图（c）为对封装好的袋中螺钉数目进行计数；图（d）为对齿轮的磨损程度进行评估。

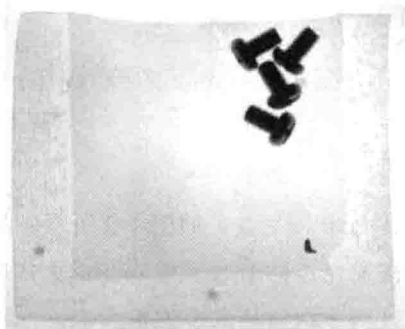
注：标*的图片由东莞市奥普特自动化科技有限公司（OPT）提供。



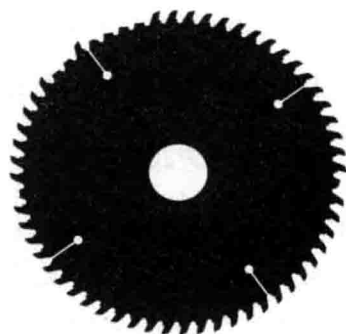
(a) 缺陷检测



(b) 裂纹检测



(c) 计数检测



(d) 磨损程度检测

图 1-6 漫反射背光源案例*

在某些情况下漫反射背光源可能会使所成图像的边缘发虚，图 1-7 左图显示了边缘发虚的原因，被照射的物体带有倒角或是圆角边缘时容易发生这种现象。这种情况下，采用平行光源配合相应的镜头可以有效解决边缘发虚的问题。

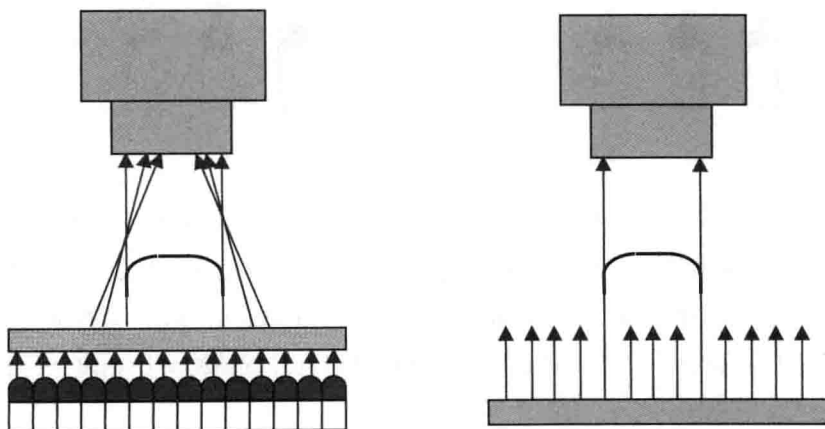
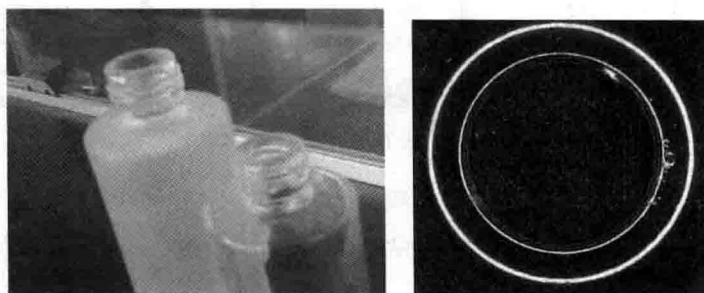
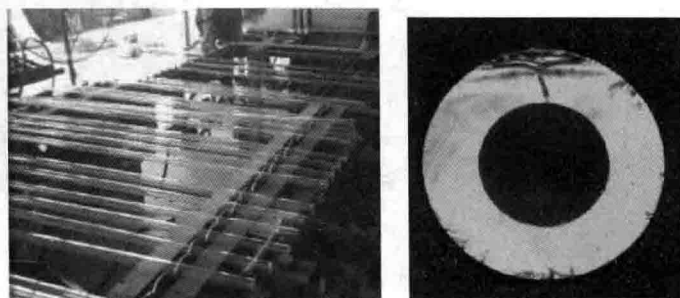


图 1-7 漫反射背光源的失效与解决办法

有时需要利用被检测物体本身的透射性质达到较好的成像效果,图 1-8 所示为两个利用透射的案例。



(a) 瓶口碰伤检测



(b) 玻璃管检测

图 1-8 利用透射性质进行检测*

在表面平整性检测中,可以通过平面光源加上栅格造影的方法,发现表面的凹凸点,并对其不平整程度进行评估,如图 1-9 所示为该方法的示意图。

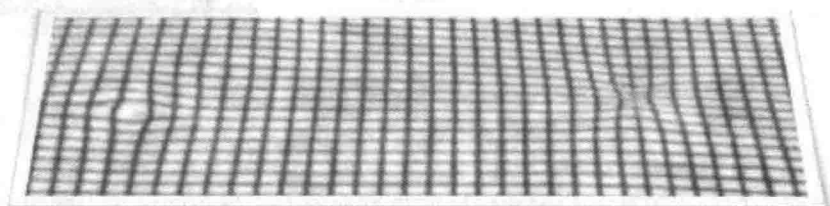


图 1-9 表面平整度检测方法*

无影光技术很早就应用在外科手术中,在机器视觉行业中,漫射无影光可用于需要光学字符识别(OCR)的场合,可以有效去除表面的眩光,使字符清晰显现。图 1-10 所示为使用漫射无影光获取字符图像的案例。



图 1-10 漫射无影光用于 OCR*

如果物体表面的字符是通过刻蚀或是铸压的方式形成的，此时光线的入射角度不同产生的图像会截然不同。图 1-11 对比了不同的光线入射角度对最终的成像效果的影响。

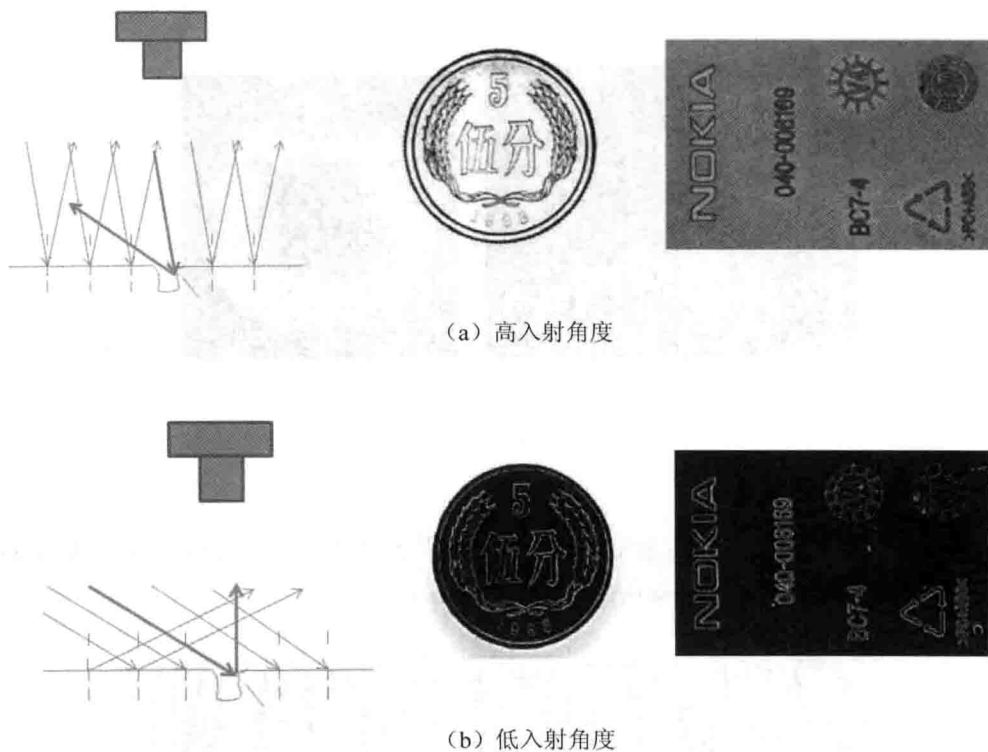


图 1-11 不同入射角度对成像质量的影响*

在某些特定应用场合中需要根据实际情况调整光线的入射角度以达到期望的效果，图 1-12 所示为对一圆柱体表面进行字符成像，通过低角度圆柱两头打光，直接反光无法进入镜头，但表面的异常（字符、划伤）由于反光程度不一样，可以呈现与背景不同的灰度，其入射光的角度与圆柱体表面弯曲度相关。

图 1-13 所示为一胶圈缺陷检测的光源设计案例，胶圈反光角度连续大范围变化，单方向照光图像均匀性很差，改用多角度独立控制组合光源，可以调出比较理想的效果，缺陷也比较明显。

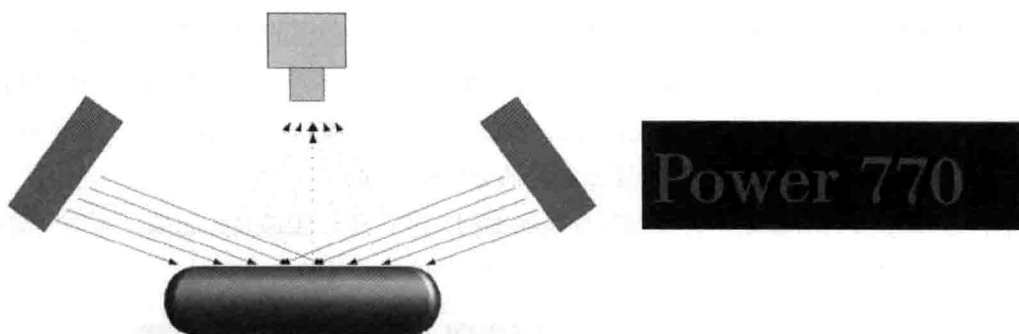


图 1-12 圆柱体表面检测*

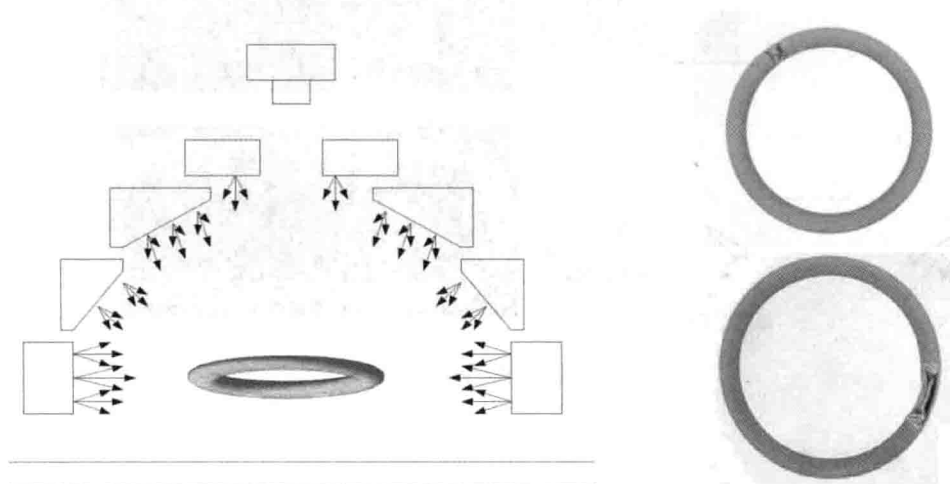


图 1-13 胶圈缺陷检测*

偏振光是一种特殊的光源，它在传播过程中相对于传播方向具有不对称性，如图 1-14 所示，左图为普通光，右图为偏振光。偏振光最常见的应用是 3D 电影，分别给左右眼提供具有视差的图像，使用不同方向的偏振光同时投影到屏幕上，不戴眼镜看到屏幕上的图像是有重影的。而戴上由偏振片组成的 3D 眼镜后，屏幕反射回的光线振动方向和镜片匹配的可以通过，不同的被阻挡，这样左右眼看到的是不同的图像，从而产生立体感。

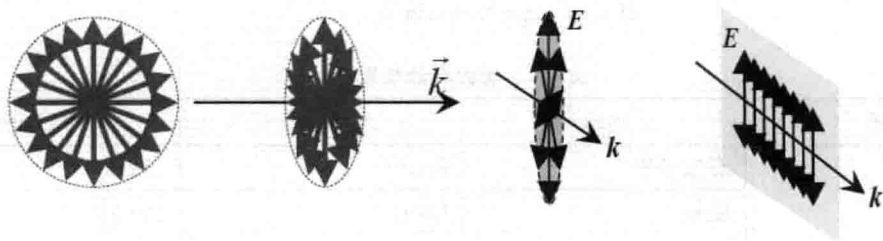


图 1-14 偏振光传播方式

在机器视觉领域中，通常也是组合不同的偏振片以达到期望的成像效果，首先要产生偏振光，这一过程称为起偏，将偏振片放置在没有偏振特性的光源前，经过偏振片过滤得到的就是偏振光，偏振光照射到被检表面，反射后的光线用偏振片检测光强变化，这一过程称为检偏，一般基于偏振光的机器视觉系统都要设计起偏部分和检偏部分。

图 1-15 所示为利用偏振光去除钢丝反光案例，其中通过线偏振片起偏，而用圆偏振片检偏，能有效抑制钢丝上的高亮点获得较好的成像效果。

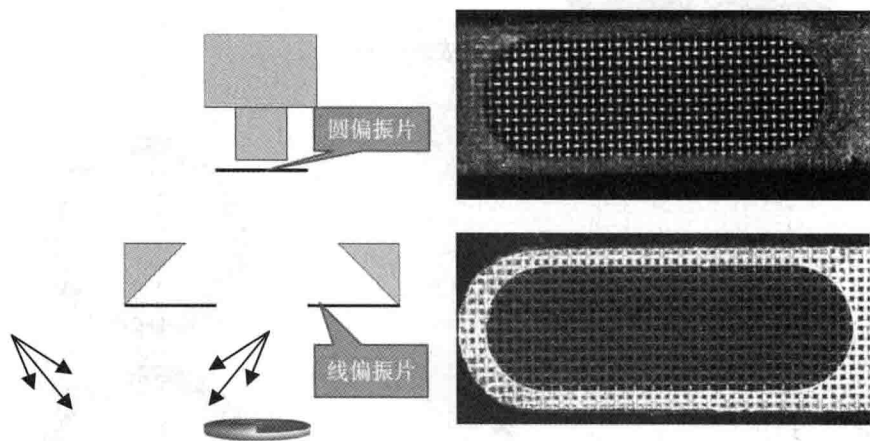


图 1-15 利用偏振片去除钢丝反光*

1.1.2 光线频谱

除了利用光线本身的传播性质可以取得不同效果外，光线本身的光谱性质对所成图像也有决定性影响。图 1-16 所示为不同波段对应的光波名称，表 1-1 中详细列出了这些波段的属性。

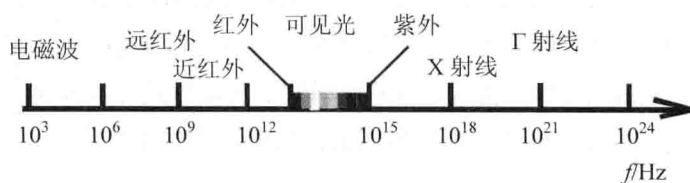


图 1-16 常用光波名称及对应波段

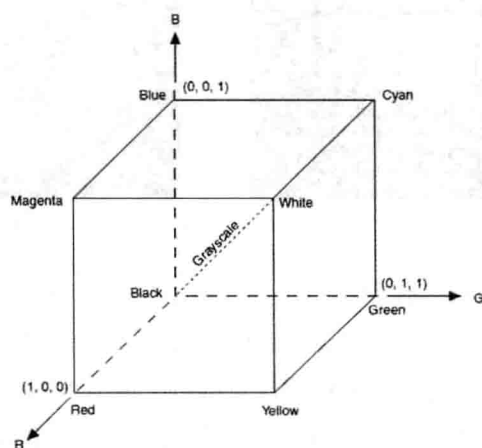
表 1-1 波段名称与属性

范围	名称	缩写	波长 (nm)
紫外	真空紫外	UV-V	100-200
	远紫外	UV-C	200-280
	中紫外	UV-B	280-315
	近紫外	UV-A	315-380

续表

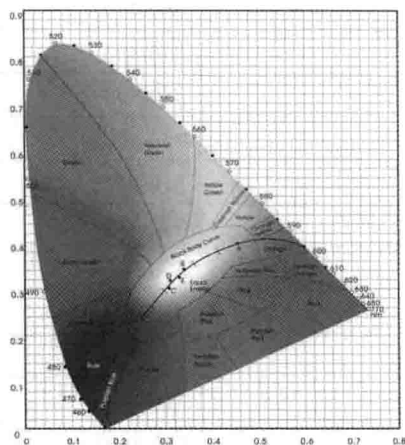
范围	名称	缩写	波长 (nm)
可见光	蓝紫	BP	380-430
	蓝	B	430-480
	绿蓝	GB	480-490
	蓝绿	BG	490-510
	绿	G	510-530
	黄绿	YG	530-570
	黄	Y	570-580
	橙	O	580-600
	红	R	600-720
	红紫	RP	720-780
红外	近红外	IR-A	780-1400
	中红外	IR-B	1400-3000
	远红外	IR-C	3000-50000
			50000-1000000

常用的颜色空间有 RGB、CIE、HSL、YIQ 等。其中 RGB 模型也称为加色法混色模型，它是以 RGB 三色光互相叠加来实现混色的方法，因而适合于显示器等发光体的显示。CIE 模型包括一系列颜色模型，这些颜色模型是由国际照明委员会提出的，是基于人的眼睛对 RGB 的反应，被用于精确表示对色彩的接收。HSL 模型是工业界的一种颜色标准，是通过对色调 (H)、饱和度 (S)、亮度 (L) 三个颜色通道的变化以及它们相互之间的叠加来得到各式各样的颜色的。图 1-17 是几种颜色空间的结构图。各种颜色模型的相互关系将在第三章中进行说明。

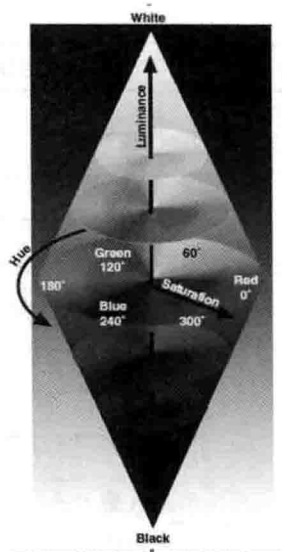


(a) RGB

图 1-17 不同的颜色空间模型



(b) CIE



(c) HSL

图 1-17 不同的颜色空间模型 (续图)

在 RGB 颜色空间模型中, 位于立方体两个相对顶点的色光是互补色, 如黄光和蓝光互补, 混合后为白光。利用这种原理, 可以使用互补色照射强化被检图案。图 1-18 左图中为使用红光照射 PCB 板的成像结果, 由于其背景色为绿色, 与红光互补, 因此标记点非常清晰。有时则需要利用和背景中某些图案相同的色光来消除干扰, 如图 1-18 右图为检测瓶盖上的黑色数字, 利用绿色光源消除背景中绿色图案。

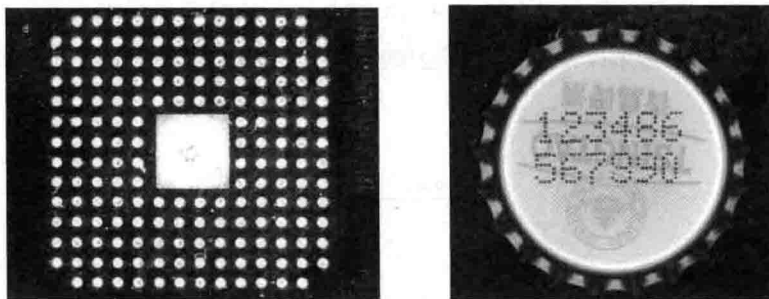
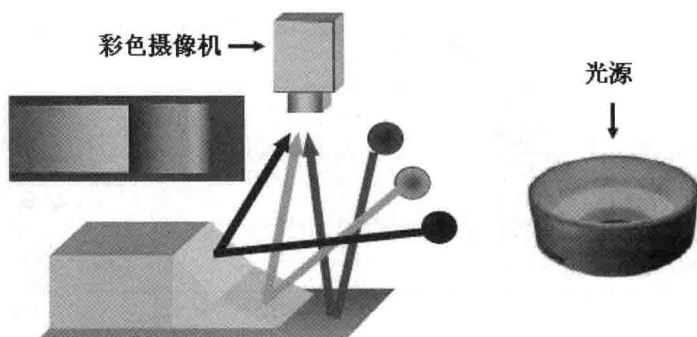


图 1-18 利用同色(左)和互补色(右)改善成像质量*

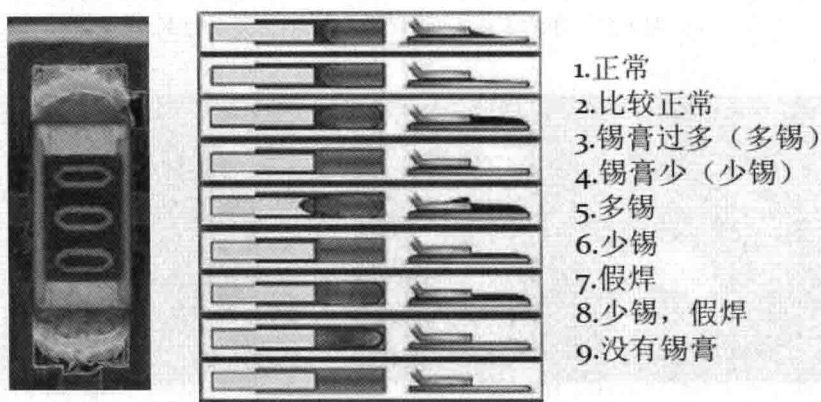
某些特殊应用场合需要综合使用不同色光, 图 1-19 所示为利用多角度三色组合检测焊点焊接质量的案例, 其中光源采用了由红蓝绿组成的光源, 三种色光从不同角度入射, 根据焊接处斜面反射情况的不同, 从而对于不同焊接质量可以呈现出不同的图案, 如图 1-19 (b) 所示。

不同的焊接材料对各色光的反射率不同, 在应用中可以根据被测表面的背景和待检对象在反射率上的差异, 选择合适的色光。图 1-20 左右两图分别为使用蓝色同轴光与红色光检测焊点焊盘的成像结果, 可以看出使用合适的色光可以使焊点焊盘与背景对比明显改善。图 1-21

为不同金属表面对不同波长的光波反射率。



(a) 检测原理



(b) 对应特征

图 1-19 利用多角度色光组合检测焊接质量*

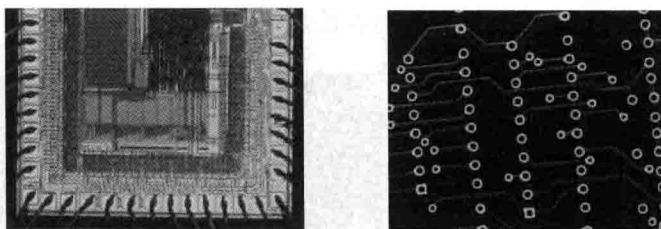


图 1-20 根据反射率不同选择色光*

从光学知识可以知道, 测量时使用的光线波长越短, 可测的精度越高, 蓝色光由于波长较短, 因此可以在图像中捕获微小的划痕, 如前所述, 漫射光容易使被检对象的边缘模糊, 因此通常使用蓝色同轴光检测物体表面划痕。图 1-22 所示为检测的案例图片。