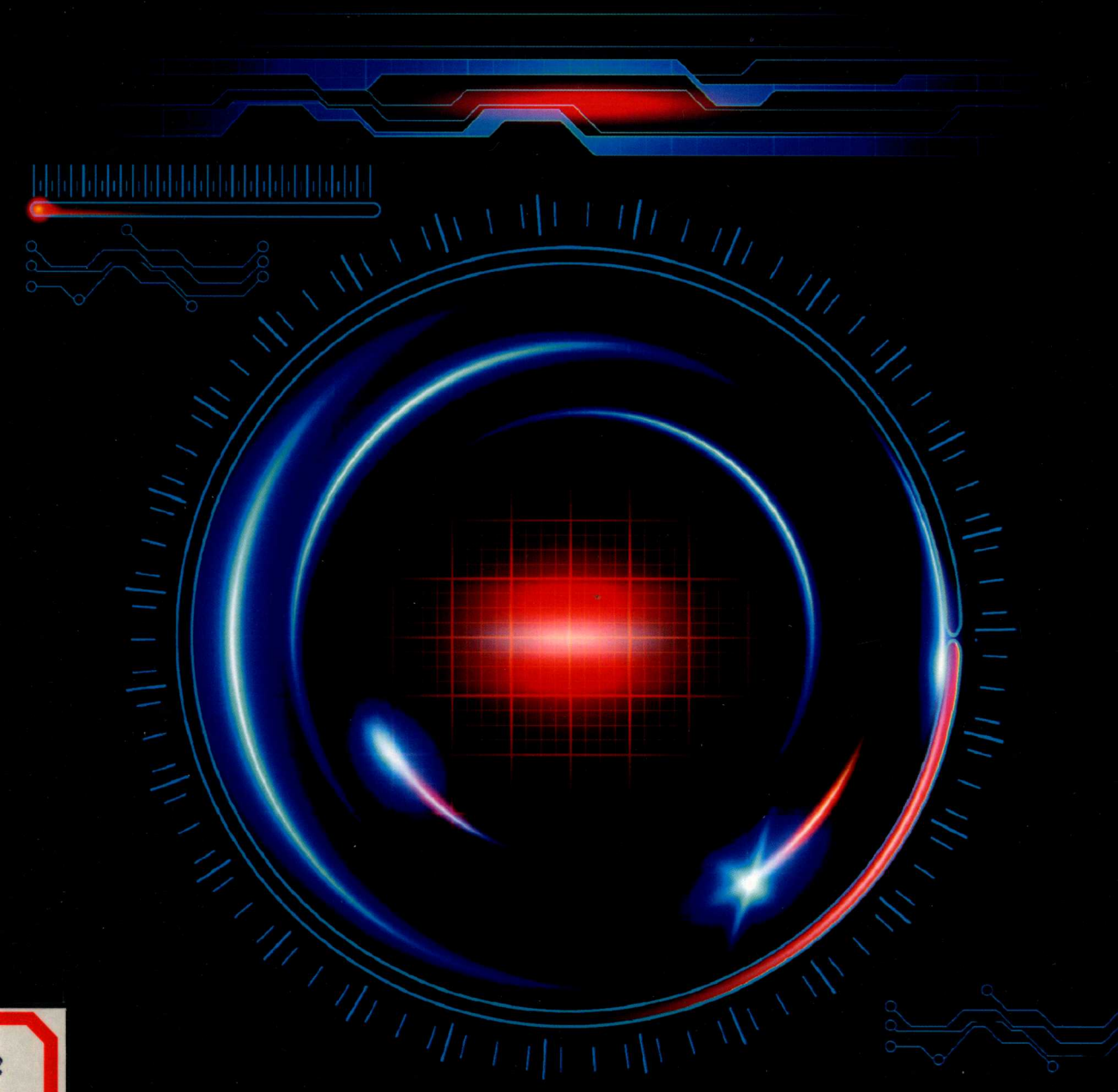


工业机器人视觉技术 及应用

Technology and Application
on Industrial Machine Vision

刘秀平 景军锋 张凯兵 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

工业机器人视觉技术及应用

刘秀平 景军锋 张凯兵 编著



西安电子科技大学出版社



内 容 简 介

机器视觉是目标检测、感知和理解的关键技术之一,在智能制造业中应用广泛,如产品检测、目标跟踪、定位、导航等方面均有应用。机器视觉涉及知识面广且多学科交叉,不仅包括自动化相关知识和计算机程序设计知识,而且还包括光学、电子、人工智能等知识。

本书从工业用光照系统、工业用相机、相机接口、程序设计、视觉处理软件库等多角度阐述了机器视觉的关键技术,通过 C# 语言由浅入深、由简到繁逐步实现了工业相机连接、捕获、检测等功能,为机器视觉的应用提供了必要的入门基础。

本书既适用于自动化专业、计算机专业的高年级学生,也可作为智能制造应用学习者的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

工业机器人视觉技术及应用 / 刘秀平, 景军锋, 张凯兵编著. —西安:

西安电子科技大学出版社, 2019.6

ISBN 978-7-5606-5145-3

I. ①工… II. ①刘… ②景… ③张… III. ① 工业机器人—机器人视觉—研究

IV. ①TP242.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 239749 号

策划编辑 刘玉芳

责任编辑 万晶晶

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2019 年 6 月第 1 版 2019 年 6 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印 张 13.5

字 数 319 千字

印 数 1~1000 册

定 价 35.00 元

ISBN 978-7-5606-5145-3 / TP

XDUP 5447001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

前言

“中国制造 2025”是国家战略规划，是中国在世界的新标签。“中国制造 2025”面临的重大挑战是实践人才不足、高技能人才缺乏等问题。在新一轮科技革命与产业变革的战略行动中，以新技术、新产业、新业态和新模式为特征的新经济呼唤“新工科”。新工科更强调学科的实用性、交叉性与综合性，尤其注重信息通信、电子控制、软件设计等新技术与传统工业技术的紧密结合。本书介绍了测量控制的视觉检测、光源的光学特性、面向对象软件设计等相关技术及其应用。最后通过实例由简到繁介绍了相机连接、提取图像、长度测量、形状测量等应用，目的是让学生掌握综合性较强、应用广泛的机器视觉基本使用方法，为高级开发打好基础。

本书的出版得到了西安工程大学校级教材规划的资助，作者在此谨表谢意，另外在本书的写作过程中，得到了许多学者的支持和帮助，他们是西安工程大学机器视觉技术与应用研究所所长景军锋教授、张凯兵教授，机器人与智能装备技术研究所所长王晓华教授、李珣副教授、张宏伟博士，实验室陈小改老师等，在此作者一并表示由衷的感谢。最后感谢西安电子科技大学出版社的领导和编辑，是他们的辛勤工作使得本书得以正式出版。

由于作者水平有限，因此书中难免存在缺点和错误，衷心地期待读者的批评指正。

西安工程大学

刘秀平

2019年3月



目 录

CONTENTS

第一章	绪论	1
第二章	机器视觉系统	3
2.1	机器视觉系统的组成	3
2.2	机器视觉系统的分类	4
第三章	工业用光照系统	6
3.1	工业用光源的分类	6
3.1.1	照射方式	8
3.1.2	光源形状	12
3.1.3	光源发光机制	19
3.2	工业用光源的性能参数	21
3.3	工业光源的选型	22
第四章	工业用相机	24
4.1	线阵相机	25
4.2	面阵相机	25
4.3	镜头	26
4.3.1	镜头参数	27
4.3.2	镜头接口	30
4.3.3	镜头的分类	30
4.3.4	镜头的选择	33
4.4	工业相机数据传输接口及协议	35
第五章	C# 软件及 Halcon、OpenCV	40
5.1	C++ 和 C# 语言概述	40
5.2	Halcon 简介	41
5.2.1	Halcon 基础	41
5.2.2	Halcon 算子	47
5.3	OpenCV	48
5.3.1	OpenCV 的特点	48
5.3.2	OpenCV 的构架	48

第六章	相机、Halcon 及 C#联调	95
第七章	相机、OpenCV 及 VC++联调	101
第八章	机器视觉应用案例	105
8.1	基础知识储备	105
8.1.1	获取相机参数和信息	105
8.1.2	相机标定	106
8.2	机器视觉应用	109
8.2.1	二维码识别	109
8.2.2	离线功能实现	147
8.2.3	形状检测	150
8.2.4	二维长度测量	153
8.2.5	回形针方向测量	156
8.2.6	电路板检测	158
附录	Halcon 算子	165
参考文献	209

第一章 绪 论

德国“工业 4.0”、美国“工业互联网”、“中国制造 2025”等各国强国战略，已经得到科研机构 and 产业界的广泛认同^[1]。各国战略表述有所不同，其核心目的都是提升本国制造业的智能化水平。对于我国来说，制造业的智能化之路还需要相当长一段时间。制造业本身普遍存在创新能力不强、核心技术薄弱、智能化水平低等瓶颈问题，面临着招工难、市场竞争激烈等外在压力，使得传统工业必须迎接改变模式、产业链重组、工业转型等一系列革命性的挑战。

智能制造是“中国制造 2025”的突破口和主攻方向。智能制造包括产品智能化、生产过程智能化和管理服务智能化三个层面。机器视觉将是智能化的下一个前沿领域。机器视觉技术已成功应用于工业机器人，并成为其一项核心关键技术，且机器视觉技术在工业制造、无人机、自动驾驶、智能医生、智能安防等应用领域中不断突破。随着我国制造业转型升级，机器视觉产品在制造行业的应用将带来新的增长点^[2]。

机器视觉技术是利用电子信息技术来模拟人的视觉功能，从客观事物的图像中提取信息和感知理解，并用于检测、测量和控制等领域的一项技术。机器视觉有着比人眼更高的分辨精度和速度，且不存在人眼疲劳问题^[3]。

机器视觉技术是一项综合技术，其中包括光源照明技术、光学成像技术、传感器技术、数字图像处理技术、模拟与数字视频技术、计算机软硬件技术、控制技术、人机接口技术、机械工程技术等^[4]。

机器视觉技术具有节省时间、降低生产成本、优化物流过程、缩短机器停工期、提高生产率和产品质量、减轻测试及检测人员劳动强度、减少不合格产品数量、提高机器利用率等优势，另外，机器视觉强调实用性、实时性、高速度、高精度、高性价比、通用性、鲁棒性、安全性，能适应工业现场恶劣的环境^[5]。

机器视觉可用来保证产品质量、控制生产流程、感知环境等，在工业检测、机器人视觉、农产品分选、医学、机器人导航、军事、航天、气象、天文、公安、安全等方面应用广泛，几乎覆盖国民经济的各个行业。

1. 机器视觉技术在电子半导体行业中的应用

电子行业属于劳动密集型行业，需要大量人员完成检测工作，而随着半导体工业大规模集成电路日益普及，制造业对产量和质量的要求日益提高，在需要减少生产力成本的前提下，机器视觉技术扮演着不可或缺的角色。机器视觉技术在电子半导体行业中的应用案例有^[6]：

(1) 对 IC 表面字符的识别及管脚数目的检测、长短脚的判别和管脚间距离的检测。

- (2) 高速贴片机上对电子元件的快速定位。
- (3) 精密电子元件上微小异物和缺陷的检测，晶片单品合格与否的判定。

2. 机器视觉技术在汽车制造业中的应用

随着汽车制造工艺的日益复杂，汽车制造商对零部件的质量提出了更高要求，面对市场竞争和客户高标准的要求，制造商和零部件供应商必须借助高效可靠的检测手段来避免不合格零部件的产生，其中机器视觉系统是最值得关注的方法。在汽车电子产品的接插件生产过程中，生产效率和成品尺寸精度都有较高要求，机器视觉系统能够实施 24 小时在线检测^[7]。机器视觉在汽车制造业中的应用案例有：

(1) 汽车总装和零部件检测，包括零部件尺寸、外观、形状的检测；总成部件错漏装、方向、位置的检测；读码、型号、生产日期的检测；总装配合机器人焊接导向和质量的检测；轴承生产中对滚珠数量的计数、滚珠间隙的检测和滚珠及内外圈的破损的检查；轴承密封圈的生产中对焊接的光洁度和有否凹陷、裂缝、膨胀及不规则颜色的检测；电气性能和功能检测。

(2) 汽车仪表盘检测，包括仪表盘指针角度检测和指示灯颜色检测等。

(3) 发动机检测，如机加工位置、形状和尺寸大小检测；活塞标记方向和型号检测；曲轴连杆、字符、型号检测；缸体缸盖读码、字符、型号检测等。

3. 机器视觉技术在流水线生产中的应用

机器视觉在各类流水线生产中有着巨大的市场^[8]，流水线生产的应用案例有：

(1) 瓶装啤酒生产流水线检测系统：可以检测啤酒是否达到标准容量、标签是否完整。

(2) 螺纹钢外形轮廓尺寸的探测系统：以频闪光作为照明光源，利用面阵和线阵 CCD 作为螺纹钢外形轮廓尺寸的探测器件，实现热轧螺纹钢几何参数的在线动态检测。

(3) 轴承实时监控系統：实时监控轴承的负载和温度变化，消除过载和过热危险。

(4) 金属表面的裂纹检测系统：用微波作为信号源，测量金属表面的裂纹，是一种常用的无损检测技术^[9]。

(5) 医药包装检测系统：包装袋表面条码读取和生产日期的检测；药片的外形及其包装情况的检查；胶囊生产的壁厚和外观检查。

(6) 零部件测量系统：应用于长度测量、角度测量、面积测量等方面。

机器视觉技术的出现极大地提高了生产质量，将企业从劳动依赖中解放出来，实现自动生产、检测，在降低劳动成本、应对市场竞争、提高效率等方面起到积极的推动作用。随着行业特点的不断挖掘，各行各业对于机器视觉技术的需求不断增加，这意味着机器视觉技术具有非常好的市场前景^[10]。

第二章 机器视觉系统

2.1 机器视觉系统的组成

机器(Machine)是指由各种金属和非金属部件组成的装置。光作用于视觉器官,使其感受细胞兴奋,然后经神经系统加工后便产生视觉(Vision)。视觉中的“视”指光源、镜头、相机、图像采集卡等硬件系统,“觉”则指感知、分析、理解等软件。机器视觉(Machine Vision)是一个系统的概念,是人工智能的一个分支,是集现代先进控制技术、计算机技术、传感器技术于一体的光机电技术。

机器视觉系统是基于机器视觉技术为机器或自动化生产线建立的一套系统。一个典型的工业机器视觉应用系统包括光照系统、光学系统、图像捕捉系统、图像数字化模块、数字图像处理模块、智能判断决策模块和机械执行模块等。

常用的机器视觉系统中包括光照系统、数字摄像机、图像内存、机器视觉软件等部件,其中数字摄像机包括图像采集卡、图像传感器、镜头及图像数据等部分,如图 2-1 所示。

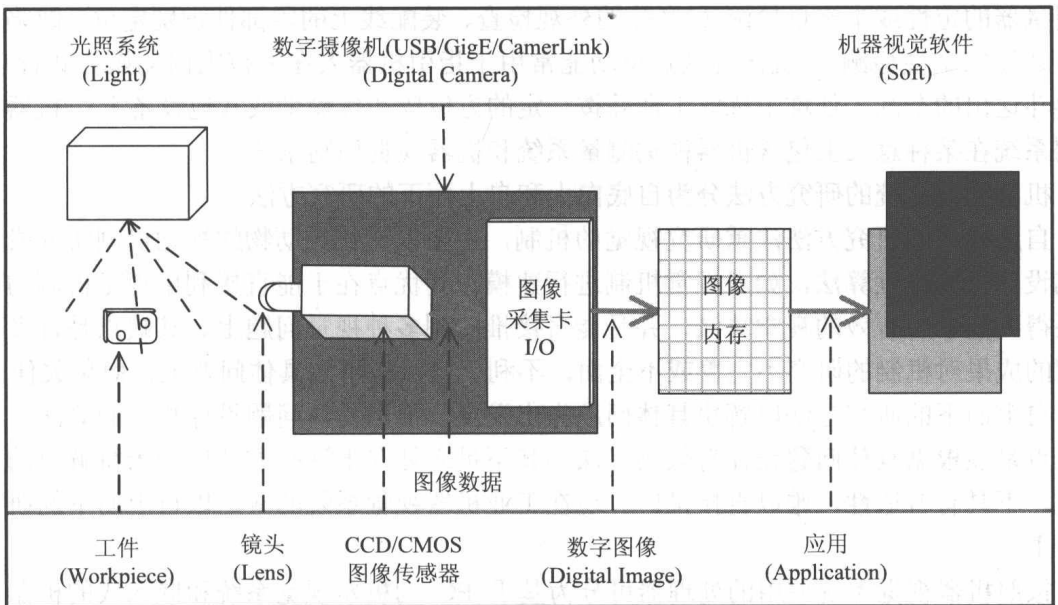


图 2-1 机器视觉系统组成

光照系统用于提供稳定良好的光照环境,使得被检测物体的基本特征能够被识别。

镜头是为了能够把物体清晰的图像呈现出来。数字摄像机是把图像信息处理成可被识别的信息。

根据应用需求不同, 机器视觉系统的组成有所差异, 以工业机器人应用中的机器视觉定位系统为例, 机器视觉定位系统主要由图像获取、摄像机标定及获取目标点坐标三部分组成^[11]。

1. 图像获取

机器视觉定位系统大多以千兆网接口的 CCD 相机为主, 将 CCD 相连并设置相应参数, 便可获得图像。

2. 摄像机标定

通过空间物体表面某点的三维几何位置与其图像中对应点之间的相互关系, 建立摄像机成像的几何模型, 这些几何模型参数就是摄像机参数, 用于标定摄像机^[12]。

3. 获取目标点坐标

为了获取目标物在机器人坐标系下的坐标, 必须建立相机坐标系、机器人坐标系、图像坐标系三者关系, 在此基础上, 只要通过视觉检测出目标物, 即可获取到目标物的位置。

2.2 机器视觉系统的分类

按照用途, 机器视觉系统可分为机器视觉检测、测量、定位、识别系统^[13]。机器视觉检测系统分为高精度定量检测(如显微照片的细胞分类、机械零部件的尺寸和位置测量)和不用量器的定性或半定量检测(如产品的外观检查、装配线上的零部件识别定位、缺陷性检测与装配完全性检测)。机器视觉定位功能常用于指引机器人在大范围内的操作和行动(如从料斗送出的杂乱工件堆中拣取工件并按一定的方位放在传输带或其他设备上)。机器视觉检测系统在某种意义上包含机器视觉测量系统和机器视觉识别系统。

机器视觉系统的研究方法分为自底向上和自上而下的研究方法。

自底向上的研究方法注重研究视觉的机制, 主要以灵长类动物的视觉机制研究成果为基础设计机器视觉算法, 如对视觉机制进行建模。其优点在于能直接利用视觉机制的研究成果得到简单、有效的视觉算法, 并且能直接推广到多种视觉问题上。其缺点是许多视觉机制的成果对机制的研究不完善或不全面, 不利于直接应用到具体问题上, 效果欠佳。

自上而下的研究方法以解决具体问题为出发点, 根据具体问题设计相应的算法。其主要优点是能根据具体问题设计有效的算法。其不足之处在于这些方法依赖于待解决的具体问题, 不具有普适性, 难以直接推广。现在工业机器人视觉系统的应用以自上而下的研究方法为主。

按照机器视觉系统使用的处理器可分为基于 PC 的机器视觉系统和嵌入式的机器视觉系统^[14]。基于 PC 的视觉系统是通过摄像机采集数据, 将数据传输给 PC 进行视觉信息处理, 它利用了 PC 的开放性、高度的编程灵活性和良好的 Windows 界面, 系统总体成本较低, 而且系统可接多个摄像机, 能满足特殊场合的集成应用需求。基于 PC 的视觉系统可

以实现复杂结构及功能、多路并行处理的需求。嵌入式的机器视觉系统是一种将图像采集、处理和通信功能集成于单一相机内的多功能、模块化、高可靠性的智能系统^[15]。这种高度集成化的微小型机器视觉系统，提供了一种具有成本低、简单易用、结构紧凑等优点的机器视觉解决方案。越来越多的相机和板卡制造商都在开发基于嵌入式的机器视觉系统。FPGA 作为一种高性能的可编程逻辑器件，可以通过编程方便地修改其内部的逻辑功能，从而实现高速的机器并行运算，是高性能嵌入式机器视觉系统的最佳解决方案。基于 FPGA 的嵌入式视觉系统的功耗远远低于基于通用 CPU 和 GPU 的机器视觉系统，将成为机器视觉系统的重要发展方向。从机器视觉技术的发展方向来看，嵌入式机器视觉系统将成为主流。另外，更开放的视觉系统与其他自动化系统的深度集成，逐步向传统制造业应用领域扩展也是机器视觉技术发展的方向之一。

第三章 工业用光照系统

在工业机器视觉系统中，光照系统是影响机器视觉质量的重要因素，它将直接影响到视觉系统所获取图像的品质及系统性能。不同的工业视觉检测需求，对光源的要求亦不同。光照系统的主要作用是使被测物体与背景显现出尽可能明显的区分，以便获得高品质、高对比度的图像。光源在机器视觉系统中是不可或缺的一部分，它的选择会直接影响视觉分析和理解的效果。

3.1 工业用光源的分类

光源用于照亮目标，提高亮度，形成有利于图像处理的效果，也用于克服环境光照影响，保证图像的稳定性和准确性。

首先了解一下与光源相关的几个概念：镜面反射是指平行光线照射到平滑表面，反射光平行射出。漫反射是指平行光线射到粗糙平面，反射光线会射向各个方向。发散反射是指表面既有纹理又有平滑面时，对光线进行的反射。图 3-1 中给出了这几种反射方式的不同。

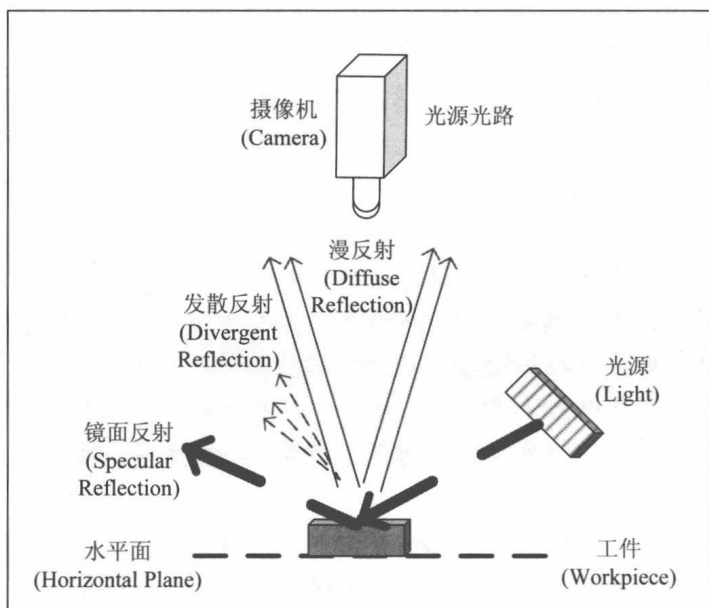


图 3-1 光源光路原理

在机器视觉照明系统中，照明方式可分为明场照明和暗场照明^[16]。明场是指光线反射进入相机的光场区域，暗场是指光线反射未能进入相机的光场区域(如图 3-2 所示)。当光源放置在“W”状的明场区域照明，则为明场照明。通常为了获得良好的明场照明效果，应将光源放置于相机透镜视野的 2 倍处。明场照明的特点是能够形成高的对比度，而反光表面会生成反射(如图 3-3 所示)。暗场照明的光源是放置在“W”之外的暗场中，则光线是漫射光被反射后而进入相机，镜面反射光线被反射离开^[17]。

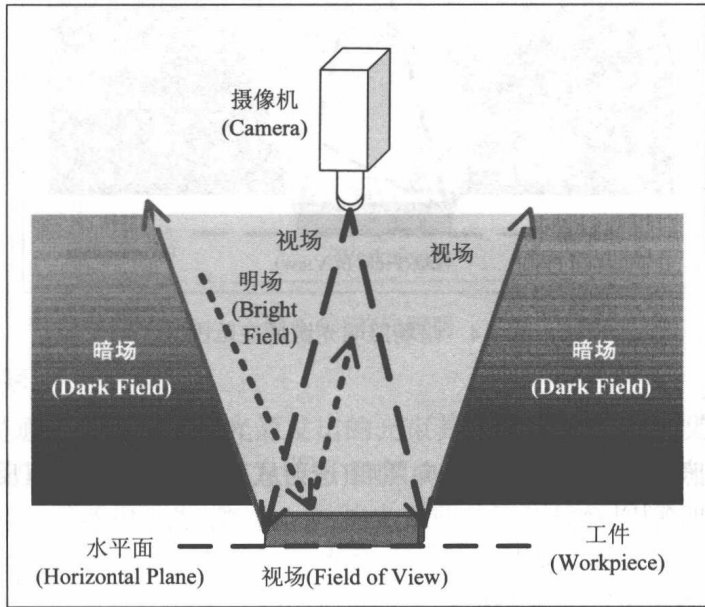


图 3-2 明场和暗场

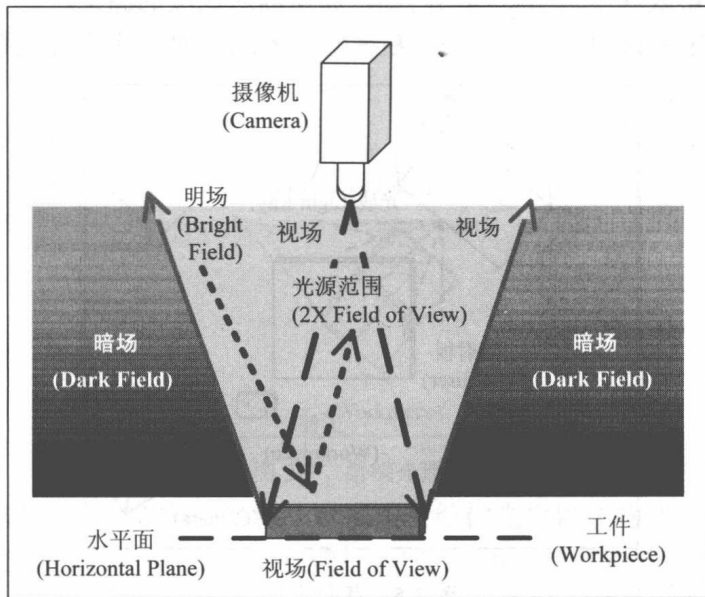


图 3-3 明场照明光源所在范围

暗场照明是漫射光被反射进入照相机，但镜面反射光线被反射离开，如图 3-4 所示。暗场照明的光源在“W”之外。除有纹理的表面和凸凹变换的表面外，光线被反射但不会进入相机。

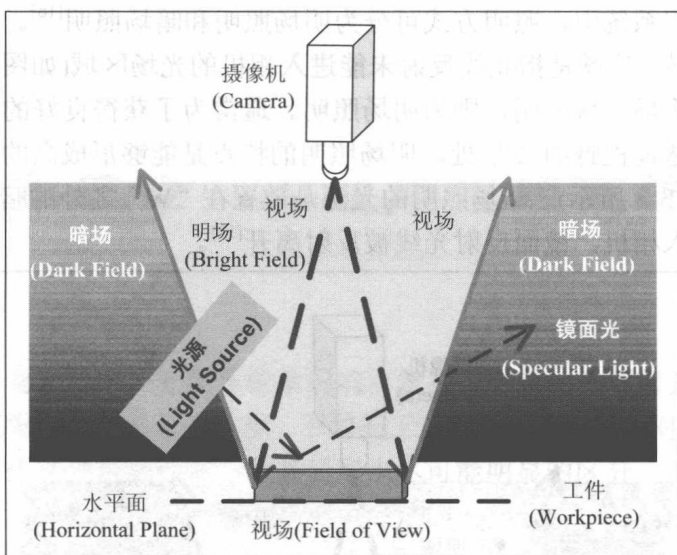


图 3-4 暗场照明光源所在范围

3.1.1 照射方式

照明系统按其照射方式可分为：背向照明(透射式照明)、前向照明(反射式照明)、结构光照明和频闪光照明等^[18]。

1. 背向照明

背向照明是被测物放在光源和相机之间，如图 3-5 所示。光源置于物体的后面，可突出不透明物体的阴影或观察透明物体的内部，获得高对比度的图像，还可将被测物的边缘轮廓清晰地勾勒出来。该照射方法多用于精密测量系统，如工件的尺寸测量。

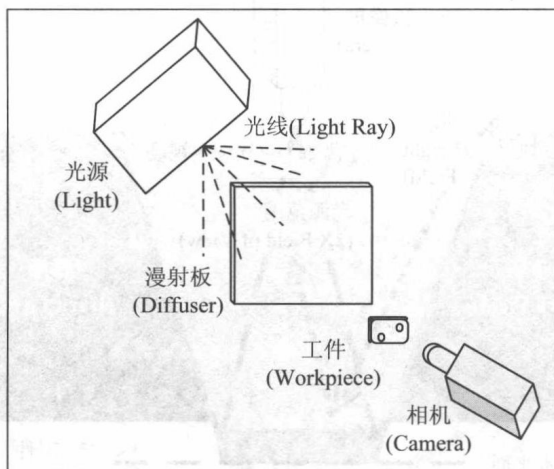


图 3-5 背向照明

2. 前向照明

前向照明是光源和相机放置于被测物的同侧，如图 3-6 所示。在实际应用中绝大部分都采用前向照明方式，比如条形光源、同轴光源、环形光源、圆顶光源、线光源等。前向

照明又分为高角度照明(75 度以上)和低角度照明(25 度以下), 其区别在于光源发射光线与被测物待测表面的夹角大小的不同。应根据被测物背景部分机理的不同而决定使用“高角度”或“低角度”照明。前向照明安装方便, 但不易达到很高的对比度。

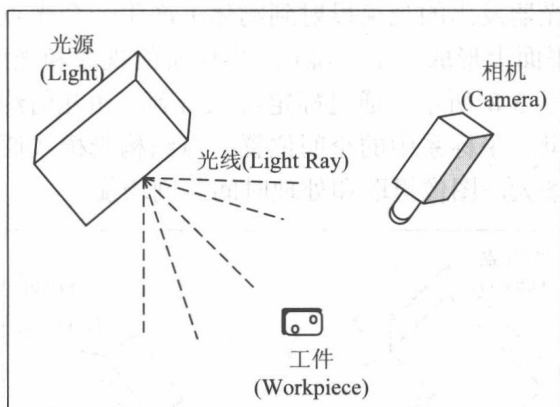


图 3-6 前向照明

3. 结构光照明

结构光照明是通过特定手段使光源发出的光束具有某种形状, 并投射到被测物上, 根据产生的畸变解调出被测物的三维信息^[19], 如图 3-7 所示。实现结构光照明的方法很多, 如使用光圈和透镜, 或者相干光(激光)。结构光照明的应用比较广泛, 主要是针对复杂被测对象或特定目标, 如为减小复杂性而只将光投射到感兴趣的物体表面, 或者利用二维视觉系统来提取物体三维信息。利用结构光提取物体三维信息具有很大的应用价值, 其原理是基于光学的三角法测量原理。

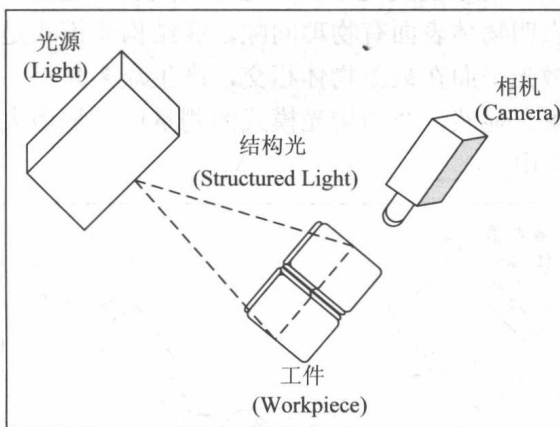


图 3-7 结构光照明

光学投射器(如激光器或投影仪)将一定模式的结构光投射于物体表面, 形成了由被测物体表面形状所调制的光条三维图像。摄像机摄取三维图像, 从而获得光条二维畸变图像。光条的畸变程度取决于光学投射器与摄像机之间的相对位置和物体表面形廓。沿光条显示出的位移(或偏移)与物体的高度成比例, 光条扭结表示了平面的变化, 光条不连续显示了表面的物理间隙。当光学投射器与摄像机之间的相对位置一定时, 由畸变的二维光条图像坐标便可重现物体表面的三维形廓。由光学投射器、摄像机和计算机系统构成了结构光三

维视觉系统。

根据光学投射器投射的光束模式不同，结构光模式分为点结构光模式、线结构光模式、多线结构光模式、面结构光模式、相位光模式等。

点结构光模式是激光器发出的光束投射到物体上产生一个光点，经过摄像机镜头成像后，光点在摄像机的像平面上形成一个二维点。摄像机的视线和光束在空间相交于光点处，形成三角几何关系，如图 3-8 所示。通过标定可以得到三角几何约束关系，并由其可以唯一确定光点在某一已知世界坐标系中的空间位置。点结构光模式通过逐点扫描物体来进行测量，随着被测物体的增大，图像摄取和处理时间急剧增加。

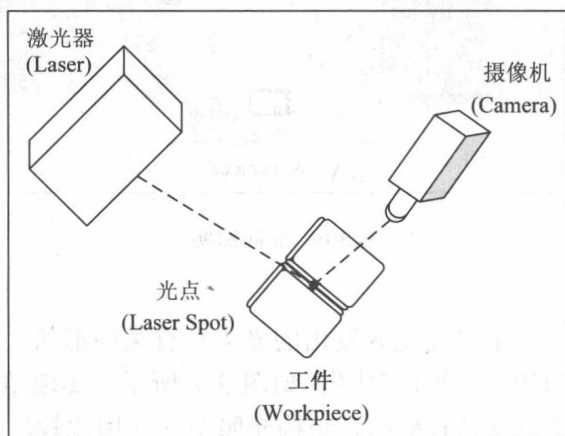


图 3-8 点结构光模式

线结构光模式是向被测对象投射一条光束，光条由被测对象表面深度的变化及间隙而受到调制，如图 3-9 所示。光条的变化主要有光条畸变和不连续，畸变程度与物体表面的深度成正比，不连续则表明物体表面有物理间隙。线结构光模式是点结构模式的扩展。通过相机光心的视线束与激光平面在被测物体相交，产生众多光点，因而，形成了点结构模式中相似的三角几何约束。显然，线结构光模式的测量信息量增大，而硬件实现复杂度并没有增加，因此被广泛应用。

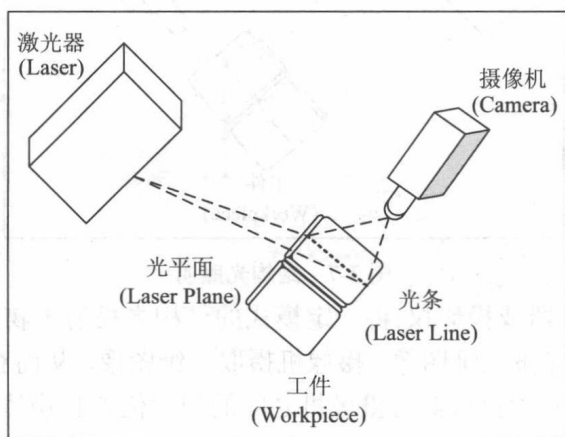


图 3-9 线结构光模式

多线结构光模式(又称为光栅结构模式)是线结构光模式的扩展。由光学投射器向被测对象表面投射多条光束，以获得被测物体表面更大范围的深度信息，如图 3-10 所示。采用

多条光条的优势在于，一方面能够在同一幅图像中处理多条光条，提高图像处理效率；另一方面，被测物体表面的多光条覆盖可以获得更多信息量。多光条可以用投影仪投影产生，也可以利用激光器扫描产生。多线结构光模式的效率和信息量极大地增加，引入了标定复杂性和光条识别问题。

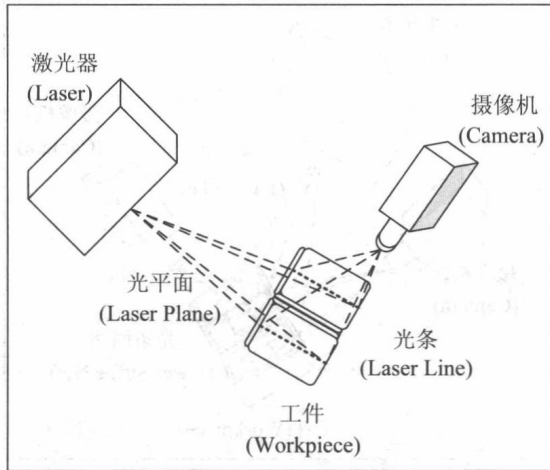


图 3-10 多线结构光模式

面结构光模式是将二维的结构光图案投射到物体表面上。采用面结构光时，不需要进行扫描就可实现三维轮廓测量，测量速度快，如图 3-11 所示。当结构光图案比较复杂时，为了确定物体表面点与其图像像素点之间的对应关系，需要对投射的图案进行编码，因此，这类方法又称为编码结构光测量法。图案编码分为空域编码和时域编码。空域编码只需一次投射即可获得物体深度图，适合于动态测量，但分辨率和处理速度还无法满足实时三维测量要求，而且对于译码要求较高。时域编码需要多个不同的投射编码图案组合编码，这样容易实现解码。常用的编码方法有二进制编码、随机图案编码、彩色编码、灰色编码、邻域编码、相位编码及混合编码等^[20]。

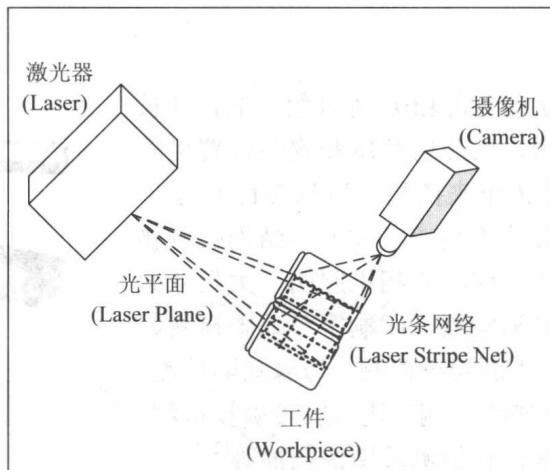


图 3-11 面结构光模式

相位光模式是将光栅图案投射到被测对象表面，受被测对象曲面调制，光栅条纹发生