

天津理工大学

硕士学位论文

机器视觉照明光源关键技术研究

姓名：李俊

申请学位级别：硕士

专业：检测技术与自动化装置

指导教师：张宝峰;许智钦

20061201

## 摘要

照明系统是机器视觉应用最关键的部分之一，其主要目标是以合适的方式将光线投射到被测物体上，突出被测特征部分的对比度。好的设计能够改善整个系统的分辨率，简化软件的运算；不合适的照明，则会引起很多问题，例如花点和过度曝光会隐藏很多重要信息。

文章首先研究了 LED 光源照明技术在机器视觉领域的应用，然后结合实际测量的需要提出了建立照射模型的方法，并给出了一种二十四相彩色穹形 LED 灯源的总体设计方案和各主要功能模块的软硬件设计。主要工作：

1. 光源照明方式的研究和光谱分析。其中，光源的照射角度是照明方式中最重要的因素，在这里进行了大量的实验，分析了合理照射角度的重要性。光谱即光源的发光颜色同样是光源系统设计的重要内容。实验表明：表面是白色的物体对光源颜色不做要求；表面有色彩就要根据表面的颜色选择对比度大的光源颜色；在照明时应尽可能选择单色光避免色差。另外文章对辅助光学配件在照明技术中的重要作用也做了深入的研究，通过实验得出：偏振片可以消除阴影光；漫射板可以使光变的均匀。

2. 照射模型。通过对 LED 光源的光通量、被测面的照度、CCD 的照度计算和软件模拟设计，建立了片式电子元件的照射模型。确定了不同片式电子元件特定的图像分析、设计需求和照明原则，研制出针对片式电子元件图像分析的 LED 光源。

3. 二十四相彩色穹形 LED 光源系统。该光源系统能够实现全方位、多角度的彩色照明，并在利用图像处理的生产中，取得了良好的效果。

**关键词：** 机器视觉；彩色 LED 穹形灯源；照明技术；光源模型

## ABSTRACT

Lighting engineering is a key technology in machine vision system. Its main target is to provide proper lighting for objects under inspection and increase contrast of image. A good light source system can greatly enhance resolution while an unsuitable one would cause lots of problems, for example, specular reflection and solarization may hide lots of important information.

Firstly, Lighting engineering in the field of machine vision will be particularly discussed in detail. And then to meet the actual need of online measurement, the paper introduces how to build lighting model. Finally, the great mass of this article is focused on research of main idea, hardware and software design of function modules for a 24-phase colour LED dome light source system. Something of this research is interesting in three respects.

1. Lighting techniques and spectrum. Both of lighting techniques and spectrum are deeply analyzed here. Angle range is one of the most important factor and lots of experiments had been done to prove the importance of proper angle range. The spectrum is also important in light source system and making the summary proves that if the surface of object is white and does not require the selectivity of color and if the surface of object is color and requires the big contrast of LED color. Moreover, the monochromatic light could avoid chromatic aberration. Also, the effect of polarizing filter and diffusion-board in illumination technology have been studied. The polarizing filter can eliminate glare from a glossy surfaces. The diffusion-board can make light even.

2. Lighting Model. The article introduces how to build lighting model by calculation of luminous flux, photometric brightness of both target surface and CCD camera and software simulation.

3. The 24-phase colour LED dome light source system, which can realize omnibearing and wide angle range lighting which gets good effects in image-measurement application.

**Key Words :** Machine vision; Colour LED dome light source; Lighting engineering; Lighting model

## 独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 天津理工大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：李俊      签字日期：2007年 1月 6日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津理工大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津理工大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编，以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复本和电子文件。

（保密的学位论文在解密后适用本授权说明）

学位论文作者签名：李俊      导师签名：张宝峰

签字日期：2007年 1月 6日      签字日期：2007年 1月 6日

## 第一章 绪论

### 1.1 机器视觉领域光源系统概述

近年来,高性能、低成本的图像处理装置大量出现,在外观检查、定位、组装等各方面得到了越来越广泛的应用。这主要是因为相关技术,如 CCD 的速度和灵敏度、电脑 CPU 的速度等大大提高了的缘故。另一方面,由于图像处理器的价格继续降低,客户在照明光源方面投入更大的预算,因为大家普遍认识到照明光源才是决定图像处理能否成功的关键所在。

一个稳定可靠的图像处理系统,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的获得高品质、高对比度的图像,即必须能够对应生产现场有可能出现的多种多样的外部条件的变化,例如环境光线的变化、被测物体的倾斜、材质的变更等等。为了实现这种稳定可靠的图像处理系统,提高照明光源的品质是至关重要的。

照明系统是机器视觉应用最关键的部分之一,其主要目标是以合适的方式将光线投射到被测物体上,突出被测特征部分对比度,其重要性无论如何强调都是不过分的<sup>[1-3]</sup>。好的设计能够改善整个系统的分辨率,简化软件的运算,它直接关系到整个系统的成败。不合适的照明,则会引起很多问题,例如花点和过度曝光会隐藏很多重要信息;阴影会引起边缘的误检;而信噪比的降低以及不均匀的照明会导致图像处理阈值选择的困难。对于每种不同的检测对象,必须采用不同的照明方式才能突出被测对象的特征,有时可能需要采取几种方式的结合,而最佳的照明方法和光源的选择往往需要大量的试验才能找到。除了要求有很强的理论知识外,还需要很高的创造性。

因此,为了获得优质稳定的图像,必须从照明光源中选择最为适合的光源。而且大多数情况下,要针对具体应用场合设计能获取优质稳定图像的照明光源。机器视觉照明光源将成为今后图像处理技术领域最为重要的课题。

### 1.2 照明技术在机器视觉领域的发展现状

1990 年以前,仅仅在大学和研究所中有一些研究图像处理和模式识别的实验室。在 20 世纪 90 年代初,一些来自这些研究机构的工程师成立了视觉公司,开发了第一代图像处理产品。尽管这些公司用视觉技术成功地解决了一些实际问题,但由于产品本身软硬件方面的功能和可靠性还不够好,限制了机器视觉的发展。另外市场的需求也不大,工业界的很多工程师对机器视觉没有概念,很多企业也没有认识到质量控制的重要性。这种情况一直持续到 1998 年,所以,我们称 1990-1998 年为初级阶段。期间真正的机器视觉系统市场销售微乎其微,主要的国际机器视觉厂商还没进入中国市场。

#### (1) 国内机器视觉照明技术的发展现状

自从 1998 年,越来越多的国外企业进入中国,他们带有机器视觉的整套的生产线

和高级设备进入中国。随着这股潮流,一些顶级的厂商认识到机器视觉检测对提升产品品质的重要作用。例如,北京和利时电机技术有限公司曾经担任五家外国公司的代理商。随着技术的发展,国内一些有实际经验的公司逐渐开发自己的视觉产品,如大恒图像,它是国内首屈一指的专业视频图像处理设备供应商同时也是著名的图像应用系统集成商和解决方案提供商。

在国内视觉技术发展的同时,一些知名的外资企业也进入了中国,如东冠科技(上海)有限公司是新加坡“Oriental System Engineering (Singapore) Pte Ltd”在上海成立的独资公司,主要从事半导体集成电路生产线上的机器视觉系统以及测试封装设备的研究开发和生产。同时还销售视像系统的附件,包括各种光源、摄像头、镜头、图像采集卡、机器视觉软件开发包、运动控制卡、软件开发包。为各个领域的生产企业提供全方位的服务。

但目前国内专业的照明光源制造商还没有,只有代理国外公司光源的代理商,所以国内照明光源技术相对来说还处于起步时期。

## (2) 国外机器视觉照明技术的发展现状

国外机器视觉照明技术的发展是非常成熟的。日本的 CCS 公司成立于 1992 年,致力于图像处理的 LED 光源的开发、设计、制造和销售。近年来,各种图像处理设备以其高性能低价格不断在市场上出现,CCS 公司所应用的领域越来越宽,例如表面探测、位置的确定以及产品的整合。该公司所研究制造的 LED 光源有直接照明光源(沐浴方式、低角度方式、条形方式、聚光方式)、间接照明光源(低角度方式、扁平环行方式、圆顶方式)、透射照明光源(背光方式、线形方式)、同轴照明光源(同轴方式)、特殊照明光源(平行光光学单元、多种用途的照明)等。

美国 Ai (Advanced illumination) 公司成立于 1993 年,致力于机器视觉照明技术的开发和研究,他们有先进的 LED 光源照明技术,所生产的光源有背光源、宽领域线光源、同轴光源、点光源、线光源等。他们用自己在机器视觉照明方面的优势来改进机器视觉系统的应用。

MORITEX 会社是日本著名的光电设备仪器制造企业,包括半导体,电子,医疗,通信,生物工程,精密机电机器制造的许多高精尖领域。在我国有很多经销商,如北京凌云光视觉图像技术公司等。

一般来说,日本制造的光源小巧,美国的光源产品结实,另外还提供软件控制。日本光源外观精致,因为选用的 LED 小所以排列紧密;美国同类产品的 LED 体积大所以排列时通过精确控制 LED 的光轴来确保光线均匀。

总的来说,机器视觉照明技术处在一个迅速发展期,随着市场的发展,未来的图像处理技术必须依赖于照明技术的同步发展。

## 1.3 机器视觉照明光源的应用

许多工业级的机器视觉系统用可见光作为光源,这主要是因为可见光容易获得,并且便于操作。常用的几种可见光光源是白炽灯、日光灯、水银灯、钠灯。但是,这些光源的最大缺点是光能保持稳定。以日光灯为例,在使用的第一个 100 小时内,光能下

降 15%，随着时间的增加，光能将不断下降。因此如何使光能在一定程度上保持稳定是急需解决的问题。另一方面，环境光将改变这些光源照射到物体上的总光能，使输出的图像数据存在噪声。表 1-1 是当前市场上常见的照明光源的比较：

表 1-1 机器视觉照明光源的性能比较

Tab.1-1 Capability Comparison Between Light Source In Machine Vision

	成本	亮度	稳定性	使用寿命	设计难度	温度影响
荧光灯	低	差	差	一般	低	一般
卤素灯+光纤导管	高	好	一般	差	一般	差
LED光源	一般	一般	好	好	高	低

不同种类的光源各有特色，在不同的机器视觉系统中，我们可以根据自己不同的需求来选择光源，其中荧光灯的亮度差，稳定性差，所以一般不用。卤素灯配合光纤导管的照明价格昂贵，在实际应用中寿命比较短，使用者要定期更换灯管来保证亮度。而以稳定性高和使用寿命长为优势的 LED 光源自然就被使用者所普遍采用，但其亮度仍没有卤素灯配合光纤导管高，所以在一些场合无法取代卤素灯。

近年来，半导体照明技术的兴起为机器视觉光源带来了活力。LED 照明光源因其独有的优势，在照明领域占据越来越重要的地位<sup>[4]</sup>。与传统的光源比较，LED 光源在机器视觉领域具有如下优点：

#### (1) 形状的自由度大

一个 LED 光源是由许多单个 LED 发光管组合而成的，因而比其他光源可做成更多的形状，更容易针对用户的情况，设计光源的形状和尺寸。

#### (2) 使用寿命长

为了使图像处理单元得到精确、重复性好的测量结果，照明系统必须保证相当长的时间内能够提供稳定的图像输入。LED 光源在连续工作 10,000 到 30,000 小时后，亮度衰减，但远比其他形式的光源效果好。此外，用控制系统使其间断工作，可抑制发光管发热，寿命将延长一倍。

#### (3) 应答速度快

LED 发光管响应时间很短，响应时间的真正意义是能按要求保证多个光源之间或一个光源不同区域之间的工作切换。

#### (4) 可自由的选择颜色

除了光源的形状以外，欲得到稳定图像输入的另一方面就是选择光源的颜色。甚至相同形状的光源，由于颜色的不同得到的图像也会有很大的差别。实际上，如何利用光源颜色的技术特性得到最佳对比度的图像效果一直是光源开发的主要方向。目前 LED 发光管的主要颜色是：红、蓝、绿、白。

#### (5) 综合性运转成本很低

选用低廉而性能没有保证的产品，初次投资的节省很快会被日常的维护、维修费用抵消。其他光源不仅耗电是 LED 光源的 2-10 倍，而且每月都要更换，浪费了维修工程师许多宝贵的时间。而且投入使用的光源越多，在器件更换和人工方面的花费就越大。

因此选用寿命长的 LED 光源从长远看是很经济的。

LED 光源是 21 世纪的新一代光源—第四代光源，以替代白炽灯、荧光灯和高压气体放电灯等传统光源。LED 以其固有的特点，如省电、寿命长、耐震动，响应速度快、冷光源等特点，广泛应用于指示灯、信号灯、显示屏、景观照明等领域，在我们的日常生活中处处可见，家用电器、仪表板照明、汽车防雾灯、交通信号灯等。近几年来，随着人们对半导体发光材料研究的不断深入，LED 制造工艺的不断进步和新材料（氮化物晶体和荧光粉）的开发和应用，各种颜色的超高亮度 LED 取得了突破性进展，其发光效率提高了近 1000 倍，色度方面已实现了可见光波段的所有颜色，其中最重要的是超高亮度白光 LED 的出现，使 LED 应用领域跨越至高效率照明光源市场成为可能<sup>[5-6]</sup>。

## 1.4 课题背景和本文研究的意义

有时候，一个完整的机器视觉系统无法支持工作，但是仅仅优化一下光源就可以使系统正常工作。机器视觉领域照明应用的最重要任务就是使需要被观察的特征与需要被忽略的图像特征之间产生最大的对比度，从而易于特征的区分。机器视觉应用关心的是反射光（除非使用背光）。影响反射效果的因素有：光源的位置，物体表面的纹理，物体表面的几何形状及光源的均匀性。机器视觉照明复杂化是由物体表面的变化造成的。如果所有物体表面是相同的，在解决实际应用的时候就没有必要采用不同的照明技术了。但由于物体表面的不同，因此需要控制好观察视野中的物体表面的反射光。因此在涉及机器视觉应用的光源设计时，最重要的原则就是控制好到达透镜的反射光及反射程度。

照明系统在机器视觉系统中是必不可少的，而且没有一个通用的照明系统能够适合各种场合，这就使得光源照明技术更为重要。在光源照明技术中，好的光源与照明方案往往关系到整个系统的成败，起着非常重要的作用，而并不是简单的照亮物体而已。光源与照明方案的配合应尽可能地突出物体特征量，在物体需要检测的部分与那些不重要部份之间应尽可能地产生明显的区别，增加对比度，同时还应保证足够的整体亮度，物体位置的变化不应该影响成像的质量。好的设计能够改善整个系统的分辨率，简化软件的运算，减少机器视觉成像的负担。

本论文的任务就是针对不同的场合，研究建立合适的照射模型，设计稳定、经济、优质的照明光源，以满足实际检测和测量的需要。

## 1.5 本文主要研究工作

本文的工作包括三部分：照明技术的研究、照射模型的建立和二十四相彩色穹形 LED 光源设计。

照明技术部分主要介绍了光源的照明方式和光谱分析。其中，将照明方式大体上分为前向照明和背向照明两类并结合照明实例分析如何选择这两种不同的照明方式；光谱分析方面同样进行了大量实验，并获取了许多机器视觉光谱选择的经验和技巧。另外文章还涉及到辅助光学配件的因素包括偏光镜、漫射板、滤镜等。

照射模型部分结合片式电子元件照明给出了建立照射模型的方法，文中介绍了在光



学设计软件 ZEMAX 的辅助下建立照射模型的方法。排列不同发射角度的 LED 阵列来实现高、中、低多角度的照明。

二十四相彩色穹形 LED 光源的设计部分介绍了光源系统的总体设计方案和各软硬件功能模块的实现，并通过实验分析解决了精密测量过程中的存在的精度不足问题。

## 第二章 照明技术研究

### 2.1 光源系统模型

光源系统设计不仅需要调整光源本身的参数而且需要考虑应用场合的环境因素和被测物的光学属性。

#### 2.1.1 光源系统的参数

通常,光源系统设计可控制的参数有:(1)方向(Direction):主要有直射(Directed)和散射(Diffuse)两种方式,其主要取决于光源类型和放置位置。(2)光谱(Spectrum):即光的颜色,其主要取决于光源类型和光源或镜头的滤光片性能。光源的光谱用色温(Colour temperature)进行度量,色温是指当某一种光源的光谱分布与某一温度下的完全辐射体(黑体)的光谱分布相同时完全辐射体(黑体)的温度。(3)极性(Polarization):即光波的极性,镜面反射光(specularly reflected light)有极性,而漫反射光(diffused reflected light)没有极性。可在镜头前加一滤光片消除镜面反射光。(4)强度(Intensity):光强不够会降低图像的对比度,而过大则功耗大并且需散热处理。(5)均匀性(Uniformity):机器视觉系统的基本要求,但光源随距离和角度光强衰减。

#### 2.1.2 物体的光学属性

物体的主要光学属性包括:(1)反射(Reflectance):主要有镜面反射(Specular or Fresnel reflection)和漫反射(Diffuse reflection)两种类型。(2)透射(Optical density):其取决于物体的材料构成和厚度。(3)折射(Refraction):主要存在于透明材料中。(4)颜色(Colour):透射或反射的光能的光谱分布。(5)纹理(Texture):可用光照来进行增强或减弱。(6)高度(Height):直射照明可增强高度信息,而散射照明可减弱高度信息。(7)表面方向(Surface orientation):直射照明可增强表面方向信息,而散射照明可减弱表面方向信息。

### 2.2 机器视觉领域的典型光源

目前,应用在机器视觉领域的LED光源种类比较多,按照用途可以分为以下几类:

#### (1) 均匀背景光源

均匀背景光源,主要应用于尺寸测量或透明物体的缺陷检测。从背面照射,用来形成不透明物体的阴影或观察物体内部,优点是边缘特别突出,缺点是观察不到表面细节。使用的光源是钠光灯或LED光源。用于边缘检测、目标试样、不透明物体识别等。

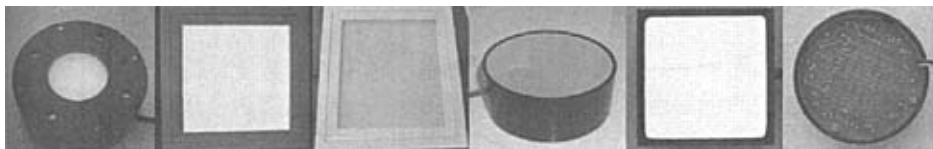


图 2-1 背景光源

Fig.2-1 Background Light Source

## (2) 穹形光源

穹形光源(Dome Light), 通过把LED的发光集中到球心上, 在球心位置附近形成明亮的立体照明效果, 适用于透明物体内部或立体物体的表面检测如玻璃瓶、滚珠、小工件表面等。照明效果类似于同轴光源, 是最常用的照明方式, 适用于工作距离大于20毫米的物体的照明应用: 印刷字符检测、PCB元件、塑料或铝制容器、标签、工件测量等。均匀性和稳定性非常突出。

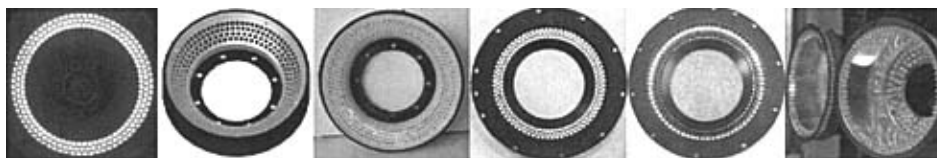


图 2-2 穹形灯

Fig.2-2 Dome Light Source

## (3) 环行光源

环形光源(Ring Light), 采用 LED 按圆周排列, 发出的光线向内汇聚, 光线方向和相机观察方向垂直或接近 90 度角, 多用于金属工件刻印字符、光滑表面划痕、瓶口尺寸或裂纹、平面工件表面质量等的检测。光源发出的光不直接进入摄像机, 瑕疵等表面的变化引起光线改变方向进入镜头, 从而实现了高对比度, 一般黑背景(Dark Field)均用此类光源实现。光源的尺寸和光线角度等选择直接依赖于被测工件的光学性质。

## (4) 同轴光源

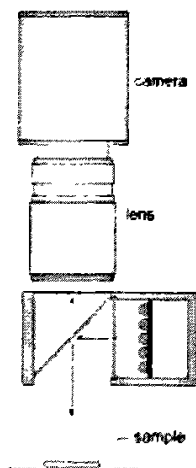


图 2-3 同轴光源

Fig.2-3 Coaxial Light Source

同轴照明是指照明光线平行地穿越固定式同轴镜头的垂直面。观察完全平面和反光的样品得到的图像是对于来自镜头照明光线的真实反射, 同轴照明对于观察非常平整或抛光的表面是非常理想的, 例如镜子表面, 其划痕或者其它瑕疵。光路图如图 2-3 所示。从光路图中可以看出 LED 的高亮度均匀的光线通过半透半反镜后成为与镜头同轴的光线, 用于均匀照射具反射性的工作界面, 主要用于金属玻璃等光洁表面的划痕检测, 芯片和硅片的破损检测, PC 模板的圆谱等的检测。同时, 同轴光的光源位于照明光路的侧面, 这样的照射方式可以减少光路的复杂性, 避免光源的放置给光路带来的不必要的麻烦。

## (5) 结构光照明

结构光三维视觉是基于光学的三角法测量原理。如图 2-4 所示, 光学投射器(可以是激光器, 也可以是投影仪)将一定模式的结构光投射于物体的表面, 在表面形成由被测物体表面形状所调制的光条三维图像。该三维图像由处于另一位置的摄像机摄取, 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（高度）。直观上，沿光条显示出的位移（或偏移）与物体的高度成

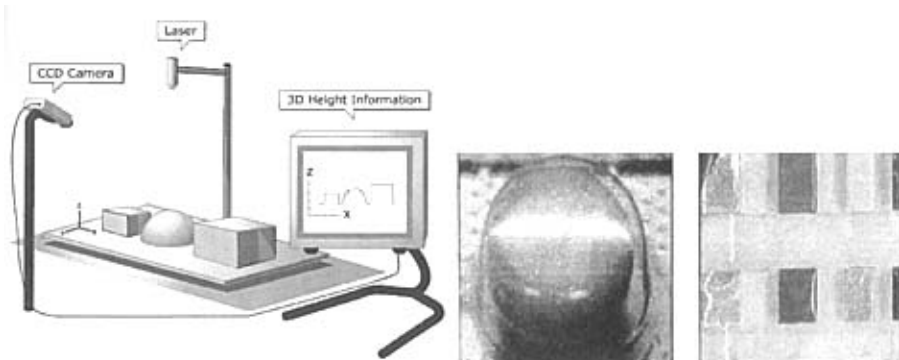


图 2-4 结构光照明及典型照明效果

Fig.2-4 Structure Light And Typical Lighting Effects

比例，扭结表示了平面的变化，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。

## 2.3 机器视觉光源照明技术

在介绍机器视觉光源照明方式以前，先介绍一下两个重要的概念。

### 2.3.1 明视野和暗视野

明视野：用直射光来观察对象物整体（散色光呈黑色）；暗视野：用散色光来观察对象物整体（直射光呈白色）。如图 2-5 直接光和散色光照明方式。

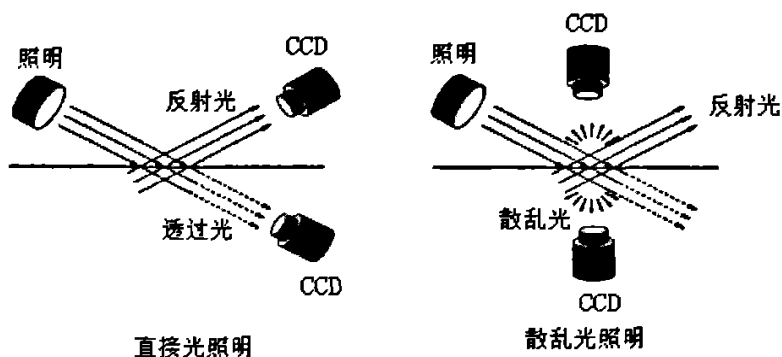


图 2-5 直射光和散射光照明方式

Fig. 2-5 Secular And Dark Field Lighting

明视野最重要的例子是同轴光照明。而同轴光用来检测那些平面的、表面光滑的物体，能够清楚的显现出表面特征或是减少阴影。低角度照明就是暗视野照明的一个例子。暗视野照明被用做检测表面污垢和表面突起的特征<sup>[7-8]</sup>。

如图 2-6, 2-7 所示，分别是用明视野和暗视野照明，图片引自 CCS 公司。



图 2-6 明视野

Fig.2-6 Light Field



图 2-7 暗视野

Fig.2-7 Dark Field

### 2.3.2 背向照明、前向照明

通常,机器视觉照明系统中,照明方式大体上可以分为背向照明和前向照明两大类:背向照明是将光源置于物体的后面,这种照明方式能突出不透明物体的阴影或观察透明物体的内部。所谓前向照明即光源位于物体的前面,主要是照射物体的表面缺陷、表面划痕和重要的细节特征等。原理图如图 2-8 所示。

其中,背向照明是将被测物置于相机和光源中间,优点在于可将被测物的边缘轮廓清晰地勾勒出来。由于在图像中,被测物被所遮挡的部分为黑色,未被遮挡的部分为白色,因此形成黑白分明易于分析的图像,该方法 90%用于精密测量系统中。如果条件不允许,也可以考虑同轴光照明。将光源置于相机和被测物之间,构成同轴光照明。一般来说,相同条件下,同轴光的照明效果不如背向照明的照明效果,而且同轴光源的价格要比背景光源高,所以对于尺寸测量,应首先考虑背景光源。

与背向照明相反,将灯源置于被测物和相机之前,称之为前向照明。在实际应用中绝大部分都采用前向照明方式。前向照明又分为“高角度”(75 度以上)和“低角度”(25 度以下)两种。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。在考虑使用“高角度照明”或“低角度照明”时,首先要考虑被测物表面待测部分,即背景部分机理的不同。所以,在对物体进行照明时,要确定被照物体的特征。如果是显示轮廓,那么用背向照明;如果要显示表面划痕,那么用前向照明。

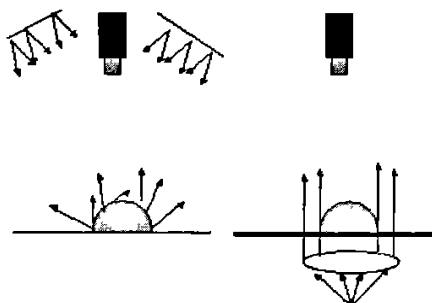


图 2-8 前向照明和背向照明

Fig. 2-8 Front Lighting And Back Lighting

### 2.3.3 照明方案的选择

实际测量或检测过程中,需要针对不同的场合选择合理的照明方案。通常,为了获得良好的照明效果需要进行大量的实验。下面列举一些实际检测和测量场合的照明方案。

#### (1) 印刷字符与高低角度照明

通常物体表面上的字符有两种不同的打印方式(印刷式或刻字式),这里分析在前向高低角度照明条件下的字符检测结果。不同的打印字符方式,造成待测部分表面机理的不同特性<sup>[9]</sup>。因此对于这两种字符的检测,虽然同样是采用前向光照明。但一般印刷式应采用高角度照明,而刻字式则采用低角度照明。下面是芯片表面印刷文字的照明效果:前一种照明采用的是高角度照明,后一种采用低角度照明。

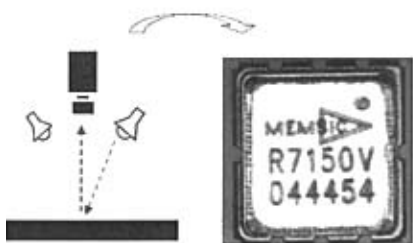


图 2-9 高角度照明

Fig.2-9 High-Angle Lighting



图 2-10 低角度照明

Fig.2-10 Low-Angle Lighting

从图中可以看到对于检测印刷字符,低角度照明的图像质量要好于高角度照明的图像质量,原因如下:当采用高角度照明时,由于芯片上的文字是印刷上去的,所以当光线照射上去的时候光线都反射出去了,进入到 CCD 相机的光线很少。而其他光滑部分,光线很多都反射进 CCD 相机中了,所以正是图 2-9 图像。但采用低角度照明的时候,由于光源的角度很低照射到文字上,通过文字的反射进入 CCD 相机中的光线就非常多,而光滑的表面的反射光线几乎都被散射掉了,根本无法反射到 CCD 相机中。所以一般芯片表面的印刷文字一般用低角度照明方式。

但有的场合高角度照明和低角度照明得到的图像效果相似,这是因为在前向照明方式中,所选的光源有直接和间接之分。也就是前面提到的明视野和暗视野。有些情况下需要采用暗场照明。由于光线通过漫反射板后光线四处散射,所以光线是从不同角度照射到芯片文字上的,这样就会有相对多的光线进入 CCD,从而有低角度的照明效果。但是这样的照明效果远不如明视野低角度照明的效果。

#### (2) 圆柱物与平行光、漫反光照明

在机器视觉应用中,经常会碰到圆柱形检测目标。例如啤酒瓶、电池壳、钢管、易拉罐、轴、香烟等等,也会遇到其他形状的曲面,例如球面或其它不规则形状。这些曲面在照明时,有一个共同的特点,就是会产生反光(Specular Reflection),类似于有风时的湖面,杂散的波面产生粼粼波光,虽然这是摄影家镜头下的美景,但是对于机器视觉的应用却是一个难题,会影响到检测方法的稳定性,而且对于曲面上的文字或特征进

行处理时，图像的视差和畸变会对处理方法提出特殊的要求。

根据几何光学的最基本定律：光线的反射角等于入射角，由于柱面的法线是连续变化的<sup>[10-12]</sup>，对于很多入射角度的光线，会因为光线反射到摄像机镜头而产生反光亮点（斑）。不论照明光源的角度如何调整，总有部分光线反射到镜头内。这正是所要避免的。而希望能够使表面特征（缺陷、字符等）散射的光线进入镜头成像，避开直接反射的光线，从而提高对比度，并且得到均匀照明的图像。从侧面照明，由于曲面方向连续变化，总有一部分光线进入视场，目前采用的照明方法中有两种可以解决反光的问题，第一种是使反射光不能进入镜头，第二种是控制反光，使反射进入镜头成像的光线分布均匀。

如图 2-11 所示，在沿轴向使用平行光照明，适当控制光线的入射角度，使反射光不能直接进入镜头，而是被柱面反射到其他方向。一般情况下，入射角不应小于 45 度。大多数应用中，需要使用两个光源，右边的光源照明左半部分，左光源照明右半部分，

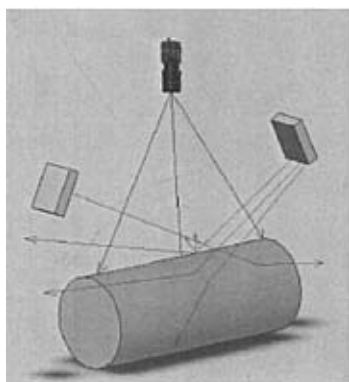


图 2-11 平行光照明

Fig.2-11 Parallel Lighting

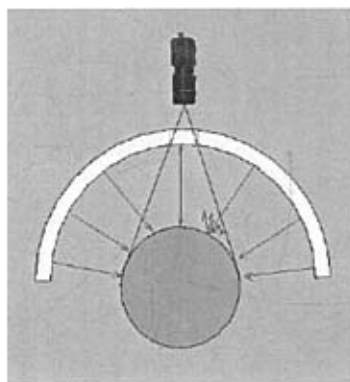


图 2-12 漫反射照明

Fig.2-12 Diffuse Lighting

中间有一定重叠，这样可同时保证照明的均匀性。对于较小的目标，只用一个光源就能满足要求，只是照明的均匀程度不如两个光源对射的照明效果。近似平行光从沿轴方向以一定角度入射，使反光不能进入镜头，只有缺陷或被测特征引起的散射光进入镜头成像。第二种方法如图2-11所示，使用漫散光照明。其基本原理是如果能够使各个方向进入镜头的反射光均匀，那么反射光引起的反射斑就被消除了。这类似于积分球（Integration Sphere）的工作原理。如果一个表面从任意角度观察，亮度都是一样的，用一束平行光照明，不管从哪个方向或角度入射或从哪个角度观察，该表面都是被均匀照明的，但是在现实中这种表面是很少见的。另一个极端的情况是表面是镜面，反射光的方向是非常确定的。如果此时照明光线以球状分布从各个方向均匀入射，那么，不管我们从哪个方向观察，接收到的光线是一样多的，也就是说，亮度是均匀的，这种情况下也不产生反光斑。对于柱状物体，这就要求光源的发光面同样是柱面的，发出均匀的漫射光，而且和被测物体共轴。显而易见，这种光源的设计和制造都是比较复杂的。

需要指出的是，漫反射照明方法产生的图像对比度比第一种方法低，因为尽管这些反射光的分布是均匀的，但这些光线还是直接经表面反射进入镜头成像。而第一种方法

中，只有被检缺陷产生的散射光进入镜头参与成像。



## 第三章 机器视觉 LED 光源光谱分析

### 3.1 LED 光谱分析理论基础

随着半导体技术的发展,现在的 LED 性能已经有了突破性的发展,光效已达几十流明每瓦,光通量达到几流明,颜色也更具多样性,有红、橙、黄、绿、蓝、白等各种颜色,其应用的领域也得到了很大的拓展。光的三原色红、绿、蓝;色彩的三原色青、紫、黄三原色的色光叠加为白光,如日光。三原色的色彩叠加为黑色。红、绿、蓝三色为互补色。光照在物体上物体只反射与自身颜色相同的光色,不同色光照在互补色物体上完全不反光。红光照射红色物体,黑白相机成像物体为白色;红光照射绿色物体,黑白相机成像为黑色。可见光的波长从短到长分别为紫色、蓝色、绿色、黄色、橙色到红色<sup>[13-15]</sup>。

为了得到高质量的图像,针对被测物的外形、状态和颜色等来选择最佳的照明光源颜色是非常重要的。颜色的选择要遵循照明色与色材之相性(色相性):色温近画像的颜色就淡,反之色温远画像的颜色就浓。光的三原色是红 R、绿 G、蓝 B,色材的三原色是青绿 C、赤紫 M、黄色 Y。R(红色)照射 M(赤紫)图像变淡,R照射 Y(黄)图像变淡,R照射 C(青绿)图像变浓;G(绿)照射 Y 图像变淡,G照射 C 图像变淡,G照射 M 图像变浓;B 照射 C 图像变淡,B照射 M 图像变浓,B照射 Y 图像变浓。巧妙地选择照明色可使难以摄取的图像一举成功或能取得更为优质的图像<sup>[16-18]</sup>。

### 3.2 照明光源光谱实验

为了证明机器视觉系统颜色的重要性,我设计几个实验加以验证:

#### 3.2.1 实验一

##### a. 实验器材

LED 光源、CCD 相机、以及相应的图像处理系统。

##### b. 实验步骤:

- (1) 使用制作好的白色 LED 光源进行照明。
- (2) 分别用红色或蓝色的 LED 光源对瓶盖进行照明,如图 3-1 所示。

##### c. 实验分析:

(1) 在被测物体颜色比较复杂的情况下,如果为了保证所有颜色都不丢失,那选择白色的光源是最合适的。下图用白光采集的图像,瓶盖图案的颜色都完成得能保留下来。

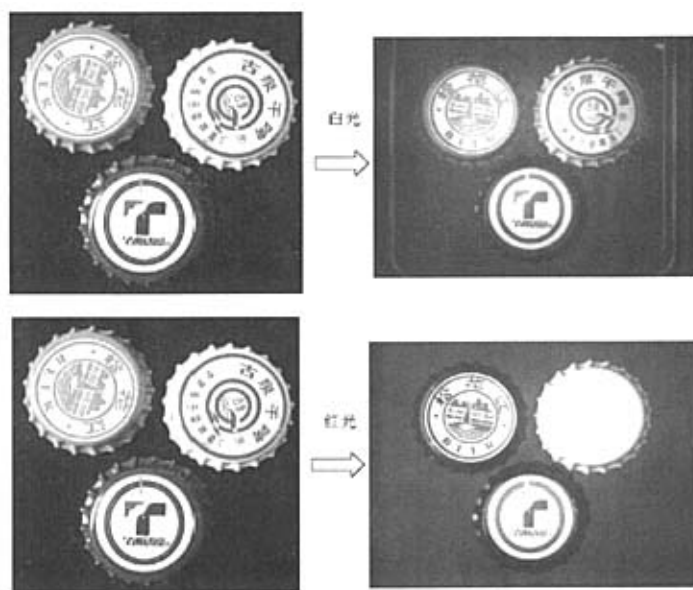


图 3-1 白光红光的照明效果

Fig.3-1 Lighting Effects By White And Red Colour

(2) 如果颜色比较复杂的情况下，我们要滤掉某颜色，那我们只要打上要滤掉颜色的光源，就可以轻松的滤掉某颜色如上面的图案中我们采用红色的光源，图片中古泉干啤的红色字体就被过滤掉了。

### 3.2.2 实验二

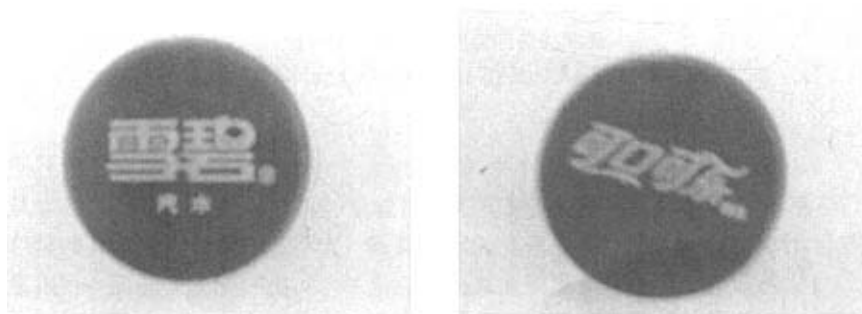


图 3-2 瓶盖实物图

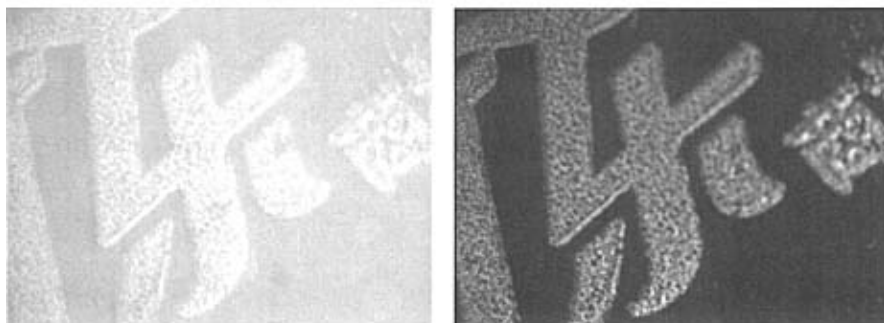
Fig.3-2 Bottle Hat

#### a. 实验器材

红色可乐塑料瓶盖、蓝色雪碧塑料瓶盖（瓶盖上的字均为白色，如图 3-2）、LED 光源、CCD 相机、以及相应的图像处理系统。

#### b. 实验步骤

(1) 分别用红色和蓝色的 LED 光源对红色可乐瓶盖进行照明，如图 3-3 所示：



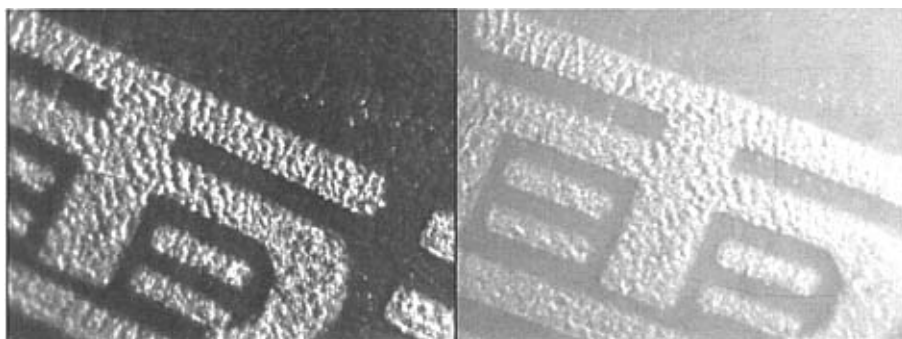
(a) 红色光照射

(b) 蓝色光照射

图 3-3 红色和蓝色照明

Fig3-3 Lighting Of Bottle Hat By Red And Blue Light

(2) 分别用红色和蓝色的 LED 光源对蓝色雪碧瓶盖进行照明，如图 3-4 所示：



(a) 红色光照射

(b) 蓝色光照射

图 3-4 红色和蓝色照明蓝色瓶盖

Fig3-4 Lighting Of Bottle Hat By Red And Blue Light

### c. 实验分析

从实验二可看出颜色对色材的重要性，从图 3-3 中看出红光照射红色瓶盖，它的照片颜色很淡并且发白，对比度不大，而蓝光照射红色瓶盖，照片的对比度很明显，图片的效果很好；而图 3-4 刚好相反，红光照射蓝色瓶盖发黑，蓝光照蓝色瓶盖发白。正好符合色相性。同时从实验二中我们可以选出好的像质，照射红色瓶盖用蓝光，照射蓝色瓶盖使用红光。所以在选择图片时应尽量突出图像的对比度。

#### 3.2.3 实验三

##### a. 实验目的

在视觉系统照明中，白色的 LED 光源对成像系统产生色像差（色差）；而用单色的 LED 光源则可以避免色差。

##### b. 实验器材

红色的 LED 光源、白色的 LED 光源、CCD 相机以及相应的图像处理系统。

### c. 实验步骤

(1) 首先用白色（复色光）的 LED 光源对物体边缘进行照明，然后取图，如图 3-5 所示：

(2) 用红色（单色光）的 LED 光源对边缘进行照明，然后取图，如图 3-6 所示：

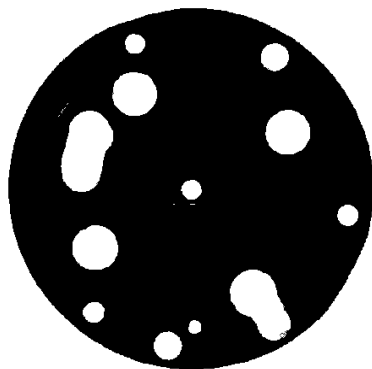


图 3-5 复色光照明

Fig.3-5 Compound Colour Lighting

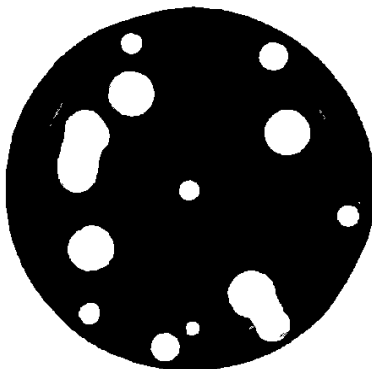


图 3-6 单色光照明

Fig.3-6 Pure Colour Lighting

### d. 实验分析：

从图中能看出白色光的照射效果没有红色光的照射效果好，这是因为白色光（复色光）经过光学系统折射后所成的像的边缘呈彩色模糊的现象。由于透镜材料对各种色光的折射率不同，因此透镜对各种色光的焦距也就不同，而像的位置与大小又决定于焦距，所以色差有位置色差（即纵向色差）和放大色差（即横向色差）两种。如图 3-7 所示， $P$  为白光源位于透镜的主轴上，由近轴光束所成的像因色散而不是会聚于一点，红色的折射光束成像于  $P'_C$ ，蓝色的折射光束成像于  $P'_F$  点。如果置一面屏于平面  $C$  则像的中心是红色的，周围是彩色的，外围呈蓝紫色。如果把光屏置于  $F$  平面，则像的中心是蓝色，周围也有彩色，外围是红色的。当光屏在平面  $F$  和  $C$  之间移动时，像的彩色会逐渐变化。而用单色光则会避免这种现象的发生。另外利用不同折射率、不同色差的玻璃

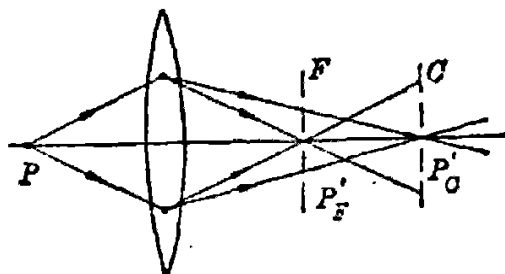


图 3-7 色差原理图

Fig.3-7 Reason For Chromatic Aberration

组合，可以消除色差。

### 3.3 实验小结

通过三个有关颜色的实验，充分证明了在机器视觉照明技术中光源颜色的重要性。在选择颜色时要先确定被照物体的外形、状态、颜色以及被照部分，如果照射物体的表面一定要确定物体的状态和颜色，依据色相性原理来选择合适的颜色，这时光源颜色会起到重要的作用；如果是用背光源来照射物体的轮廓和尺寸，那么光源颜色就不是那么重要。在机器视觉照明技术中，不用复色光进行照明，而用单色 LED 光源进行照明，这样做可以避免色差的出现。一般情况下，如果使用黑白摄像机，又对被测物的颜色选择没有特殊的要求，红色 LED 是最合适的选择。因为红色 LED 寿命长、稳定，价格也便宜，更为重要的是，红色 LED 的发光波长更接近 CCD 的灵敏度峰值，这样就形成了一个完美的结合。

## 第四章 辅助光学配件的运用

### 4.1 偏振片在机器视觉中的应用

#### 4.1.1 偏振片工作原理

所谓起偏，即将自然光转变为偏振光，而检验某束光是否是偏振光，即所谓检偏。用以转变自然光为偏振光的物体叫做起偏器；用以判断某束光是否偏振光的物体叫做检偏器<sup>[20]</sup>。偏振片（有一些物质，对光波中沿某一方向的光振动有强烈的吸收作用，而与该方向垂直的那个方向上，对光振动的吸收甚为微弱而可以让光透过，这种物质叫做二向色性物质。把二向色性物质涂在透明薄片上，就可制成常见的偏振片）是一种常用的起偏器和检偏器，它只能透过沿某个方向的光矢量或光矢量振动沿该方向的分量。把这个透光方向称为偏振片的偏振化方向或透振方向。

自然光经过起偏器后转变成线偏振光。在自然光的光路中插入检偏器，屏上光强减半。检偏器旋转，屏上亮暗无变化。

对线偏振光，检偏器旋转一周，光强两亮两暗。对部分偏振光，检偏器旋转一周，屏上光强两亮两弱。

马吕斯定律：

1. 一束光强为  $I_0$  的线偏振光，透过检偏器以后，透射光的光强度为

$$I = I_0 \cos^2 \alpha \quad (4.1)$$

其中  $\alpha$  是线偏振光的光振动方向与检偏器透振方向的夹角，该式称为马吕斯定律。

2. 在光路中放入偏振片  $P_1$  做为起偏器，获得振动方向与  $P_1$  透振方向一致的线偏振光，线偏振光的强度  $I_0$  为入射自然光强度的  $1/2$ 。

3. 在光路中放入偏振片  $P_2$ ，作为检偏器，其透振方向  $P_2$  与  $P_1$  的夹角为  $\alpha$ ，透过  $P_2$  的光振幅为：

$$A = A_0 \cos \alpha \quad (4.2)$$

式中  $A_0$  为透过  $P_1$  的线偏振光的振幅。

因为  $I / I_0 = A^2 / A_0^2$ ，所以光强  $I = I_0 \cos^2 \alpha$

马吕斯定律说明了入射到偏振片的线偏振光，其透射光强的变化规律。光路图如图 4-1 所示：

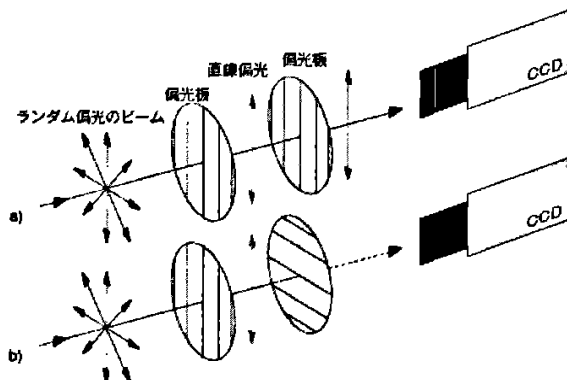


图 4-1 马吕斯定律

Fig.4-1 Law Of Malus

以上的理论可以换一种形象的说法即是：光源通过第一个偏振片后，就相当于被一个“狭缝”卡住了，只是振动方向跟“狭缝”方向平行的光波才能通过。光源通过偏振片后虽然变成了偏振光，但由于光源中沿各个方向振动的光波强度都相同，所以不论第一个偏振片转到什么方向，都会有相同强度的光透射过来。再通过第二个偏振片去观察就不同了；根据马吕斯定律，不论旋转哪个偏振片，两偏振片透振方向平行时，透射光最强，两偏振片的透振方向垂直时，透射光最弱，从而能消除映影光<sup>[21]</sup>。

从普通光源发出的光不是偏振光，而是自然光。光的偏振现象并不是罕见的。通常看到的绝大部分光，除了从光源直接射过来的，基本上都不是自然光，只是眼睛不能鉴别罢了。如果用偏振片去观察玻璃或水面上反射的光，旋转偏振片发现透射过偏振片的光的强度也发生周期性的变化，从而知道反射光是偏振光。

#### 4.1.2 偏振片实验

##### a. 实验目的

在照明技术中运用偏振片，以便使图像消除映影光，保证良好的像质。

##### b. 实验器材

LED 光源、表面光滑的物体、偏振片、CCD 相机、以及相应的图像处理系统。

##### c. 实验步骤

- (1) 调整光路，用 LED 光源进行照明，并取像，如图 4-2 所示：
- (2) 使用一片偏振片，用 LED 光源进行照明，并取像（图像引自 CCS 公司），如图 4-3 所示：
- (3) 用两片偏振片进行拍照，如图 4-4 所示：



图 4-2 不加偏振片照射光滑表面

**Fig.4-2 Lubricous Surface Without Poloroid**

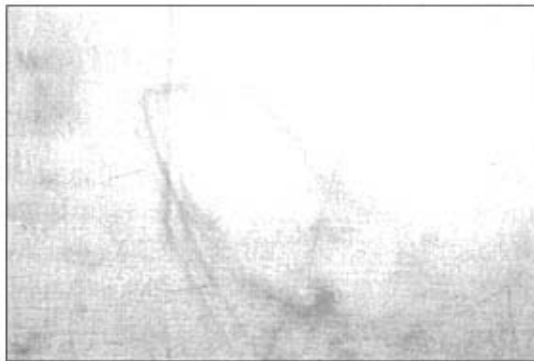


图 4-3 带一片偏振片照射

**Fig.4-3 Lighting With One poloroid**

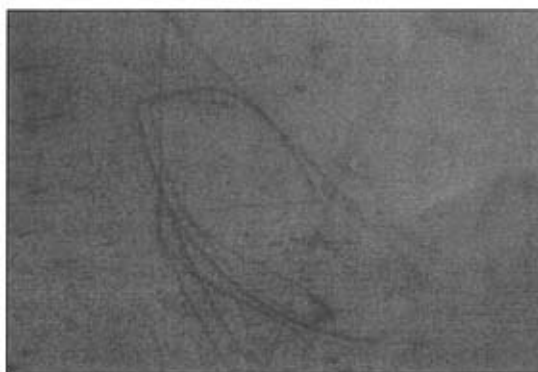


图 4-4 两片偏振片照射

**Fig.4-4 Lighting With Two Poloroid**

#### d. 实验分析

没有偏振片的情况图片是曝光的；加上一片偏振片能大概看出光滑物体表面的划痕；两片偏振片就能清楚的看出表面划痕。当光照射到光滑物体表面时，没有划痕的部



位的反射光是偏振光，而有划痕的部位就改变了反射光的偏振状态，如果用一片偏振片就对光滑部位的反射光起到了检偏的作用，对划痕部位的反射光起到了起偏的作用，所以划痕部位看不清；如果再加上一片偏振片就会对划痕部位的反射光进行检偏。所以，加上两片偏振片对光滑物体能进行消映影光，从而看清表面的状态。

#### 4.1.3 偏振片实验小结

实验表明映影光对视觉照明的影响是不可忽视的，而偏振片则可以消除光反射产生的影响从而突出表面的细节，偏振片可以直接安装在镜头上或者光源的一侧，或两者同时使用，同时使用时两个偏振片的光轴需要互相垂直。

光的偏振现象除了在视觉照明中应用，在其他技术中也有很多应用。例如拍摄水下的景物或橱窗中陈列品看不清楚，拍摄的照片也看不清楚。如果在相机镜头加上一个偏振片，使偏振片的透振方向与反射光的偏振方向垂直，就可以把这些反射光滤掉，而拍摄出清楚的照片。

## 4.2 漫射板在机器视觉中的应用

### 4.2.1 漫射板工作原理

如果用不均匀的光照射，就会拍出不良的像质，给图像处理系统带来很大的困难。在机器视觉照明系统中对光源最基本的要求就是均匀光源。用漫射板的作用就是使光变的均匀。因为漫射板是玻璃的一个表面用金刚砂打磨成凹凸不平后制作成的一种玻璃，光线通过漫射板（由于玻璃的厚度变的不均匀了）折射后向四面八方射出去，这样一来发出的光就均匀了。

### 4.2.2 漫射板实验

#### a. 实验目的

在机器视觉照明技术中，运用漫射板能使光均匀而且能抑制拍摄光滑表面的物体时所产生的眩目光和 LED 的反射等情况，从而能保证良好的像质。

#### b. 实验器材

LED 光源、漫射板、LED 光源、CCD 相机以及相应的图像处理系统。

#### c. 实验步骤

- (1) 首先用 LED 光源直接照明，并进行取像，如图 4-5 所示：
- (2) 使用漫射板进行照明，然后进行取像，如图 4-6 所示：

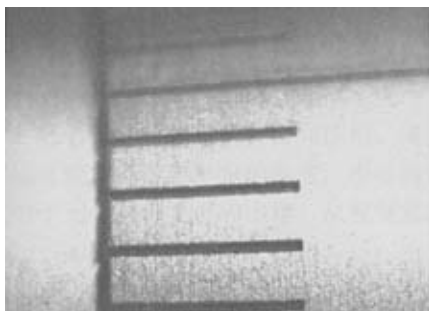


图 4-5 无漫射板

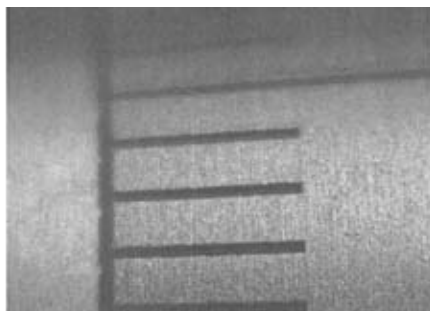
**Fig.4-5 Lighting Without Diffused Plate**

图 4.6 有漫射板

**Fig.4-6 Lighting With Diffused Plate**

(3) 为了进一步说明问题，又拍摄了两幅图片，如图 4-7、图 4-8 所示：



图 4-7 无漫射板

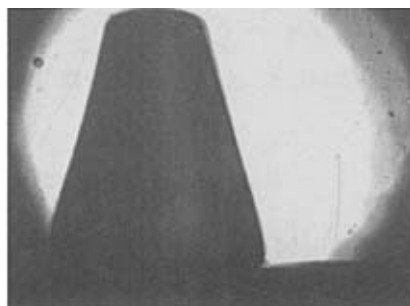
**Fig.4-7 Lighting Without Diffused Plate**

图 4-8 有漫射板

**Fig.4-8 Lighting With Diffused Plate**

#### d. 实验分析

对比图 4-5 和图 4-6 两幅图片，图 4-5 是没有放漫射板的情况，从图中能看出物体表面反射的刺眼的光，这个图片对后面的图像处理中会带来非常大的困难，换句话说，这幅图片是报废品。图 4-6 是加了漫射板的情况，这时拍摄出的图片就消除了物体表面的眩目光，可清晰的看出表面的状态。对比图 4-7 和图 4-8 两幅图片，图 4-7 中的许多亮斑是 LED 光管的反射所造成的，图 4-8 是加了漫射板的情况可看出物体表面已消除了 LED 光管的反射光。

#### 4.2.3 漫射板实验小结

通过此实验，充分证明了在机器视觉照明技术中漫射板的重要性。漫射板不仅能使光均匀而且能抑制拍摄光滑表面的物体时所产生的眩目光和 LED 的反射等问题。漫射板的这些优点使得它被许多视觉光源公司所青睐，如日本的 CCS 公司，他们的光源除了个别特殊照明外大多数的照明方式都安装有漫射板。

## 第五章 光源照射模型研究

随着自动化技术的普及与应用,视觉技术越来越备受关注,对片式电子元件的贴装自动化也已经达到一定的高度,相应的片式电子元件图像分析照明也需要得到重视。片式电子元件的种类多种多样,从视觉算法和几何封装结构上对其分类,可以分为5种:Chip, SOIC, BGA, QFP, Odd。

表 5-1 片式电子元件封装

Tab.5-1 Footprint Of Electronic Appliance

类型	几何封装结构主要特征描述
Chip类	体积很小,目前市场上大量使用最小的Chip为0603(1.0mm×0.5 mm),两侧带有两个引脚。
SOIC类	长宽约5-20mm,两侧带有引脚,引脚一般在10个以上,两引脚之间宽度约1mm左右,引脚弯曲程度较小。
BGA类	长宽10mm×mm以上,多个球状引脚在板上突起,形成点阵。
QFP类	长宽一般10mm×10mm以上,四侧引脚可多达上百个,引脚与引脚之间的间隙可以做得很窄,可达到0.3mm,引脚弯曲程度较大。
Odd类	异形不规则元件,封装引脚不规则。

由于以上各种芯片照明的复杂性,卤素灯等常见光源已经不能满足需求,而组合而成的LED点阵结构二次光源进入这个照明新领域,根据几何光学原理,可以针对各种芯片设计出相应的结构光源。

片式电子元件的照明是为了图像处理和分析黑白图像。一般都要经过二值化处理分析,因此光源的设计应符合处理分析方法,使图像处理速度更快,精度更高。不同的片式电子元件,所针对设计的照明光源是不同的。光源应当能使图片轮廓分明,检测点突出,照度均匀,对于某些运动目标,还需提高照度要求。一般遵循以下考虑因素和设计原则:

- (1) 设计光源首先取决于被测元件的形状和表面条件,即表面是否平滑、粗糙或有无光泽,其次设计最佳的光源颜色,还要取决于被测物体的颜色和被测区域;
- (2) 要完全掌握摄像机与被测元件的距离,LED光源与被测元件的距离,以便进行合理的设计;
- (3) 摄像照明系统是在摄像机视野的基础上确定的,而摄像机视野的大小要取决于被测元件的大小;
- (4) 要获取对比度好的图像,要考虑照明光源的光谱模式与摄像机灵敏度模式的匹配,否则无法得到最佳的图像;

- (5) 要考虑LED的散热问题，因为LED光源会因发热而导致亮度减小和速度降低；  
 (6) 参照亮度分布和发光度作为设计最佳光源的辅助手段。

### 5.1 建立照射模型

片式电子元件的引脚一般为锡铅合金，表面为各类环氧树脂等塑料封装。在直射条件下，锡铅合金的反射率约为50%-60%，偏黑色塑料的反射率约为15%-40%，因此可以根据反射率差异将两者区分出来。根据以上设计原则，确定好需要设计的工作距离和视场大小。

由于采用拍摄的工业摄像机一般为CCD，对光的灵敏度产家一般设计为650nm波长的红光处于峰值，而且该波长的LED技术比较成熟稳定，因此首先考虑采用该波长的LED进行设计。其最重要的工作在于计算被测面的照度，计算CCD像素接受照度，计算出所需LED的数目，完成初步模型建立。需要考虑以下因素：

- (1) 根据照明对象、光通量的需求，决定光学系统的形状、LED的数目和功率大小；
- (2) 将若干个LED组合设计成点光源、环形光源或面光源的“二次光源”，根据组合成的“二次光源”，设计照明光学系统；
- (3) 构成照明光学系统的“二次光源”上的每只LED的配光分布控制十分重要，封装LED的透明树脂起凸透镜作用，是决定单个LED发出聚光还是散光光束的重要部件。

#### 5.1.1 光能量计算

为了计算照明能量是否真正达到要求，需要计算光能量的大小，从而确定LED的数目和功率等其他参数。采用功率为P的LED，其电光转换率为 $\eta$ ，则光通量：

$$\phi_v = \eta P = K_m \int_{380}^{760} \phi_\lambda V(\lambda) d\lambda \quad (5.1)$$

$K(\lambda) = \frac{\phi_v(\lambda)}{\phi_r(\lambda)}$  为光视效能，在波长为555nm时有最大值 $K_m$ ，其值为683 lm/W，

$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m} = \frac{1}{K_m} \frac{\phi_v(\lambda)}{\phi_r(\lambda)}$  为光视效率， $\phi_v$ 为光通量， $\phi_r$ 为辐射通量。由于

$K(\lambda)$  属于实验数据，因此根据CIE光效率曲线，可以用下式计算：

$$\phi_v = K_m V(\lambda) \phi_r = 683 V(\lambda) \phi_r \quad (5.2)$$

其中辐射通量 $\phi_r$ 的单位为W。当取光源的辐射通量为1W时，理论上其对应关系如表5-2。于是可以得到被测物的任意点的照度为：

$$E = \frac{d\phi_v}{dS} \quad (5.3)$$

式中： $dS$ 为被测物表面任一点的面元。被测物发出的光经过透镜进入CCD，CCD具有最小接收照度和最大负载照度，使入射的光强处于这两值之间，才可能获得良好的图像。

表5-2 波长、光视效率和光通量对应关系

Tab.5-2 Relations Between Wavelength And Luminous Flux

波长 $\lambda/\text{nm}$	光视效率 $V(\lambda)/\text{lm}$	光通量 $\phi_v/\text{lm}$
555	1	683
510	0.5	342
610	0.5	342
650	0.1	68

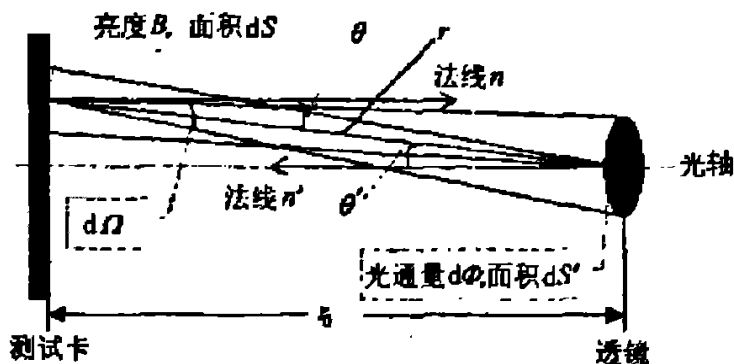


图5-1 面元形成的光通量示意图

Fig.5-1 Figure of Luminous Flux by image

从图5-1中获取的一个像素对应被测物的某一单元 $dS$ ，由于光学的数值孔径NA值较小，而CCD和被测物一般距离较远，透镜的曲率可以忽略，因此可近似认为透镜为面元 $dS'$ ，并垂直于光轴。落到被测物的光强为 $E$ ，反射率为 $R$ ，则反射光强 $B=E \times R/\pi$ 。光学系统透光系数为 $k$ ，一个像素对应的CCD面阵区域的面积为 $dS''$ ，则可得每个像素上获得的照度为：

$$E'' = \frac{k d\phi}{dS''} = \frac{kE * R * dS' * dS \cos^4 \theta}{\pi_0^2 dS''} \quad (5.4)$$

各个参数与时间 $t$ 或坐标 $(i, j)$ 有关，因此上式表达为：

$$E''(i, j, t) = \frac{kE(t) * R(i, j) * dS' * dS \cos^4 \theta(i, j)}{\pi_0^2 dS''} \quad (5.5)$$

适当调节LED的数目和功率等其它参数，使 $E''$ 处于一个可以得到良好图像的范围内。

### 5.1.2 片式电子元件的照明方式

各种类型片式电子元件需要的照明方式各有不同<sup>[22-24]</sup>，其实际方式见表5-3。对于SOIC和QFP类片式电子元件来说，背光源照明有巨大的优势。所采用的视觉算法相应可以又快又简单，但是背光源在实际应用中难以安装，因此暂不考虑，同轴光源的光强较弱，不适应动态摄取所需的高强度照射。为此设计出一组囊括高、中、低角度光源的多功能照明光源，以适应不同芯片的照明。

表5-3 各类片式电子元件的最优照明方式

Tab.5-3 Optimum Lighting Techniques For Electronic Appliance

	背光源	高角度直射	同轴光源	中角度照射	低角度照射
Chip		√	√		
SOIC	√	√			
BGA		√			√
QFP	√			√	

### 5.1.3 模型软件模拟图

根据以上设计思想,用光学设计软件ZEMAX模拟LED点阵,其结构如图5-2。图5-3为根据软件模拟图设计出的机械结构CAD图。LED点阵分为3层环状点阵,依次为高角度,中角度和低角度放置,最右方为一照度检测器,接收光能量。将每枚光通量为51m的



图5-2 LED点阵模型结构图



图5-3 LED点阵模型CAD机械图

Fig.5-2 Structure Chart Of LED Arrays

Fig.5-3 CAD Mechanical Figure Of LED Arrays

LED设定为发射 $10 \times 10^5$ 条随机光线进行能量检测,检测器大小为50mmx50mm,分辨率为100x100,可以分别得到每层环状LED点阵工作和三层LED点阵同时工作时处于同一平面的照度能量分布图。从试验结果看,其中央有效照明区域直径约20mm或以上,一般片式电子元件大小在20mmx20mm以下,因此视场符合设计要求;均匀性方面,从图中的颜色坐标算出有效照明区域的均匀性系数((最高照度-最低照度)/平均照度)控制在0.8以上。这个值远大于工业企业照明设计标准要求的0.7,符合了所期望的设计要求:平均照度达到了 $8 \times 10^4$  lx以上,通过控制CCD的电子快门和光圈,可控制成像的过度曝光,同时可以满足当高电子快门拍摄运动目标时所需的高照度照明。该灯设计为多功能组合灯,每层照明可单独工作,亦可根据需要进行组合工作。

## 5.2 实际照射图像和图像二值化分析

根据模型制作实物后取各类型典型的代表片式电子元件进行照明试验。其照明效果分别见图5-5(a)、(b)、(c)、(d)、(e),对照明效果图分别进行二值化处理,以达到算法需求处理效果见图5-6(a')、(b')、(c')、(d')、(e')。

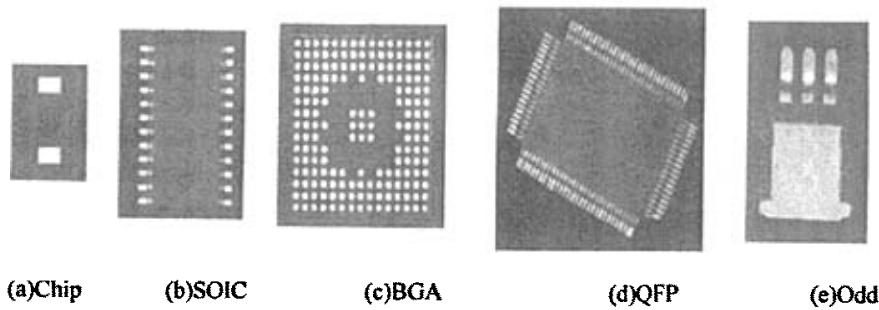


图5-4 电子元件照明效果图

Fig.5-4 Lighting Effects Of Electronic Appliance

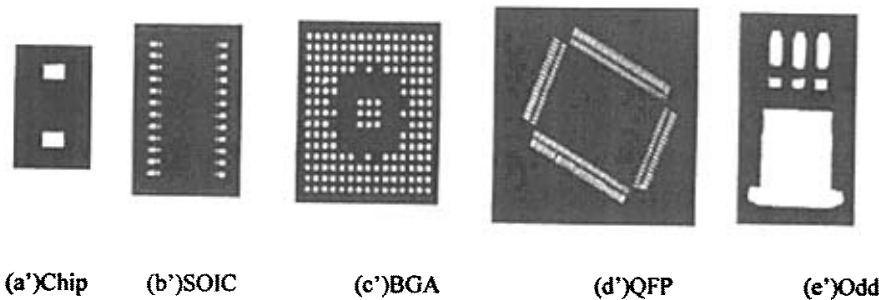


图5-5 二值化后的图像

Fig.5-5 Figure After Binarization

图5-4(a)采用高角度直射照明,使引脚均匀反射;图5-4(b)高角度直射照明,使引脚均匀反射光能,从而处于不同照射平面的高低引脚分层处理;图5-4(c)中角度和低角度组合照明,中角度控制亮度均匀性,低角度使引脚边缘轮廓和背景明显分离而呈现圆的完整性;图5-4(d)中角度照明,能使处于不同照射平面的交角出现明显分层并且均匀性相近;图5-4(e)采用中角度和高角度组合照明,高角度保证照明均匀,中角度使引脚分层。虽然所设计的图像分析LED组合光源基本能够胜任对各种元件图像分析的照明工作,但是电子产业迅速发展,相应的片式电子元件层出不穷,Odd类型将增添新成员。对照明工作将带来新的挑战。不过可以遵循相应的思路对设计进行调整,以适应新产品需要。

### 5.3 小结

通过对LED光源的光通量、被测面的照度、CCD的照度计算和软件模拟设计,确定了不同片式电子元件特定的图像分析、设计需求和照明原则,同时考虑了各种照明影响因素,研制出针对片式电子元件图像分析的LED光源,该LED照明光源可独立或组合工作,适用于绝大多数片式电子元件。在利用图像处理的生产中,取得了良好的效果。

## 第六章 二十四相彩色穹形 LED 灯源系统设计

二十四相彩色穹形 LED 灯源的提出, 源于精密测量<sup>[25-26]</sup>的要求:

- (1) 对精密测量复杂形状的物体, 如带有 R 状(见后面实验)角度的被测物, 图像采集系统对光源的照射角度和位置比较敏感<sup>[27-28]</sup>。
- (2) 不同材质或颜色的被测物对光反射率有较大的不同, 需要的照明强度差别很大。
- (3) 复杂形状的物体<sup>[29-32]</sup>需要合适方向的照明, 需要两个或多个照明光源才能满足要求。

### 6.1 二十四相彩色穹形 LED 灯源系统方案

基于以上考虑, 提出了一种二十四相彩色穹形 LED 灯源的设计方案。灯源系统由 24 个可以独立控制的部分组成, 采用穹形灯的布局来实现多照明角度。灯源的 24 个部分能实现全方位照明, 且根据光的三原色原理选用超高亮度的 RGB 三种 LED 阵列能够实现颜色的调节。灯源系统的硬件、软件部分功能模块: 其中硬件部分主要包括灯源灯体和调光板电路; 软件部分主要是编写灯源的上位机界面控制程序。

#### 6.1.1 灯体设计

二十四相彩色穹形 LED 灯源灯体设计如图 6-1, 这里的穹形灯的照射角度可以有多种布局方式。由于灯体大小的限制, 只用了三层 LED 阵列, 每层 LED 阵列分为 8 个部分, 称为 8 “相”, 三层总共 24 “相”。每一层阵列可以安排一种颜色的 LED, 这样每一阵列的单独照明可以实现红、绿、蓝三原色的单色光照明; 组合照明则可以实现多种颜色。

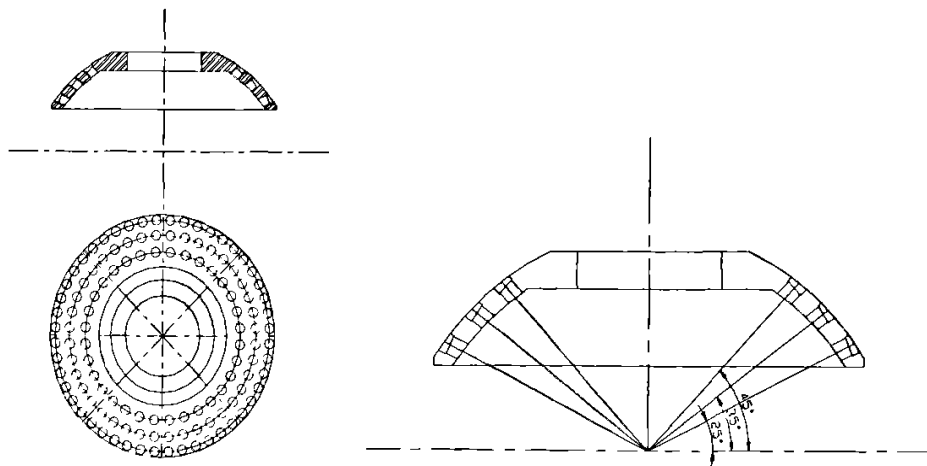


图 6-1 二十四相彩色穹形 LED 灯源 CAD 机械结构图

Fig.6-1 Mechanical figure of twenty-four phase colour LED dome light source

#### 6.1.2 调光板电路设计

调光板电路的功能是调节二十四相灯的发光亮度, 控制光源颜色和照射角度、方向。



其硬件功能框图如图 6-2:

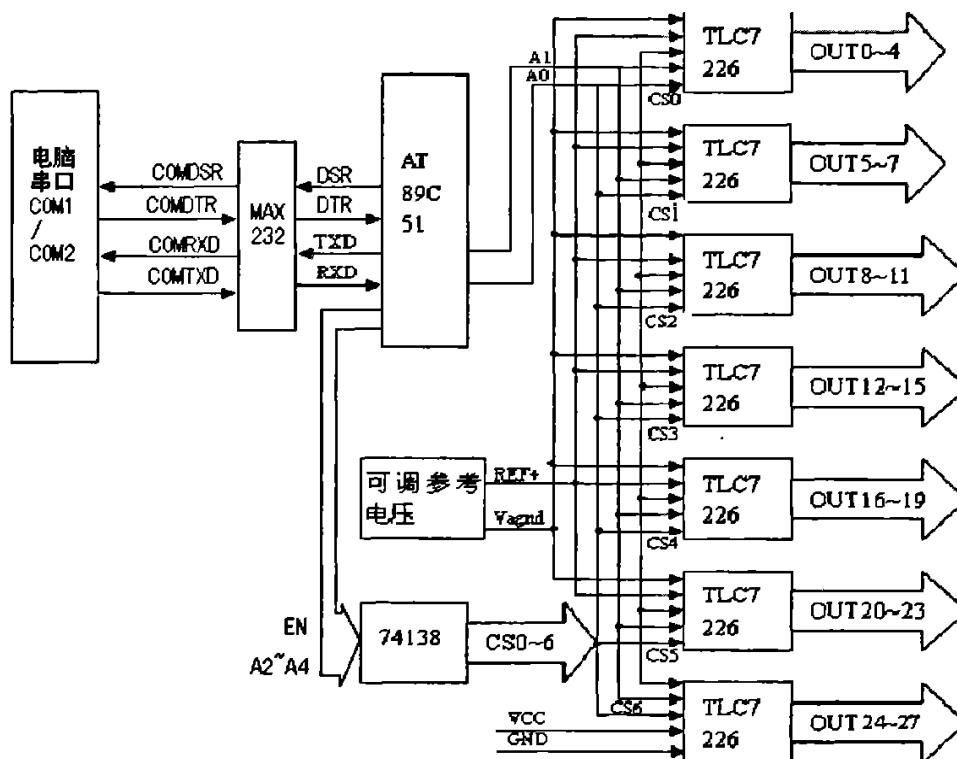


图 6-2 调光电路功能框图

Fig.6-2 Functional Block Diagram Of Lighting Controller

调光电路主要功能模块有:

(1) 数模转换模块: 工作过程为把 AT89C51 单片机从上位机接收到的控制量(颜色、亮度等数字量)由数模转换芯片 TLC7226CN 转换为模拟量, 控制相应相的发光亮度。

该模块中核心器件为 Microchip 公司的 DA 转换器 TLC7226CN, 转换过程为可以简述为: 写使能信号高电平有效, 地址选通信号有效, 数据被载入, 开始转换。

该器件的特点有:

- (1) 4 通道 8 位数模 (D/A) 转换器, 每一通道有各自的锁存器, 转换时间为毫秒级。
- (2) 输入为 8 位 TTL/CMOS 兼容的数据信号、两位地址选通信号、写使能信号 (图 6-3)。
- (3) 该 D/A 转换器可与目前大多数的 8 位单片机接口兼容, 且每一输出通道包含一个输出放大器可以提供 5mA 的输出电流。
- (4) TLC7226CN 的输出电压范围由输入参考电压决定, 范围是 2V 到 VDD-4V, 采用双电源供电。

模块中 AGND 为模拟地输入端, 由 LM336 稳压管提供 2.5V 电压。REF 为输出电压参考端, 其值决定了电压范围, 这里为 5V, 即输出电压范围是 2.5-5V, 符合超高亮度 LED 的电压特性曲线。

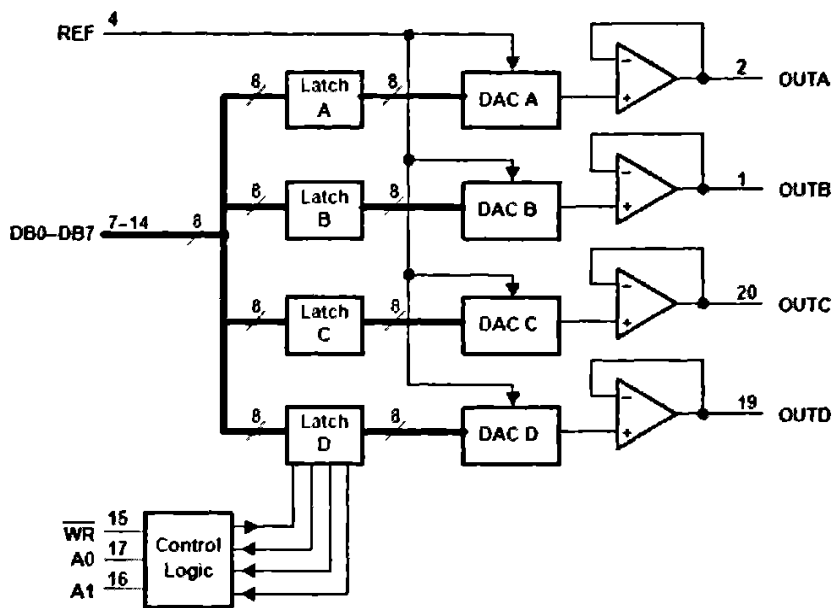


图 6-3 TLC7226CN 的原理图

Fig.6-3 Schematic Diagram Of TLC7226CN

(2) 通信模块：灯源所需的控制信号只有两个即灯源的颜色和亮度信号，而且控制信号由上位机发往单片机。

这里采用 PC 机-单片机串行通信典型的三线信号：TX、RX 和 GND，另外为了保证传输的可靠性，增加了一对硬件握手信号 DTR/DSR，一个作为输出，另一个作为输入。当接收方准备好接收数据，它置高 DTR 线表示它准备好了，如果发送方也就绪，它置高 DSR，表示它即将发送数据，其时序如图 6-4。2 个硬件握手信号 DTR、DSR 与单片机的 P2 口连接，相应的上位机信号为 COMDTR、COMDSR，中间的桥梁是 MAX232（电平转换）。首先上位机发出 COMDTR 信号通知单片机有数据要传送，单片机侦测到此信号，开始接收数据，接收到两个字节数据后，将 DSR 信号置低，通知电脑数据接收正确。在应用程序端测到 COMDSR 信号置高，相应的函数返回没有错误，否则返回对应的错误及原因代码。

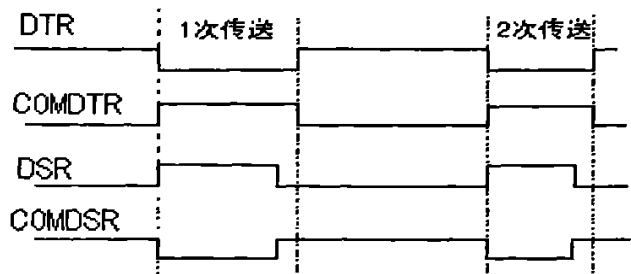


图 6-4 DTR/DSR 硬件握手信号的时序图

Fig.6-4 Timing Diagram Of Hardware Handshake Signal

(3) 驱动模块：主要功能是把数模转换器输出的毫安级的电流信号通过三极管进行放大，以满足 LED 的正常工作要求。

使用 LED 灯源时，一般厂家都提供了几种供电方式可供选择，最为常见的是 5V、12V、和 24V 直流电源，功率根据所用 LED 的数量多少而定。一般 LED 的工作电流 10mA-25mA，特别亮的 LED 可达到 50mA 甚至更高，而 LED 的电压降一般为 1.8 到 3.3V（因所用半导体材料而异），所以，理想情况下，每个 LED 发光管上都应该串联一个限流电阻，这样才能保证 LED 发光均匀，而且在电压波动时不易损毁。

**(4) 继电器开关模块：**该模块用来切换 LED 阵列的工作电压。

比如本灯源选购的蓝色、绿色 LED 工作电压接近，但与红色 LED 的值差别明显。为了满足不同的 LED 灯源的 LED 工作电压，用继电器设计了一个电子开关实现不同电压要求的 LED 灯源切换。如图，继电器的 1, 5 引脚是“常闭”的，2, 5 引脚是“常开”的。当切换信号 SW 为高电平时，继电器的 3, 4 引脚间形成高电平，继电器的 2, 5 触点闭合；当 SW 为低电平，3, 4 引脚间形成低电平，2, 5 触点断开。由 2, 5 触点的断开闭合来实现切换。

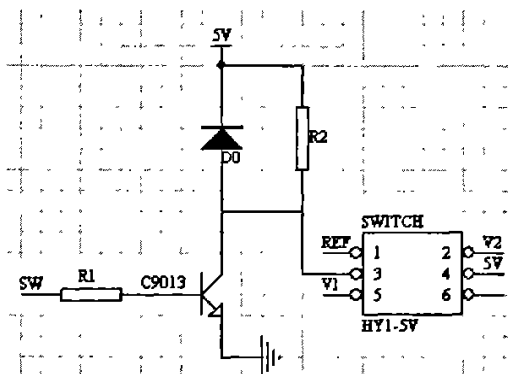


图 6-5 继电器开关

Fig.6-5 Relay Switch

### 6.1.3 上位机界面控制程序设计

灯源系统需要上位机来控制，所以需要编写界面控制程序。这里采用 Borland 公司的 C++ Builder 编程软件，将底层涉及串口操作的 API 函数做成 DLL（动态链接库），调用 DLL 编写界面控制程序，见图 6-6。

Borland C++ Builder 是 Borland 公司 98 年推出的全新 32 位 Windows 开发工具。C++ Builder 不仅继承了 Delphi 使用简便，功能强大，效率高等特点，而且它还结合 C++ 语言所有优点。用 C++ Builder 则可以大幅简化界面编程。C++ Builder 的 VCL 提供大量的各式各样界面软体元件，让我们可以将大部分的心力放在核心程式码的设计上，而不必在 Windows 系统的消息、界面上花费很多的时间。

由 Borland C++ Builder 集成的 DLL 快速开发工具将底层涉及到串口通信的 API 函数快速生成 DLL（动态链接库）文件。包括以下三个库函数：

1. bool OpenRs232 (bool chasel )
2. bool CloseRs232( void)
3. char CtlRs232 (bool Color, bool angSelect, BYTE nCS, unsigned char Lighting)

功能依次为打开光源，关闭光源，调节光源发光亮度、颜色和照射角度。

Borland C++ Builder 具有十分丰富的控件资源，可以大幅简化 GUI 编程，下面是用 C++ Builder 开发的灯源界面控制程序。

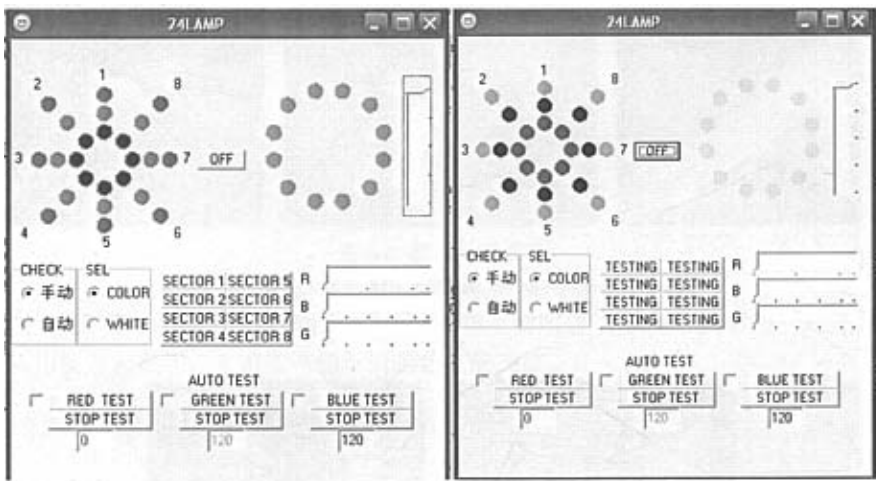


图 6-6 灯源系统控制界面  
Fig.6-6 Testbench Of Light Source System

6.2 二十四相彩色穹形 LED 灯源照明实验

二十四相彩色穹形灯源系统用于改进精密测量中的存在的精度不足问题。对于测量铝质工件 R 状角（图 6-7，6-8）的尺寸<sup>[33-35]</sup>，一些市场上的照明光源总是难以得到理想的照明效果。表现在：照明不均匀，局部照明强度过大，对比度不高。而二十四相穹形灯源可以提供不同的照明角度、照射方向和多样的颜色，这就大大改善了照明效果。

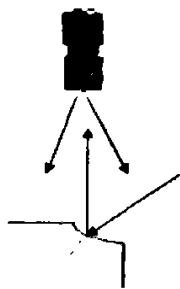


图 6-7 单相照明  
Fig. 6-7 One-Phase Lighting

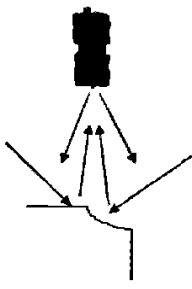


图 6-8 对射照明  
Fig. 6-8 Opposite Lighting

下面给出两种经过实验验证的照明方案

（1）单相照明：分别选择二十四相彩色穹形灯源的绿色、红色、蓝色相的一相，从正对工件 R 状角的方向照射（图 6-7）。

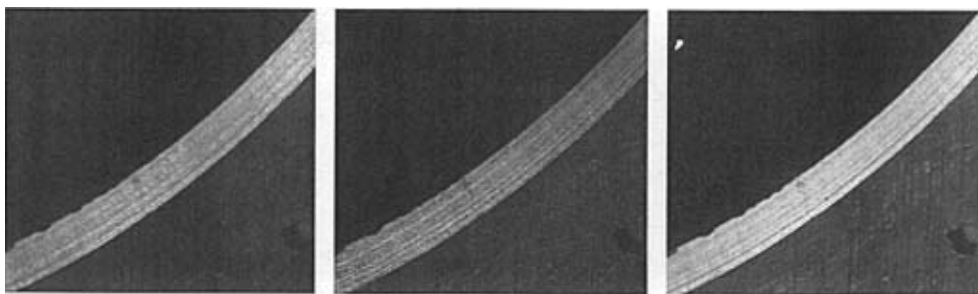


图 6-8 单相照明效果

Fig.6-8 lighting effects of one-phase lighting

(2) 对射照明：使二十四相穹形灯的一绿色相正面照射 R 状角，同时用一红色相或蓝色相从相反方向照明，并调节两相不同颜色灯的亮度。

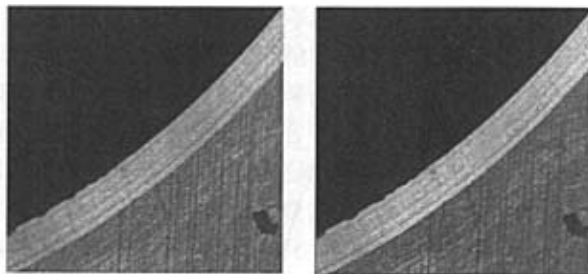


图 6-9 对射照明效果

Fig.6-9 lighting effects of opposite lighting

(3) 照明效果分析：二十四相穹形灯绿色相部分照射角度最小，与平面成  $25^\circ$  角；蓝色相部分次之与平面成  $35^\circ$  角，红色相角度最大与平面成  $45^\circ$  角。前者单一相照明可以尽可能保证 R 状角以外部分不直接反射光线到摄像机内，所以轮廓线与周围区域亮度差别很大。且照明角度越小，R 状角的轮廓线越清晰，即对比度越高；后者两种颜色光对射的照明方案中，正对 R 状角方向的绿色光大部分会直接被反射到摄像机，而相反侧方向的另一种颜色光由于几乎不会被 R 状角反射进入摄像机，所以会形成两种颜色形成鲜明的轮廓线。通过软件的取点处理发现，前一种方法在尺寸测量中获得的精度更高，但后者更适合手动来确定轮廓。

## 第七章 总结与展望

### 7.1 工作总结

近年来,机器视觉已经发展成为光电子的一个应用分支,广泛应用于微电子、PCB生产、自动驾驶、印刷、科学研究和军事等领域。在现代工业自动化生产中,涉及到各种各样的检查、测量和零件识别应用,例如汽车零配件尺寸<sup>[36-38]</sup>检查和自动装配的完整性检查,电子装配线的元件自动定位,饮料瓶盖的印刷质量检查,产品包装上的条码和字符识别等。这类应用的共同特点是连续大批量生产、对外观质量的要求非常高。通常这种带有高度重复性和智能性的工作只能靠人工检测来完成,我们经常在一些工厂的现代化流水线后面看到数以百计甚至逾千的检测工人来执行这道工序,在给工厂增加巨大的人工成本和管理成本的同时,仍然不能保证100%的检验合格率,而当今企业之间的竞争,已经不允许哪怕是0.1%的缺陷存在。有些时候,如微小尺寸的精确快速测量,形状匹配,颜色辨识等,人眼根本无法连续稳定地进行,其它物理量传感器也难有用武之地。而机器视觉技术将计算机的快速性、可靠性、结果的可重复性,与人类视觉的高度智能化和抽象能力相结合,实现了测量的自动化<sup>[39-40]</sup>。

论文主要完成了以下几方面的工作并在相关方面有所创新:

1. 深入研究了机器视觉领域的照明光源系统。研究内容包括照明方式、光源光谱、偏振片和漫射板等辅助配件。
2. 提出建立光源照射模型的方法。通过对LED光源的光通量、被测面的照度、CCD的照度计算和ZEMAX软件模拟设计,确定了不同片式电子元件特定的图像分析、设计需求和照明原则,同时考虑了各种照明影响因素,研制出针对片式电子元件图像分析的LED光源,该LED照明光源可独立或组合工作,适用于绝大多数片式电子元件。
3. 设计开发了二十四相彩色穹形LED灯源。二十四相彩色穹形灯源系统用于改进精密测量中的存在的精度不足问题,文中给出了该光源系统的总体设计方案和各软硬件功能模块的实现,对机器视觉光源设计有很高的参考价值。

### 7.2 展望

未来机器视觉的发展,核心技术的推动作用仍然是关键。近几年,CMOS图像传感器飞速发展,在性能方面日益接近CCD图像传感,在价格方面更具优势,是当前机器视觉发展的一个强劲的推动力。随着机器视觉图像处理系统的要求越来越高,客户对照明光源给予了更多的重视。建立优质的机器视觉光源系统离不开合理的照射模型,这就要求照明工程师掌握丰富的照明理论和实际经验,掌握建立照射模型的方法,精通光学设计辅助工具,进行大量的实验,针对不同的应用场合设计出优质的照明光源。

## 参考文献

- [1]唐向阳, 张勇, 李江有等. 机器视觉关键技术的现状及应用展望[J]. 昆明理工大学学报, 2004, 29(2): 26—31.
- [2]王健. 机器视觉在中国. <http://www.china-vision.net/articleview.2004-7>.
- [3]周太明, 宋贤杰, 周伟. LED-21 世纪照明新光源[J]. 照明工程学报, 2001, 12 (4): 37—40.
- [4]宋贤杰, 屠其非, 周伟等. 高亮度发光二极管及其在照明领域中的应用[M]. 半导体光电, 2002, 23 (5): 356—361.
- [5]李学勇, 方志烈. LED 白色照明新光源[M]. 灯与照明, 2000, 24 (6): 85—86.
- [6]雷玉堂, 王庆有, 何加铭等. 光电检测技术第 4 版[M]. 北京: 中国计量出版社, 1997. 92—95.
- [7]王耀东. 机器视觉-测量测试的新概念. <http://www.ccs-inc.co.jp>. 2005-4.
- [8]张以谟. 应用光学[M]. 第 2 版. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [9]尹炳桂, 陈斌, 双面胶印彩色印刷质量在线检测装置, 申请专利号 200520033167. 4.
- [10]王有庆. CCD 应用技术第 1 版[M]. 天津: 天津大学出版社, 2000. 166—167.
- [11]Engene Hecht, Ph.D, Theory and Problems of Optics[M], Mcgraw-Hill Book Company, January 1975.
- [12]Azzam RMA, Ellipsometry and Polarized Light[M], North-Holland Publishing Company, 1979.
- [13]Glenn E. Healey, Raghava Kondepudy. Radiometric CCD Camera Calibration and Noise Estimation[M], IEEE Trans. PAMI, 1994, 16(3): 267~276.
- [14]Young-Chang Chang, John F. Reid. RGB Calibration for Color Image Analysis in Machine Vision, IEEE Trans. Image Processing, 1996, 5(10): 1414~1422.
- [15]Milan Sonka, Vaclav Hlavac, Roger Boyle. Image Processing, Analysis and Machine Vision[M] (Second Edition), 影印版, 北京: 人民邮电出版社, 2002.
- [16]Kuhn, Gerhard. A new LED light source for projection applications, Digest of Technical Papers, 2005, 1702-1705.
- [17]Tsai, Shau-Yu. LED Illumination light source for projection display, Proceedings of the International Display Manufacturing Conference and Exhibition, IDMC'05, 2005, p 240-242.
- [18]Moe, Andrew E. Enhanced fluorescence emission using a programmable, reconfigurable LED-array based light source, 26th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC 2004, 2004, p 2090-2093.
- [19]Muthu, Subramanian. Red, Green and Blue LED-Based White Light Source: Implementation Challenges and Control Design, Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society), v 1, 2003, p 515-522.
- [20]李华, 韩锋, 彭成. 利用偏振光进行汽车前照灯防眩的实验研究. 世界汽车, 1994, 5: 15—18.
- [21]梁栓延. 物理光学[M]. 第 4 版. 北京: 机械工业出版社, 1984. 199—203.
- [22]张少军, 艾矫健. 利用数字图像处理技术测量几何尺寸[J]. 科技大学学报, 2002, 24(3): 284—287.

- [23]洪海涛,赵辉.图像技术用于尺寸测量的研究[J],仪器仪表学报,2001,(3):213-214. [29] 左建中,张断荣,李乃华等.自动检测集成电路芯片系统设备的集成研究,天津大学学报,2000,22(11).
- [24]薛向东,吴黎明,邓耀华等.有图形硅片关键尺寸图像测量方法研究[J],半导体制造2005.
- [25]黄正福,熊四吕.基于机器视觉的轴承尺寸检测[M].机床与液压,2004,(12):183—185.
- [26]MILAN Sonka.图像处理、分析与机器视觉[M].艾海舟,译.北京:人民邮电出版社,2003:9.
- [27]张文景,张文渊,苏健锋等.计算机视觉检测技术及其在机械零件检测中的应用[J],上海交通大学学报,1999,33(5):63563.
- [28]贾云得.机器视觉[M].北京:科学出版社,2000.150-168.
- [29]王永强,于德敏,许增朴.机器视觉玻壳缺陷检测方法的研究[J],天津轻工业学院学报,2001,(2):9-12.
- [30]王健民等.二维图像测量机及图像式大尺寸弧长在线测量系统的研究[C].博士学位论文.哈尔滨:哈尔滨工业大学图书馆,1998.
- [31]Ramesh Jain,Rangachar,Brian,Schunck. Machine Vision[M].China Machine Press,2003.
- [32]凌玉华,杨欣荣等.线阵CCD传感器构成的高精度尺寸检测系统,中南工业大学学报,1997,28(5):486-489.
- [33]郑颖君,陈杰武等.CCD测量系统光学设计实用方案,激光与红外,2001,31(6):367-369.
- [34]朱铮涛,黎绍发.基于机器视觉的零件表面粗糙度测量,现代制造工程,2002(8):46-47.
- [35]孙晓军.线阵CCD在圆柱体表面检测系统中的应用[J],光学技术.2000,26(1):29 -31.
- [36]罗振壁,唐晓红,江劲松等.机器视觉在尺寸在线检测中的应用[J],机械工程学报1994,030(006):47-52.
- [37]孙学珠,付维乔等.高精度CCD尺寸自动检测系统的光学系统设计[J],光学技术,1995,9(5):4-6.
- [38]赵彦玲,王鹏. Shape of cutting chip monitoring system based on LabVIEW, SPIE国际会议论文集,2004,163-167.
- [39]梁占,蒋式勤,沈立纬.视觉检测系统及其应用,微计算机信息,2003,19(12):44-49.
- [40]吴平川,路同浚.机器视觉与钢板表面缺陷的无损检测,2000,22(1):13-17.



## 发表论文情况说明

论文发表情况:

[1]李俊, 张宝峰. 测量用 24 相彩色 LED 光源设计和研究, 已被天津理工大学学报录用, 近期内发表.

[2]LiJun,Hakiem.Hsu, ZhangBaoFeng. Investigation of a 24-Phase Colour LED Lighting Source,ISPMM2006,已被 SPIE 出版.

## 致谢

首先要感谢我的导师张宝峰、许智钦教授，他们为我创造了良好舒适的实验室条件和严谨求实、锐意进取的学术氛围，并提供了与同行专家进行学术交流、参加实际项目的机会。在我攻读硕士学位两年半的时间中，导师为我指导正确的学习和工作方法，并在生活上给与我很大的支持和帮助。导师渊博的知识，宽广的胸怀和严谨的治学态度，使我终生受益。在此谨向我的导师表达我深深地谢意。同时在完成论文过程中，李军老师不辞辛苦做了细致的校正工作，并提出了许多中肯的意见，在此向李军老师表示我的深深谢意。

同时我要感谢我实验室的同学薛鹏、李泳、徐晓明、季秀远、黄吉涛，在不同项目间的探讨中使我开拓了视野，丰富了知识，收获颇丰。

最后我要感谢我的家人，从小到大没有他们的全力支持，我是无法完成学业的，我要感谢他们对我默默无闻的支持、鼓励和帮助。

在即将走出校园迈入社会之际，我再一次衷心的感谢所有关心和帮助过我的老师、同学和朋友们！

李俊  
2006 年 12 月