

Machine Vision Review Reference 1-7

Machine Vision Review Reference 1-7

第二课 机器视觉系统设计流程

任务说明文档 (Specification of the task)

任务及优势 (Task and Benefits)

工件描述 (Parts)

工件呈现方式 (Part presentation)

执行要求 (Performance requirements)

信息接口 (Information interface)

安装空间 (Installation Space)

环境 (Environment)

系统设计方案 (Design of the system)

相机类型 (Camera Type)

线阵 (Line scan)

面阵 (Area scan)

智能相机 (Smart camera)

视野 (Field of View)

★分辨率 (Resolution) ★

相机、图像采集卡和硬件平台的选择

镜头设计 (Lens Design)

焦距:

镜头边缘焦距 (Lens flange focal distance)

镜头直径和传感器型号

光源选择 (Choice of illumination)

机械设计 (Mechanical Design)

Electrical design

软件设计 (Software design)

软件库 (Software library)

软件结构 (Software structure)

成本计算 (Calculation of costs)

开发成本 (Development costs)

操作成本 (Operating costs)

系统开发和安装 (Development & installation of the system)

例子 参见作业二

第四课 镜头 (Lens)

针孔摄像机 (Pinhole camera)

高斯光学 (Gaussian optics)

折射 (Refractory)

厚透镜模型 (Thick lens model)

术语表 (Glossary of Terms for Lens)

图像质量 (Image Quality)

镜头分辨率 (Resolution)

测量方法

对比度 (Contrast)

对比度和分辨率的联系

调制传递函数 (MTF)

景深 (Depth of Field)

F#和孔径D

测量方法

畸变 (Distortion)

测量方法

畸变类型

透视误差 (Perspective error)

远心镜头 (Telecentric lens)

镜头曲线 (Lens curves)

第五课 光照 (Lighting)

视觉光照发展史

视觉光源 (Vision light source)

立体角 (Solid Angle)

Measuring LED light power

光通量 (Flux)

发光强度 (Intensity)

照度 (illumination)

亮度 (Luminance)

制造对比度

光照基础 (Lighting cornerstones)

基础照明技巧 (Basic Lighting Techniques)

亮场照明 (Bright Field)

暗场照明 (Dark Field)

亮场 vs. 暗场

垂直照明 (Vertical lighting)

背光照明 (Backlighting)

多角度照明 (Multi-angle Lighting)

积分球照明 (Diffuse Dome)

同轴照明 (On-axis Diffuse)

同轴平行照明 (On-axis Parallel Diffuse)

平面散射光 (Flat Diffuse)

光源选型原则

条光选型

环光选型

背光源选型

同轴光选型

同轴平行光选型

颜色和波长

光源选型实例★

第六课 软件 (Software)

模板匹配分类

第七课 算法1

基本数据结构

模拟图像

数字图像

二值图像

面积

投影

图像增强

行程编码

连通域 (connected components)

邻域

元素标定 (寻找连通域) ★

面积滤波 (Size Filter)

欧拉数

区域边缘 (region boundary)

距离测量 (Distance measure)

亚像素级边缘

灰度值变换 (Gray Value Transformations)

辐射度标定 (Radiometric Calibration)

图像平滑 (Image Smoothing)

时域平均 (Temporal averaging)

中值滤波

滤波器的边缘效应 (Border Treatment)

时间复杂度 (Time complexity)

第二课 机器视觉系统设计流程

- 五大要素：相机，镜头，光源，图像处理软件，通信工具

任务说明文档 (Specification of the task)

任务及优势 (Task and Benefits)

涵盖

- 系统的要求 (requirements)
- 采取的执行措施 (operation)
- 系统产生的结果 (results)

e.g. 检测的对象是什么？做什么检测？

任务可以被归类，从而生成一个简短的系统名字。（如：电池极芯位置检测系统）

工件描述 (Parts)

对被检测工件的精确描述以及充足的样本是必须给出的。包括

- discrete parts or endless material (i.e. paper or woven goods)
- 最大或最小尺寸
- 形状的变化
- 要提取的特征的描述
- 由正常差异或者错误、缺陷引起的特征变化
- 表面完整度
- 颜色
- 干扰：腐蚀、油渍、粘合剂等等
- 由于“手持工件”导致的变化：标签、指纹等

工件呈现方式 (Part presentation)

- 运动方式和位置容忍度 (Part motion& positioning tolerance)
 - 走走停停式 (Indexed Positioning) : 要给出工件停留的时间，这影响着图像获取的时间消耗。
 - 连续移动式 (Continuous Positioning) : 工件运动的速度、加速度是重要参数。
- 工件数目

如果视野内工件多于一个，则必须给出如下描述

- 视野内工件数目 (可考虑用面积判断数目)
- 重叠部分
- 接触部分

工件无法完整可视对于 基于边缘的算法 影响很大。

执行要求 (Performance requirements)

- 精度 (Accuracy) : 用户提出, 影响要求的分辨率
- 时间表现 (Time performance) : 因为视觉系统仅仅是产品链的一环, 视觉的任务必须在规定时间内完成。相应的处理时间影响着硬件平台的选择且最终会限制一些算法的可能应用。
 - 循环时间 (Cycle time) : 一次完整循环所需时间 (不是定值, 有波动)
 - 图像获取开始时刻
 - 最长图像处理时间
 - 从检测到出结果的所需的 **循环次数**

信息接口 (Information interface)

安装空间 (Installation Space)

- 指物理的三维空间 (设备所占体积)
- 工件到镜头的最小和最大距离
- 电源线、数据线长度

环境 (Environment)

- 环境光----影响成像
- 设备需要避免接触的灰尘
- 可能影响设备的撞击或震动
- Heat or Cold
- 必要的保护装置
- 可获取的能源供应设备

系统设计方案 (Design of the system)

At this point, the information about the task, the parts, and the miscellaneous topics is available.

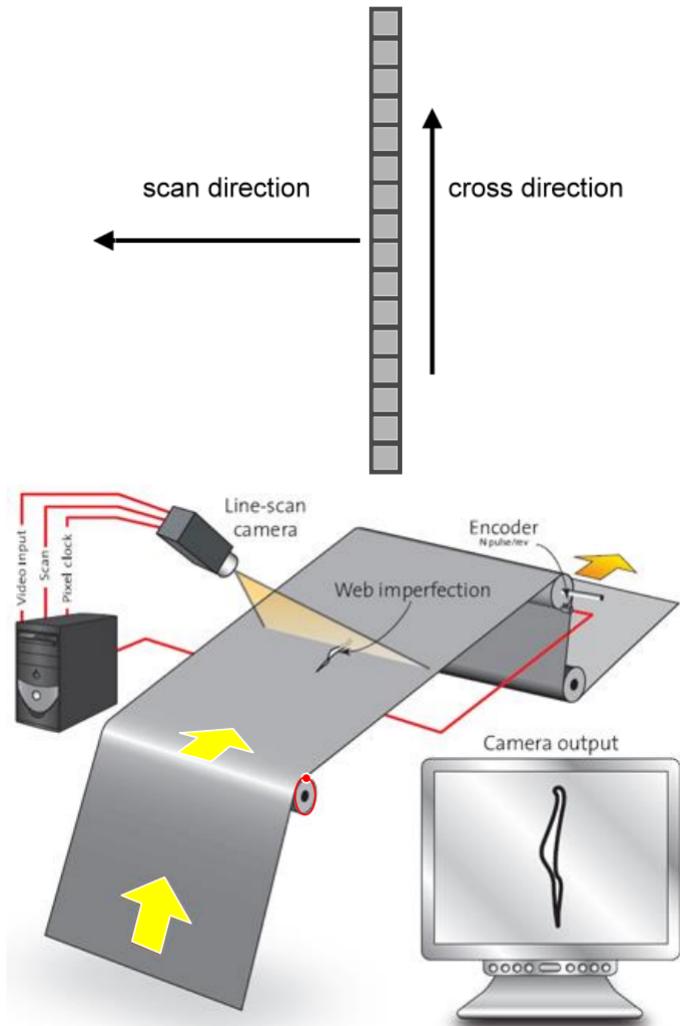
On this basis the project can be designed.

相机类型 (Camera Type)

线阵 (Line scan)

<https://www.youtube.com/watch?v=ktSqmV6xF3A> 讲解视频

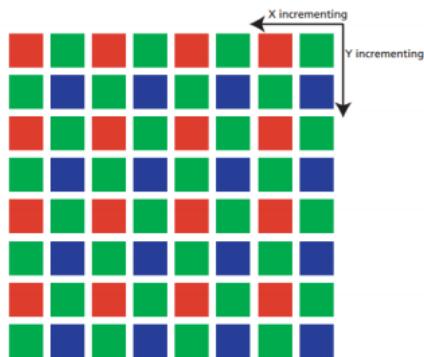
- (两种运动方向) 在扫描方向和其垂直方向都有更高的分辨率
- 要求传送带运动方向与line camera本体垂直, to avoid distortion
- 高填充因子: 像素光敏感区域与整个靶面之比 (通常100%)
- 图像不易变形、扭曲
- 通常需要较强的照明
- 图像处理较为困难 (因为在运动) ; 更短的整合时间



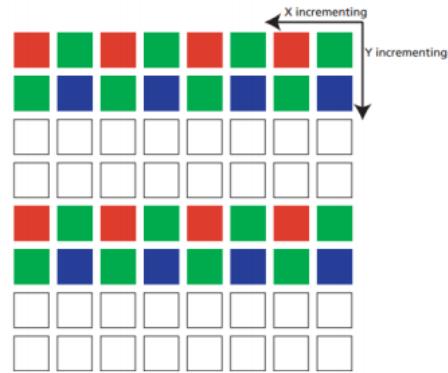
面阵 (Area scan)

- 影响着硬件选择以及图像获取的效果。
- 固定的纵横比（常为4 : 3）
- 图像处理更简单，更长的可能整合时间（Longer integration time possible），节约带宽
- 可以通过仅仅读取感兴趣的区域来提高 帧率
- **skipping:行跳或列跳**: 通过选取视野中的像素点，抽取指定像素点来降低分辨率

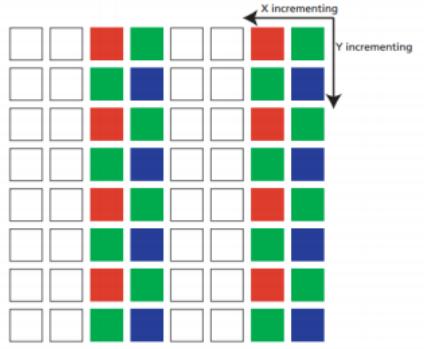
Pixel Readout (no skipping)



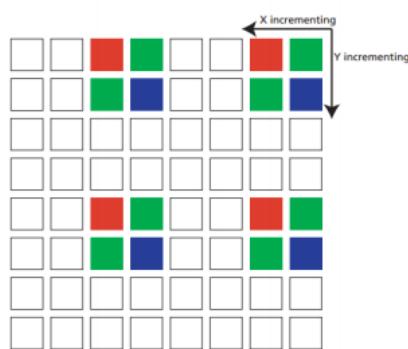
Pixel Readout (Row Skip 2X)



Pixel Readout (Column Skip 2X)



Pixel Readout (Column Skip 2X, Row Skip 2X)

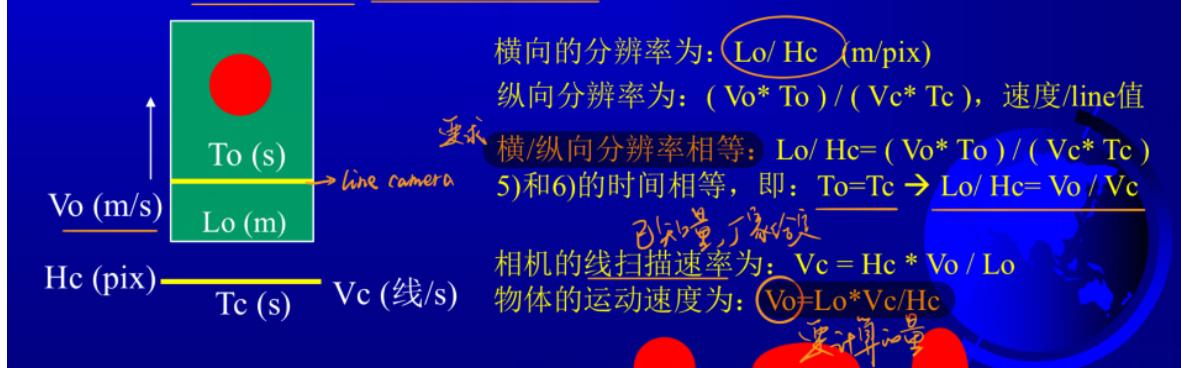
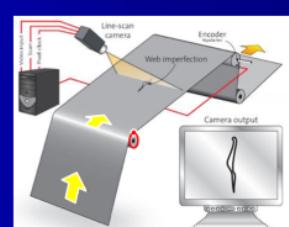


- Binning:** 将相邻像元（相同颜色）的感应电荷加在一起，以一个像素的模式读出。在环境光低的情况下，提高摄像头表现力。需要配合skipping一起使用。
- 可以是三个CCD：分别用于RGB三种颜色，有很好的图像质量
也可以是单个CCD，拜尔模式（Bayer pattern）：是CCD（charge coupled device）或者CMOS器件作为光传感器的时候，采集数字图像时用到的一种常见的方法。
- 无颜色插值（No color interpolation）：pixel to pixel

Line Scan Camera

- 要保证采集到的图像不被拉伸或者压缩，必须遵从一点，即“横向和纵向的分辨率相等”

- 1) 线阵相机的每线像素数（单位：pixel）：Hc
- 2) 目标物的宽幅（单位：m）：Lo
- 3) 目标物运行速度（单位：m/s）：Vo
- 4) 线阵相机线扫描速度（单位：Hz，即线/s）：Vc
- 5) 扫描一帧图像目标物运行的时间（单位：s）：To
- 6) 扫描一帧图像线阵相机的扫描时间（单位：s）：Tc



智能相机（Smart camera）

智能相机并不是一台简单的相机，而是一种高度集成化的微小型机器视觉系统。它将**图像的采集、处理与通信功能集成于单一相机内**，从而提供了具有多功能、模块化、高可靠性、易于实现的机器视觉解决方案。同时，由于应用了最新的DSP、FPGA及大容量存储技术，其智能化程度不断提高，可满足多种机器视觉的应用需求。

智能相机一般由图像采集单元、图像处理单元、图像处理软件、网络通信装置等构成，各部分的功能如下：

1. 图像采集单元：在智能相机中，图像采集单元相当于普通意义上的CCD/CMOS相机和图像采集卡。它将光学图像转换为模拟/数字图像，并输出至图像处理单元。
2. 图像处理单元：图像处理单元类似于图像采集、处理卡。它可对图像采集单元的图像数据进行实时的存储，并在图像处理软件的支持下进行图像处理。
3. 图像处理软件：图像处理软件主要在图像处理单元硬件环境的支持下，完成图像处理功能。如几何边缘的提取、Blob、灰度直方图、OCV/OVR、简单的定位和搜索等。在智能相机中，以上算法都封装成固定的模块，用户可直接应用而无需编程。
4. 网络通信装置：网络通信装置的智能相机的重要组成部分，主要完成控制信息、图像数据的通信任务。智能相机一般均内置以太网通信装置，并支持多种标准网络和总线协议，从而使多台智能相机构成更大的机器视觉系统。

视野 (Field of View)

The field of view is determined by the following factors:

- Maximum part size (1) **最大件尺寸**
- Maximum variation of part presentation in translation and orientation (2)
- Margin as an offset to part size (4) **边缘容差**
- Aspect ratio of the camera sensor (5)

屏幕高宽比

保证工件能被拍到

FOV = maximum part size + tolerance in positioning + margin + adaption to the aspect ratio of the camera sensor (1)

(1)

★分辨率 (Resolution) ★

- 相机分辨率 (Camera resolution) : 传感器上像素总数: $\text{row} \times \text{column}$ (单位: pixel)
i.e. 640x480, 1024x768

相机分辨率越高，像素数目越多，细节越多；但导致像素尺寸变小，信噪比降低；且更贵。

选择满足应用需求的最低分辨率

- 空间分辨率 (Spatial resolution) : 一个像素的大小 (实际尺寸) (单位: mm/pixel)
- 测量精度 (Measurement accuracy) : 描述能被测量的**最小特征尺寸**

计算公式：

– Resolution:

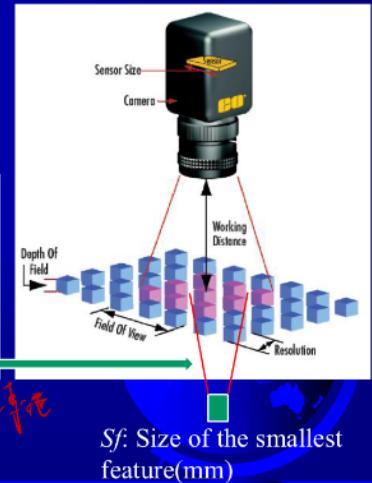
- Calculation of Resolution

Therefore, the size of the smallest feature that has to be inspected and the number of pixels to map this feature are crucial. Evaluate the necessary spatial resolution as follows:

$$R_s = \frac{FOV}{R_c} \quad R_c = \frac{FOV}{R_s} \quad (2)$$

| Name | Variable | Unit |
|--|----------|----------|
| Camera resolution | R_c | pixel |
| Spatial resolution | R_s | mm/pixel |
| Field of view | FOV | mm |
| Size of the smallest feature | S_f | mm |
| Number of pixels to map the smallest feature | N_f | pixel |

↓ $N_f = 1$ 用一个像素去映射最小特征尺寸



The necessary spatial resolution can be calculated as follows:

$$R_s = \frac{S_f}{N_f} \quad (3)$$

If the field of view is known, the camera resolution can be evaluated as

$$R_c = \frac{FOV}{R_s} = FOV \frac{N_f}{S_f} \quad (4)$$

This calculation has to be performed for both horizontal and vertical directions.

相机、图像采集卡和硬件平台的选择

At this point, the camera scan type and the required resolution are known so that an adequate camera model can be chosen.

- 像素速率 (Pixel rate)

This is the speed of imaging in terms of pixels per second. For an **area camera**, the pixel rate can be determined as

$$PR = R_{c_{\text{hor}}} \cdot R_{c_{\text{ver}}} \cdot fr + \text{overhead} \quad (2.8)$$

| Name | Variable | Unit |
|------------------------------|-------------------|---------|
| Pixel rate | PR | pixel/s |
| Camera resolution horizontal | Rc_{hor} | pixel |
| Camera resolution vertical | Rc_{ver} | pixel |
| Frame rate | fr | Hz |
| Camera resolution | Rc | pixel |
| Line frequency | fs | Hz |

An overhead of 10% to 20% should be considered due to additional bus transfer.

For a line scan camera, the calculation is similar:

$$PR = Rc \cdot fs + \text{overhead} \quad (2.9)$$

镜头设计 (Lens Design)

As the field of view and the camera resolution are known, the lens can be chosen.

焦距:

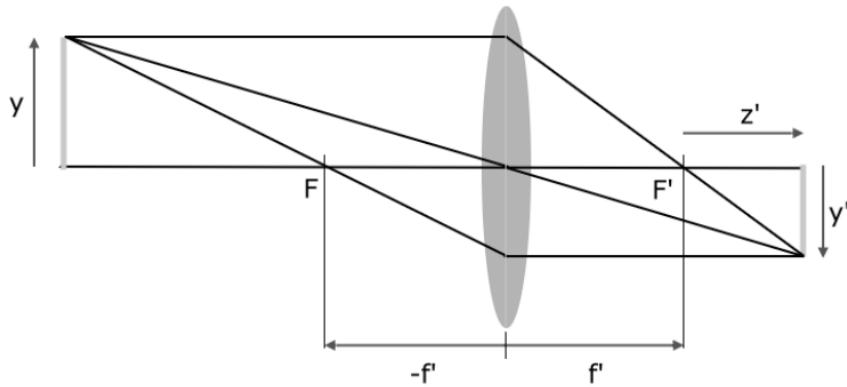


Fig. 2.4 Model of a thin lens.

物距
standoff distance $a < 0$ is a function of the 焦距 focal length $f' > 0$ and the distance $a' > 0$ between the lens and the image sensor (4.20):
像距

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{a'} - \frac{1}{a} \quad (2.10)$$

The 放大倍数 magnification β is determined by (4.23)

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a}. \quad (2.11)$$

Considering that the field of view is mapped to the size of the image sensor, the magnification can also be evaluated by

$$\beta = -\frac{\text{sensor size}}{\text{FOV}}. \quad (2.12)$$

So

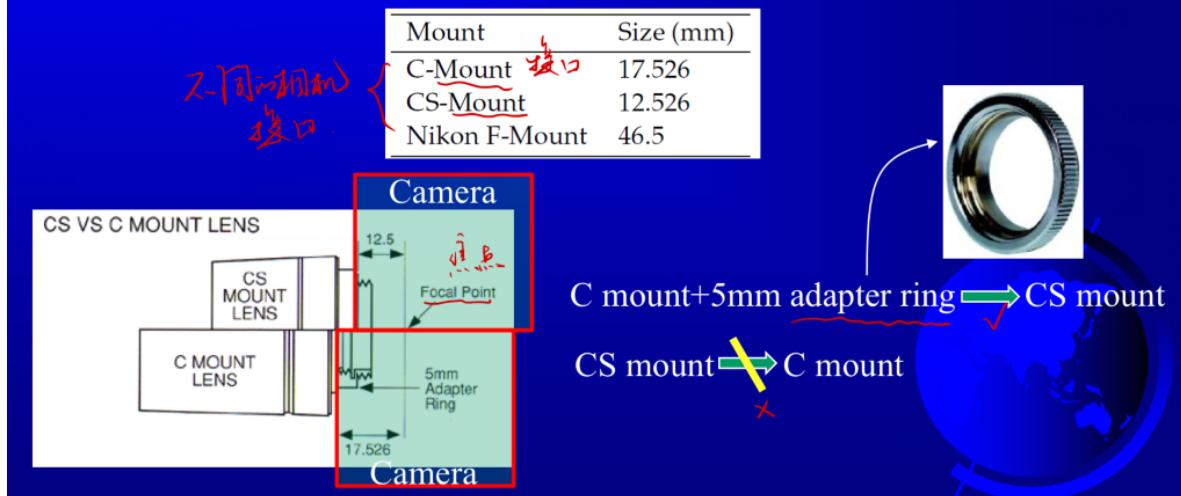
$$f' = a \cdot \frac{\beta}{1 - \beta} \quad (2.13)$$

镜头边缘焦距 (Lens flange focal distance)

— Lens Design:

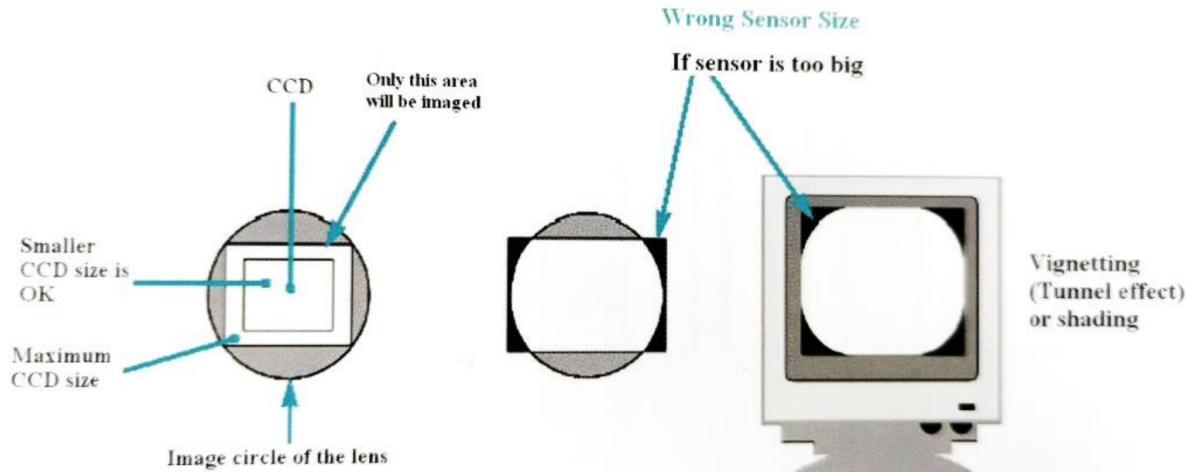
- Lens Flange Focal Distance

This is the distance between the lens mount face and the focal point. There are standardized dimensions; the most common are as follows:



镜头直径和传感器型号

传感器（矩形）尺寸有多种，分类为 $1/3''$, $1/2''$, $2/3''$, $1''$ ，这个尺寸并非传感器的精确尺寸，而是传感器外接圆（Lens）的直径。



光源选择 (Choice of illumination)

- 最大化对比度，提高信噪比 (SNR: Signal Noise Ratio)
- 恰当地选择光源可以降低软件处理的复杂度

机械设计 (Mechanical Design)

As the cameras, lenses, standoff distances, and illumination devices are determined, the mechanical conditions can be defined.

在确定了摄像机，镜头，支座距离和照明设备后，可以确定机械条件。至于摄像机的安装并调节照明对于安装，操作和维护很重要。必须保护设备免受振动或冲击。在某些情况下，可能需要机械去耦。摄像机和灯光的位置应轻松更改。但是，在对齐操作后操作者不得移动设备。一个简单的定位可以通过设置可以分开调整关键自由度来实现。如果必须将相机采用不同的支撑距离，则线性平台可能比更换镜头焦距更容易处理。

Electrical design

- 确定电源供应

- 如果需要保护装置，那么相机和光源的遮盖应充足。
- 电缆长度、拜访方式、最小允许弯曲半径。

软件设计 (Software design)

两个步骤

- 选择合适的软件库 (Software library)
- 基于应用的软件的设计和实现

通常情况下，并非所有软件功能都由开发者自己写代码实现，软件库和软件包可以为使用者提供许多图像处理算法。

软件库 (Software library)

- 考虑功能
- 必须与硬件、操作系统兼容
- 软件包应当是可直接配置的 (configurable)，无需编程就可实现一种功能。这些软件包通常与硬件绑定的。

软件结构 (Software structure)

软件工作流程

- 图像获取
- 预处理
- 特征定位
- 特征提取
- 特征解读
- 导出结果
- 处理干扰

成本计算 (Calculation of costs)

分类：初始开发成本 & 操作成本

开发成本 (Development costs)

- project management
- base design
- hardware components
- software licenses
- software development
- installation
- test runs, feasibility tests, and acceptance test
- training
- documentation

操作成本 (Operating costs)

- 维护费用，比如清洁光学仪器
- 设备更换费用，比如更换照明灯炮
- utility，例如可能需要的压缩空气、电源
- 由于产品变化导致的系统修改费用

系统开发和安装 (Development & installation of the system)

项目实现的基本流程

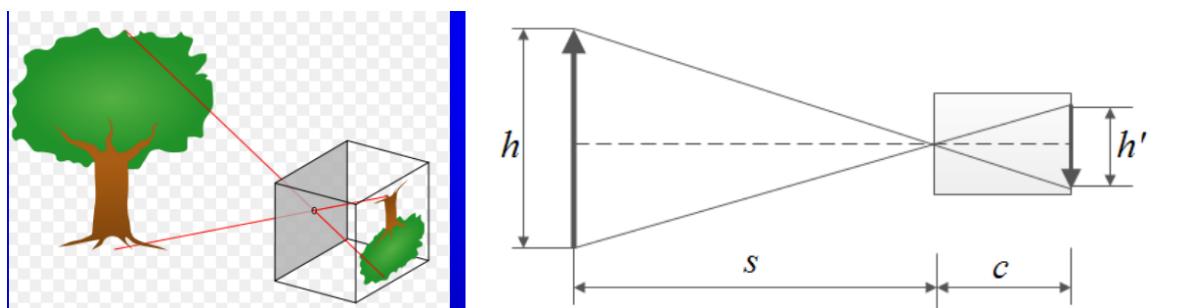
- 明确 (要求) specification
- 设计 design
- 购买软硬件 purchase of hardware and software
- 开发 development
- 安装 installation：分为两部分，第一部分着重于组件的设置；第二部分着重于系统仪器的设置。
- 测试运行 test runs：软件被反复测试直到满足要求。
- 接受度测试 acceptance test
- 训练及文档 Training and documentation

例子 参见作业二

第四课 镜头 (Lens)

镜头是一种光学设备，用于聚集光线在摄像机内部成像。

针孔摄像机 (Pinhole camera)



针孔摄像机相当于一个方盒子，针孔为投影中心，像平面上所成的像为物体的倒像。

$$h' = \frac{C}{S} h \quad (1)$$

C 被称作摄像机常数或主距 (Principal distance)。

高斯光学 (Gaussian optics)

折射 (Refractory)

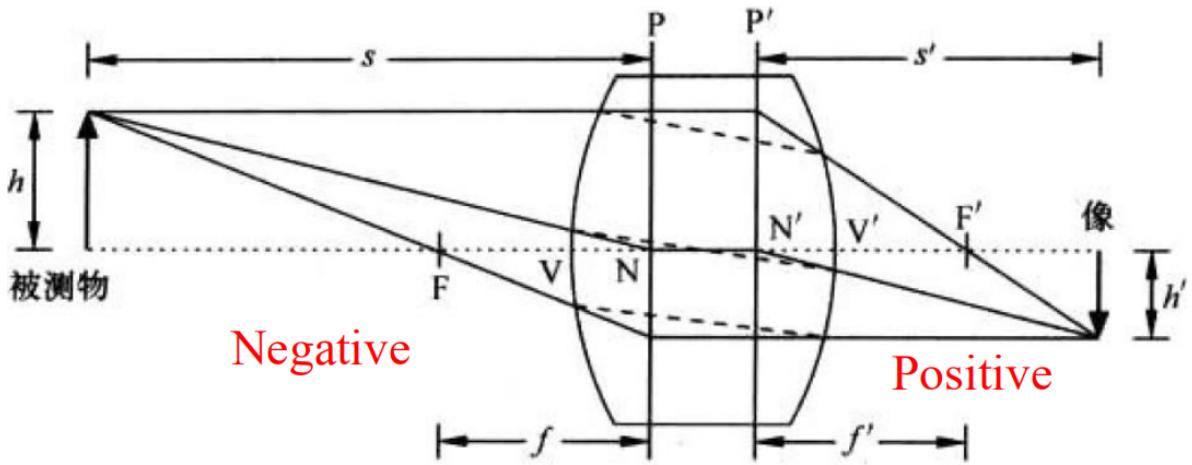
折射定律

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2 \quad (2)$$

当入射角，出射角均很小时，可以用近轴近似 (paraxial approximation)，得到

$$n_1 \alpha_1 = n_2 \alpha_2 \quad (3)$$

厚透镜模型 (Thick lens model)



| 焦点 | F, F' |
|------------------------------|---------|
| 主平面 (可由一侧平行光与另一侧过焦点的光线相交而得到) | P, P' |
| 焦距 | f, f' |
| 物距/像距 | s, s' |
| 顶点 | V, V' |
| 节点 | N, N' |

正负号：光线由左向右射入，在镜头前的距离均为负。

厚透镜成像法则：

1. 镜头前平行于光轴的光线过 F'
2. 过 F 的光线通过镜头后平行于光轴
3. 过 N 的光线也会过 N' 点，并且通过镜头前和通过镜头后与光轴夹角不变。

由上图可知，像的尺寸完全取决于 F, F', N, N' ，故这四个点成为镜头的主要元素 (Cardinal elements)

Gaussian Optics

Thick Lens 凸透鏡の厚さを考慮する

$\frac{h'}{s'} = \frac{h}{s} = \tan \alpha$
 Amplification $\beta = \frac{h'}{h} = \frac{s'}{s}$ 焦点距離と像距離の比
 Using $f = -f'$ give us Gauss' lens formula $\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$
 Copyright (c) Benny Thörnberg

Focal length f, f'
Focal point F, F'
Principle plane P, P'
Nodal point N, N'

$\frac{h'}{f} = \frac{h}{f-s} < 0$ ✓ (1)
 $\frac{h'}{f'-s'} = \frac{h}{f'-f} < 0$ ✓ (2)

Lens formula tells us where the image will be in focus
 $\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$

$\frac{f'-s'}{f} = \frac{f'}{f-s}$
 $\frac{s'-f'}{f'} = \frac{-f'}{s+f'}$
 $ss' - f'^2 - sf' + sf' = -f'^2$
 $ss' + sf' = sf' \Rightarrow \frac{1}{f'} + \frac{1}{s} = \frac{1}{f}$

- It tells us where the light rays will intersect, i.e., where the image will be in focus, if the object distance s is varied.

$$\tan \alpha = \frac{h'}{s'} = \frac{h}{s} \quad (4)$$

放大系数定义为

$$\beta = \frac{h'}{h} = \frac{s'}{s} \quad (5)$$

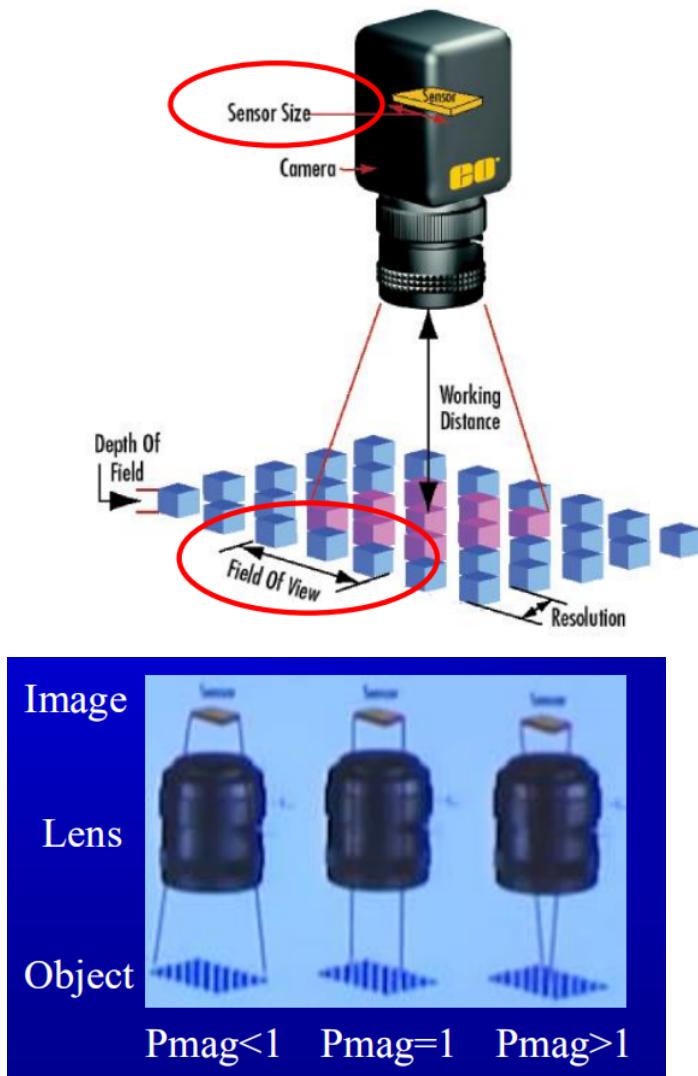
Gaussian lens law

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f'} \quad (6)$$

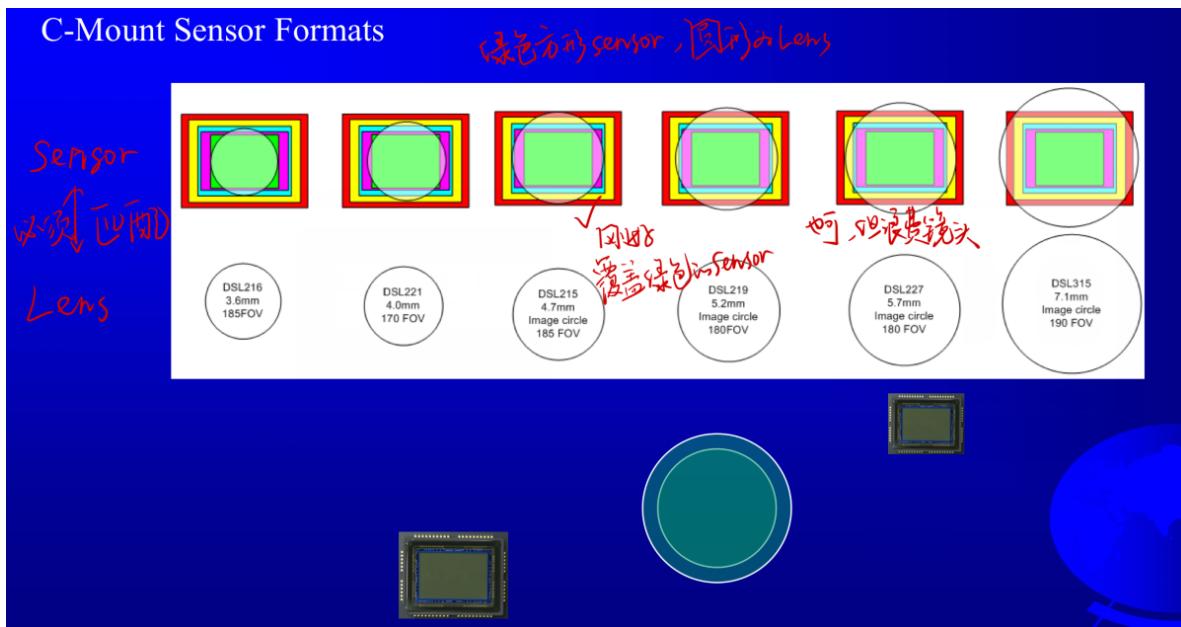
术语表 (Glossary of Terms for Lens)

- 视野 Field of View (FoV) : The viewable area of the object
- 工作距离 Working Distance (WD): The distance from the front of the lens to the object.
- 分辨率 Resolution: The minimum feature of the object
- 景深 Depth of Field (DOF): the maximum object depth that can be maintained entirely in focus.
- 传感器尺寸 (常为矩形) Sensor Size: The size of a camera sensor's active area, typically specified in the horizontal dimension.
- 主要放大率 Primary Magnification (Pmag): The **ratio** between the sensor size and the FoV.

$$Pmag = \frac{\text{Image sensor}}{FoV} \quad (7)$$



- 镜头接口: C-mount sensor format (别的还有CS-mount)



图像质量 (Image Quality)

镜头分辨率 (Resolution)

镜头分辨率决定了成像系统重现物体细节的能力 (Resolution is a measurement of the imaging system's ability to reproduce object detail)

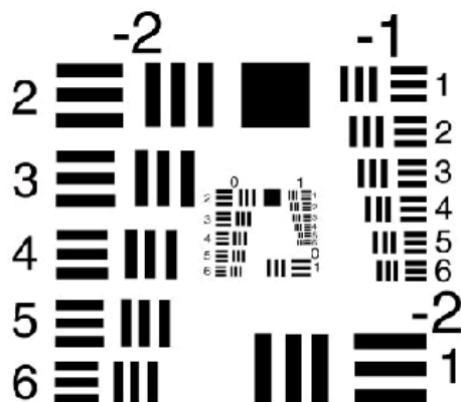
镜头分辨率过低，镜头无法解析图像特征

主要决定于sensor size, 也受对比度影响



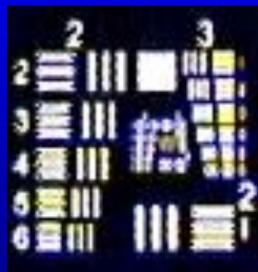
测量方法

通过对一个特定目标成像，找到极限分辨率；通常用 bar target (如下图)

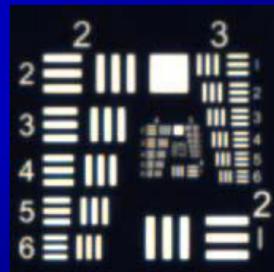


Resolution comparison with same lens and different Camera

- The images below of the same magnification, using the same lens and identical lighting conditions. The image on the left created with a high resolution color analog camera, while the image on the right is created with a high resolution color digital camera.



High-resolution color analog camera



High-resolution color digital camera

对比度 (Contrast)

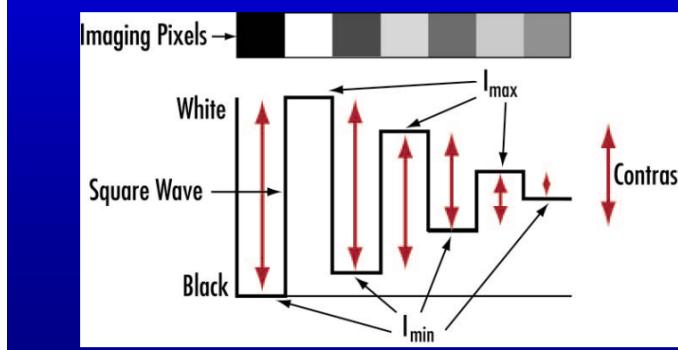
仅仅在单色图像中讨论 (若为RGB, 则三个通道分开计算)

低对比度会影响最终的分辨率, 也会对图像处理、阈值分割造成困难。

- Contrast describes the separation between blacks and whites.

$$\%Contrast = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$$

- Reproducing object contrast is as important as reproducing object resolution. For an image to appear well defined black details need to appear black and white details appear white.



The greater the difference in intensity between black and white line, the better the contrast.

对比度和分辨率的联系

- 分辨率是在特定的对比度下测定的
- 通常的用于测定CCD成像系统分辨率的极限对比度为 10% – 20%, 再小就无法分辨
- 对于人眼, 通常在1% – 2%的对比度下来测定对比度。

调制传递函数 (MTF)

空间域的频率如何影响对比度?

Modulation Transfer Function

$$F_{MTF} = (g_1 - g_2)/255 \quad (8)$$

g_1, g_2 分别是拍摄得到的最大灰度值和最小灰度值。

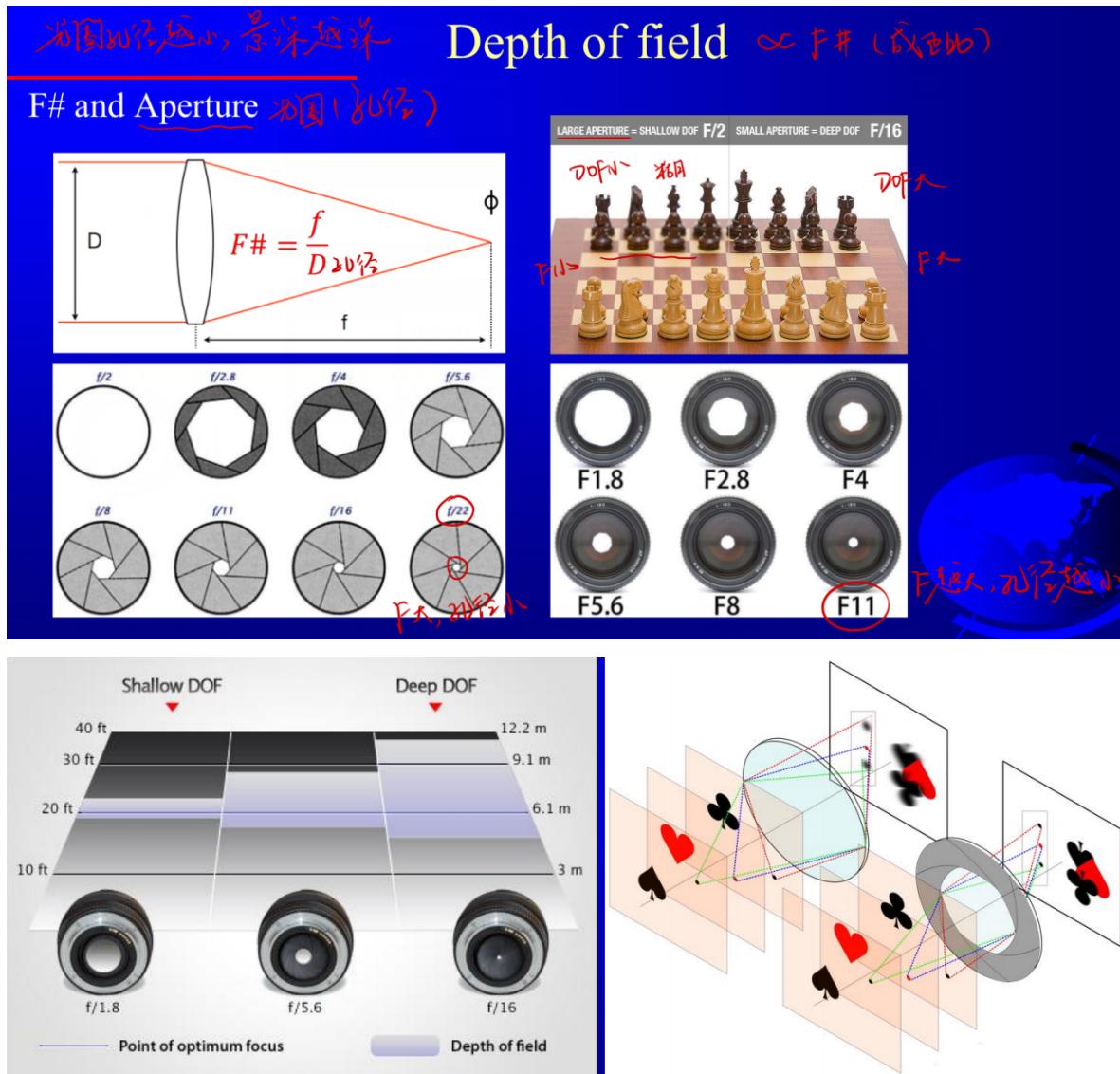
影响因素:

- target 的每毫米线对数目 (lp/mm) (空间域频率) 越大, F_{MTF} 越小
- 线对的方向: 矢状线、子午线

景深 (Depth of Field)

描述一个镜头 在多深的范围可以清晰成像。

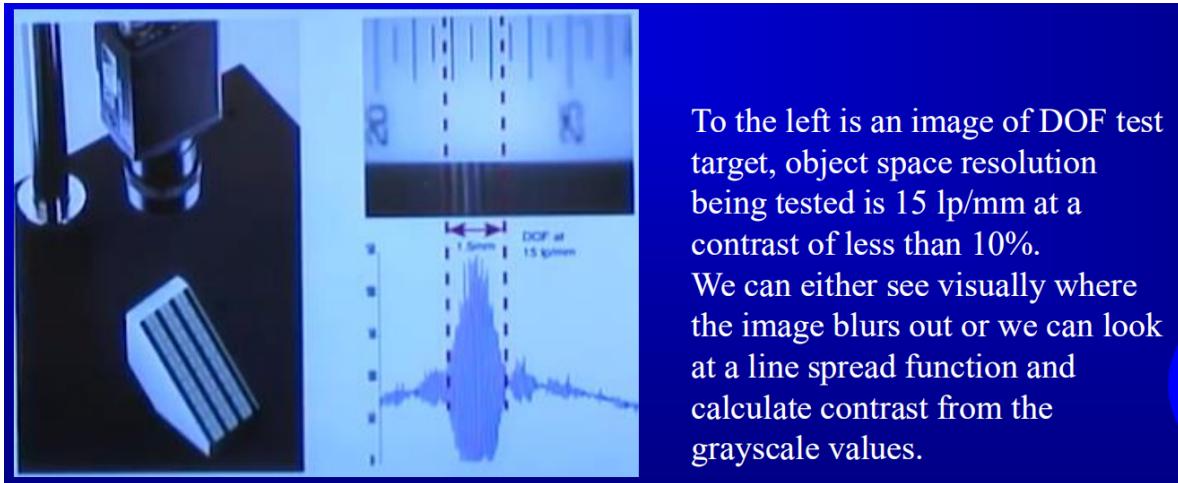
F#和孔径D



结论：景深正比于 $F\#$, 反比于孔径D。孔径越小，景深越大。

测量方法

用一个等腰三角形的立体尖劈，上面有均匀的线对，镜头俯拍，在某一范围内清晰其余区域模糊，则可以得到景深。



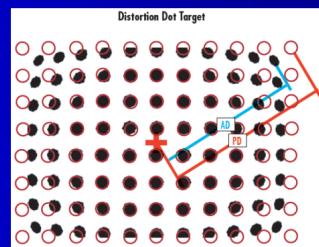
To the left is an image of DOF test target, object space resolution being tested is 15 lp/mm at a contrast of less than 10%. We can either see visually where the image blurs out or we can look at a line spread function and calculate contrast from the grayscale values.

畸变 (Distortion)

测量方法

How is Distortion Measured?

$$\% \text{ Distortion} = \frac{(AD - PD)100}{PD}$$

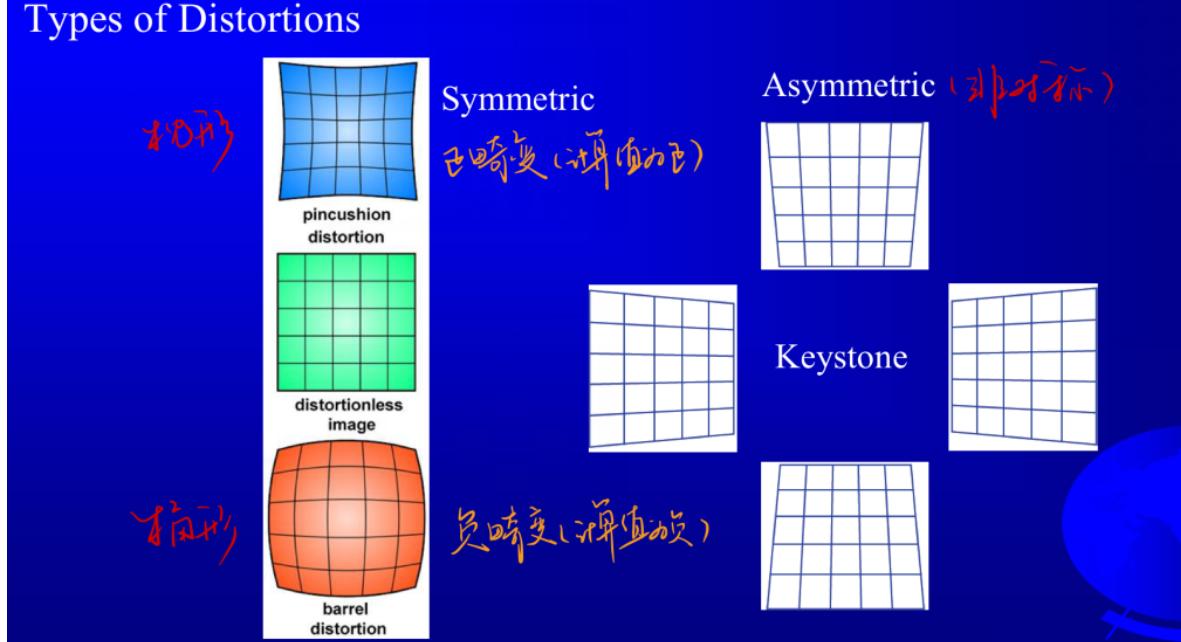


- Above is an example of negative distortion
- AD is actual distance that an image point is from center of the field. 实际有畸变
- PD is the predicted distance that an image point would be from the center of the field if no distortion were present. 无畸变的理想位置

- 用边缘算出的畸变值 % 用于定义最大畸变值
- 畸变存在于各式镜头中，受焦距影响
- 短焦镜头的畸变难以矫正，故能选长焦镜头时，**绝不选短焦镜头**

畸变类型

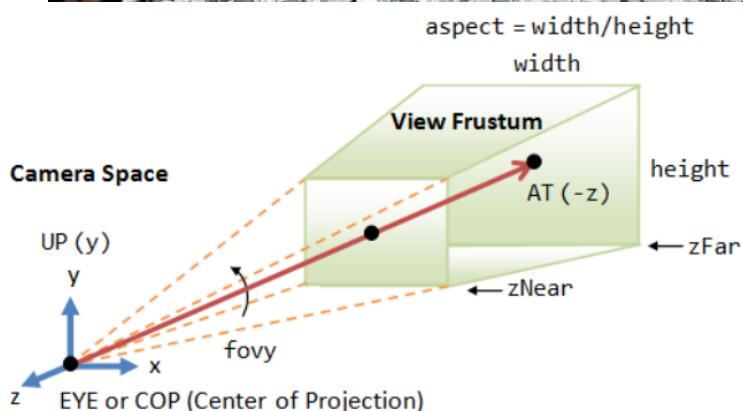
Types of Distortions



可以用算法来矫正畸变，因为没有信息丢失，仅仅有信息错位。

透视误差 (Perspective error)

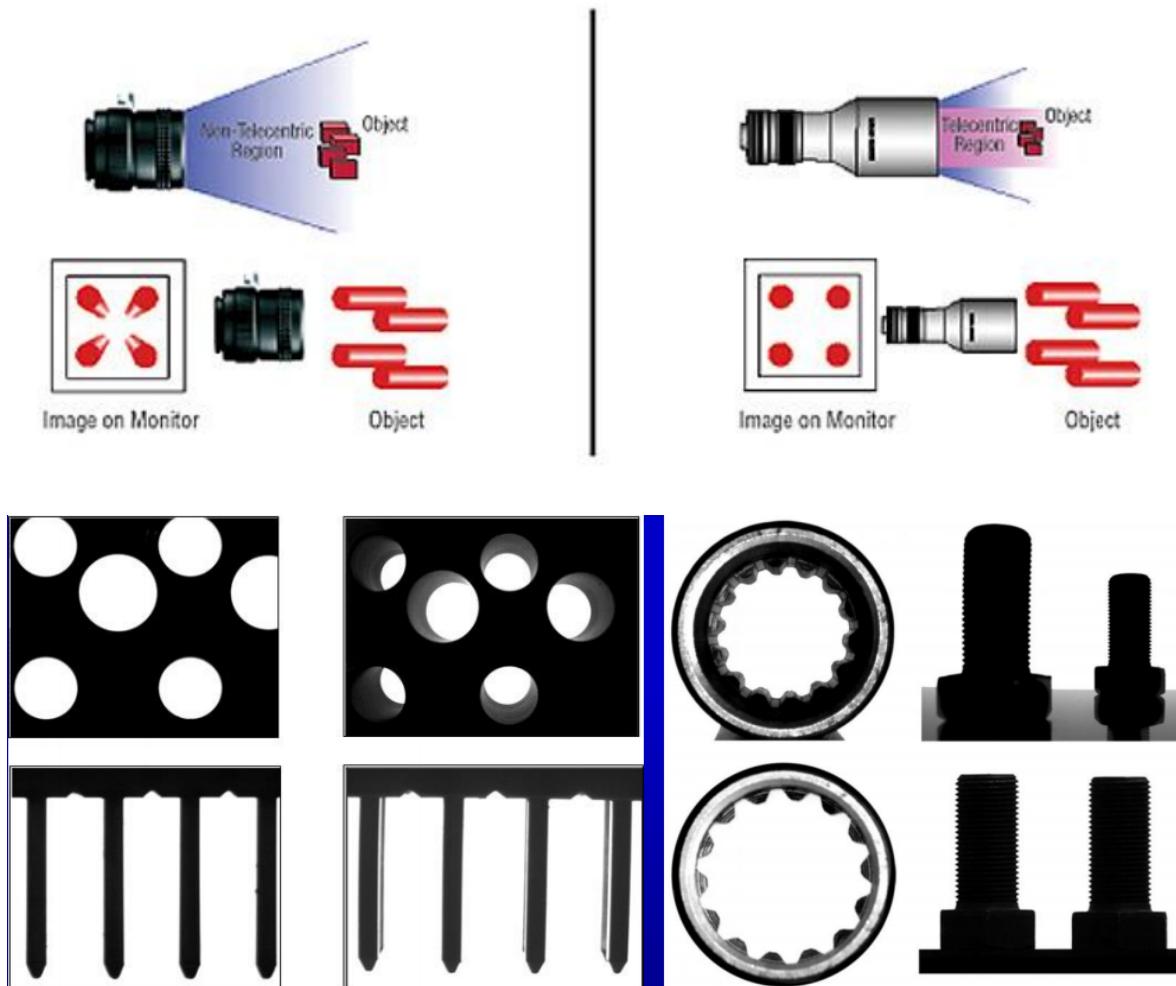
- 透视误差是由于工作距离变化导致的放大倍率的变化（普通镜头，工作距离增大，放大倍数减小）
- 这是我们用眼睛感知距离的方式
- 远处的物体看起来会比近处的小一点
- 尽管有利于感知距离，但是对于测量却造成了麻烦
- 远心镜头很好地解决了透视误差



Perspective Projection: The camera's view frustum is specified via 4 view parameters: fovy, aspect, zNear and zFar.

远心镜头 (Telecentric lens)

平行光束；放大倍数不随距离改变，为常数。



远心镜头的限制

- 视野 (FoV) 由前端镜头的直径限制
- 主光束为平行光限制了远心区域比镜头直径更小
- 远心镜头不可以通过调整工作距离来改变FoV

镜头曲线 (Lens curves)

第五课 光照 (Lighting)

视觉光照发展史

科学与艺术的融合

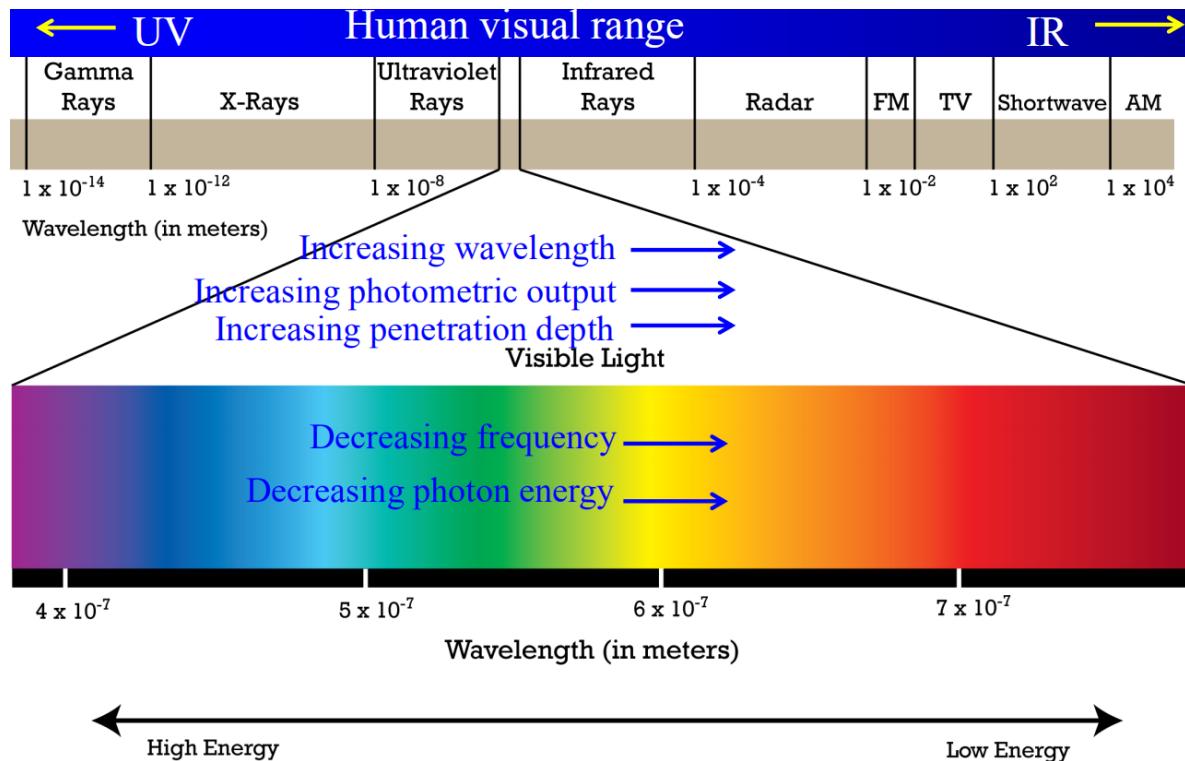
找到合适光照的方法

- wave and look (试验法) 最为常用
尝试在不同的位置使用不同的光源来照明，拍摄物体比较效果
- 科学分析 (最高效)
分析拍摄环境并初步得出最优的可能解决方案 (满足一致性鲁棒性) 。
- 检验光照 (省时间)

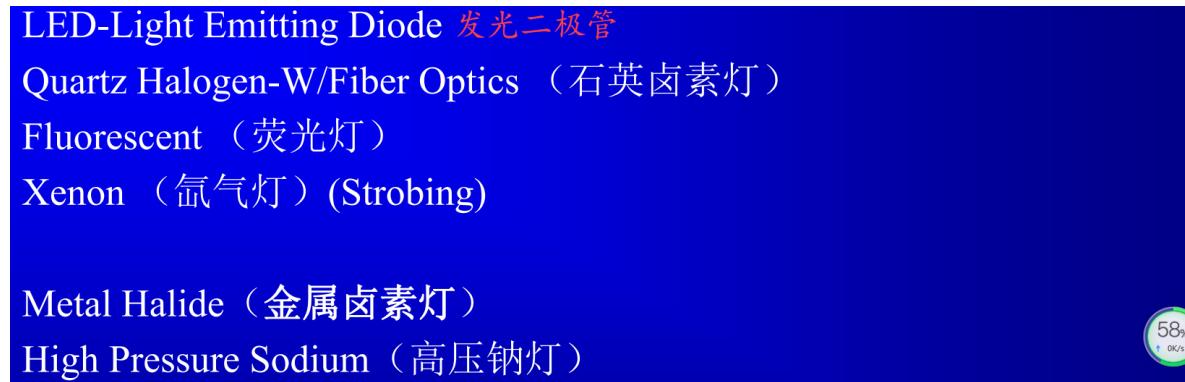
在试验台上试验来验证你的分析。

按照应用要求而量身选择的光照类型和技术，可以使得一个视觉系统精确、可重复地(reproducibly)完成任务。

视觉光源 (Vision light source)



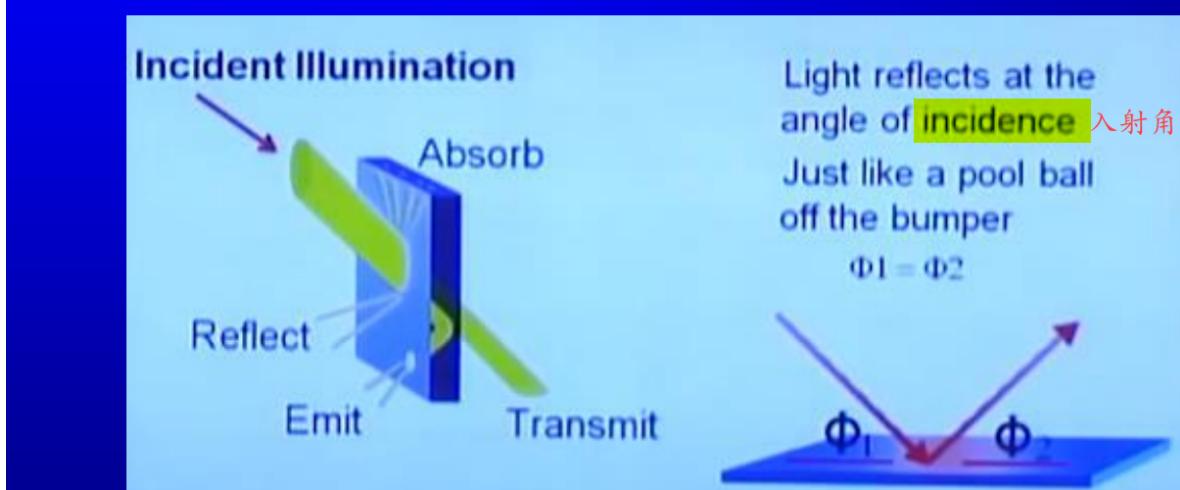
UV: ultraviolet; IR: infrared; photometric output: 光度输出



| 类型 | 光效(lm/W) | 平均寿命/(h) | 色温/K | 特点 |
|------|----------|-----------|------------|--------------------------|
| 卤素灯 | 12~24 | 1000 | 2800~3000 | 发热量大，价格便宜，形体小 |
| 荧光灯 | 50~120 | 1500~3000 | 3000~6000 | 价格便宜，适用于大面积照射 |
| LED灯 | 110~250 | 100000 | 全系列 | 功耗低，发热小，使用寿命长，价格便宜，使用范围广 |
| 氙灯 | 150~330 | 1000 | 5500~12000 | 光照强度高，可连续快速点亮 |
| 激光 | | 50000 | 全系列 | 具有良好的方向性、单色性与相干性 |

– Total Light in = Reflected+Absorbed+Transmitted Light

$$\text{总光照} = \text{反射光} + \text{吸收光} + \text{透射光}$$



立体角 (Solid Angle)

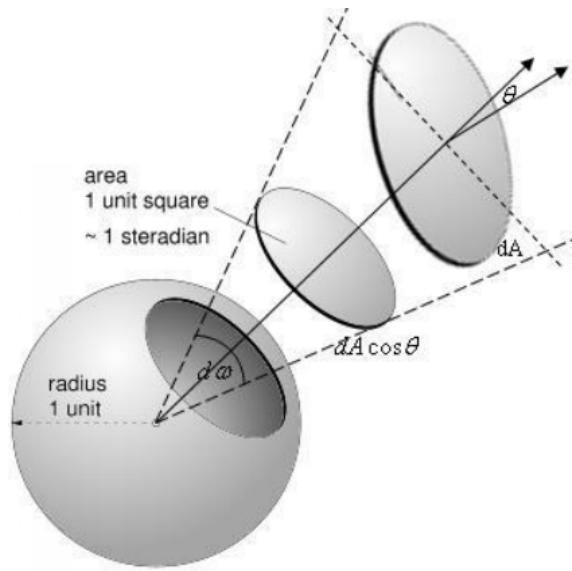
常用字母 Ω 表示，是一个物体对特定点的三维空间的角度，是平面角在三维空间中的类比。它描述的是站在某一点的观察者测量到的物体大小的尺度。例如，对于一个特定的观察点，一个在该观察点附近的小物体有可能和一个远处的大物体有着相同的立体角。

以观测点为球心，构造一个单位球面；任意物体投影到该单位球面上的投影面积，即为该物体相对于该观测点的立体角。

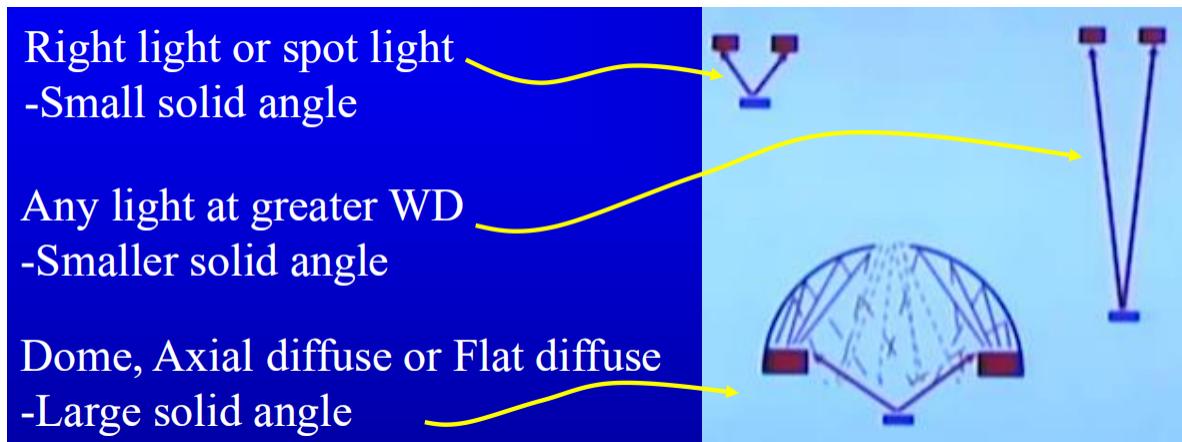
因此，立体角是单位球面上的一块面积，这和“平面角是单位圆上的一段弧长”类似。

对于无限小的单位球面面积 dA ，立体角

$$d\Omega = \frac{d(A \cos \theta)}{r^2} = \frac{dA}{r^2} \quad (9)$$



立体角与光源几何外形的关系：



拱形、轴向散射灯、平面散射灯有较大的立体角。

Measuring LED light power

光通量 (Flux)

光通量 Φ :光源在单位时间内发出的光量，也即为辐射通量（辐射功率）能够被视觉系统所感受的那部分能量。

单位：Im (流明)

40W日光灯输出的光通量大约为2100lm

发光强度 (Intensity)

光源在给定方向的单位立体角中发射的光通量。

$$I = d\Phi/d\Omega \quad (10)$$

单位：cd (坎德拉) , 1cd=1lm/sr

太阳发光强度 ($2.8^{27} cd$) , 高亮手电 (10000cd)

照度 (illumination)

照度(E):表面上一点的照度是入射在包含该点面元上的光通量dΦ除以该面元面积ds之商。

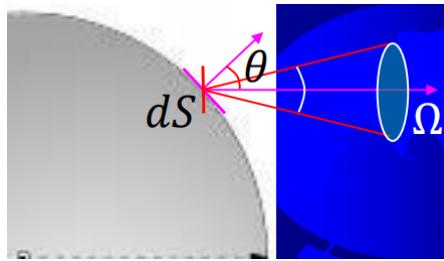
$$E = d\Phi/dS \quad (11)$$

- 单位：lx (勒克斯) 1lx=1lm/m²

亮度 (Luminance)

光源体在某一方向上每单位投影面积上所发出的光强。

$$L = \frac{d\Phi}{cos\theta dS d\Omega} \quad (12)$$



- 单位: nit (尼特) 或者cd/m²

- 常见发光体的亮度 (尼特)

太阳表面2,000,000,000, 白炽灯丝10,000,000

眼睛习惯的亮度3000

满月下的白纸亮度0.07

制造对比度

- 对感兴趣的特征 (Signal) , 制造最大对比度
- 对不感兴趣的特征 (Noise) , 制造最小对比度
- **增强鲁棒性:** 对于正常的差异使灵敏度最小
 - 不重要的部位变化
 - 环境光的变化
 - 样本的处理和呈现方式的差异

光照基础 (Lighting cornerstones)

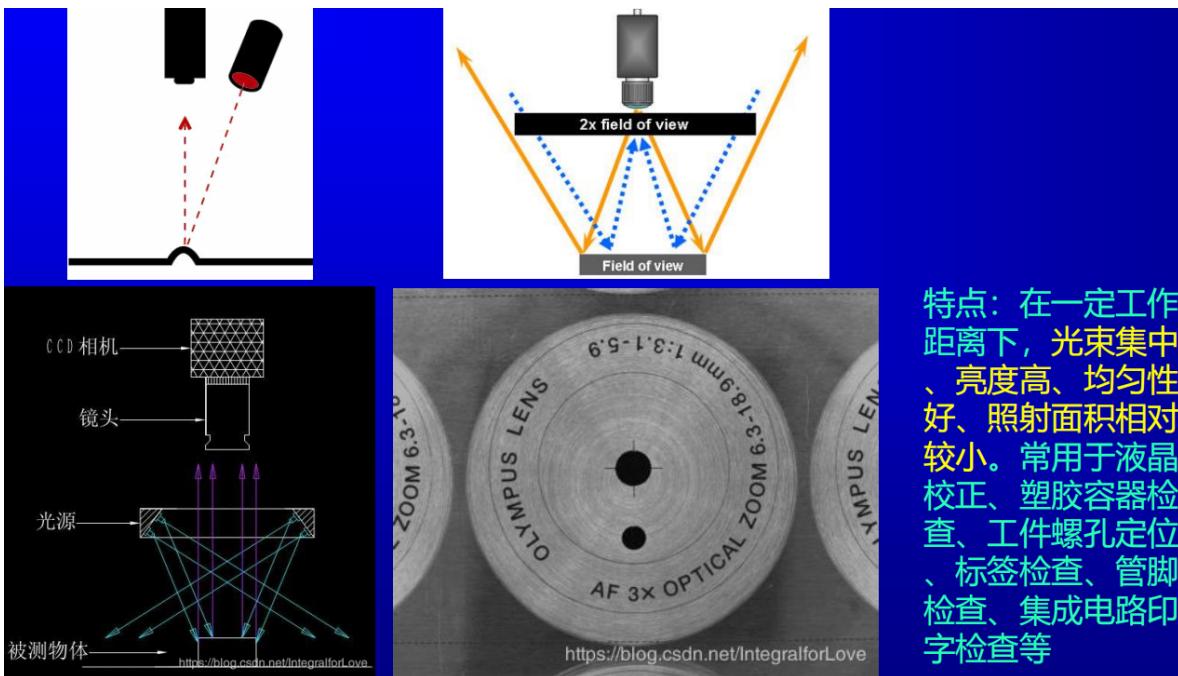
如何改变对比度?

- 依据样本和相机的位置改变光照的**方向、位置**: 改变反射
- 改变光照模式
 - 光源类型: Spot, Line, Dome, Sheet.
 - 打光类型: Bright field, Dark field, Diffuse, Back lighting.
- 改变光谱 (颜色/波长) : 单色光/白光, 暖色/冷色
- 改变光的特征 (**滤光**) : 影响波长

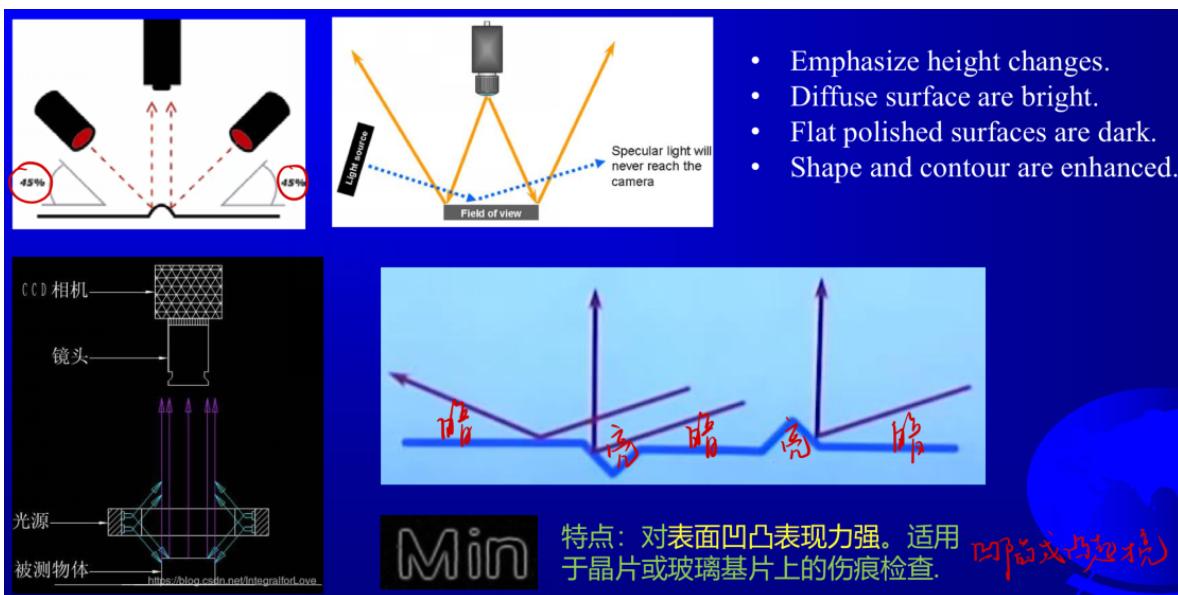
基础照明技巧 (Basic Lighting Techniques)

亮场照明 (Bright Field)

适合对平整光滑的表面进行照明。



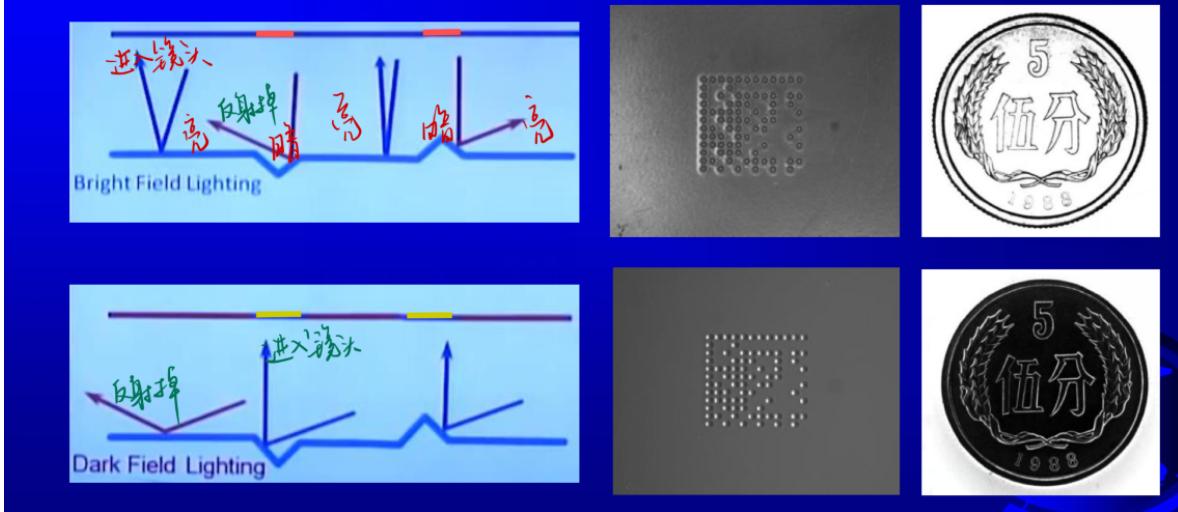
暗场照明 (Dark Field)



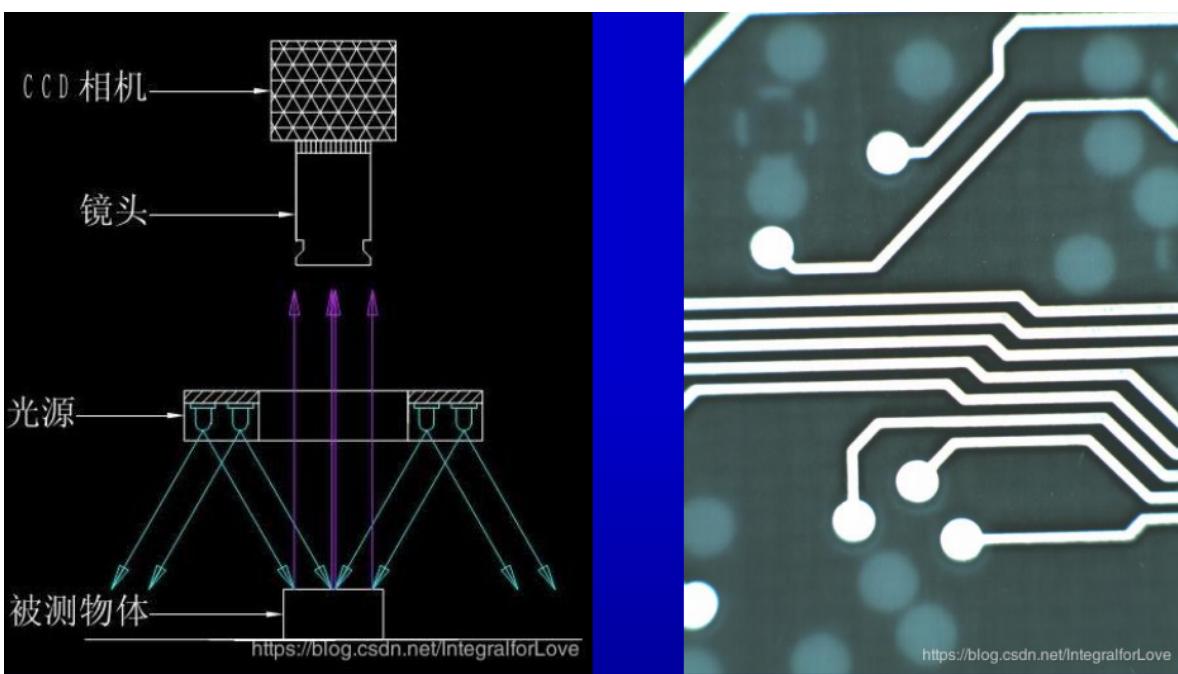
- 入射光线与水平面夹角为45°或更少
- 用于反射力强的表面（不光滑）
- 应用：光学字符识别（OCR）或表面缺陷检测

亮场 vs. 暗场

Bright Field vs. Dark Field (灯光的强度不同)



垂直照明 (Vertical lighting)

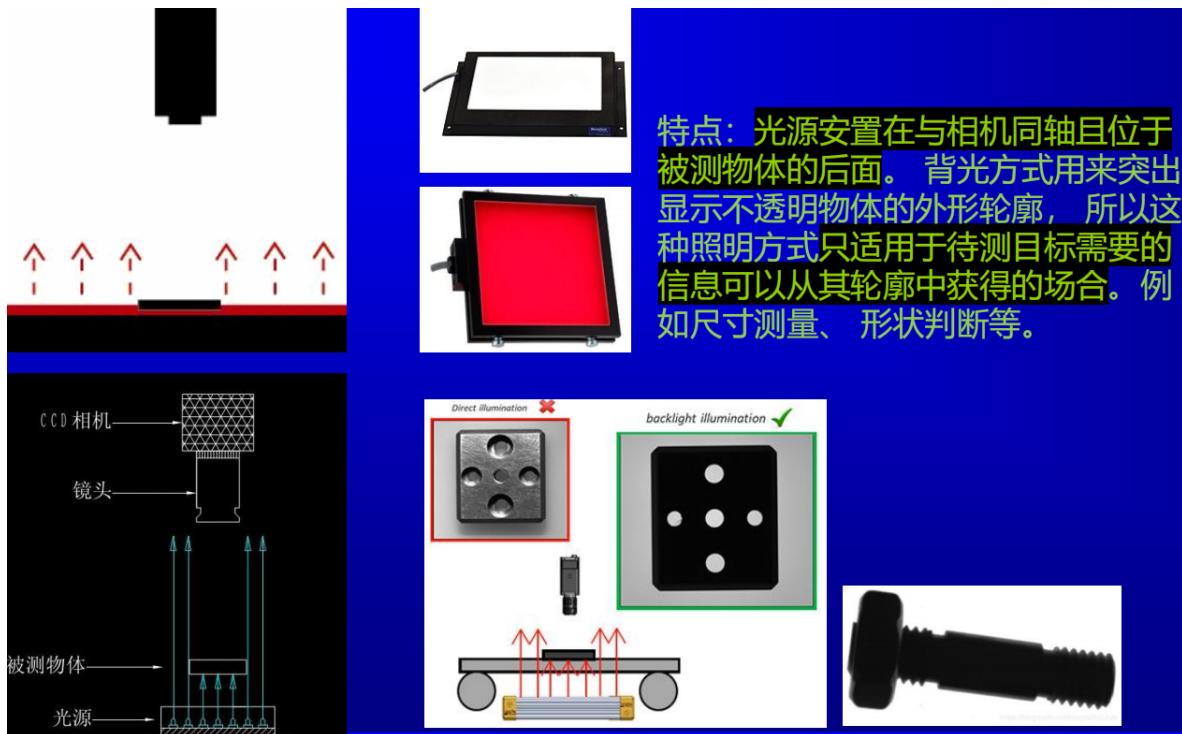
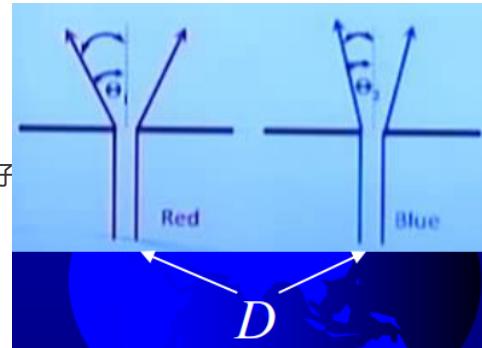


特点：照射面积大、光照均匀性好、适用于较大面积照明。可用于基底和线路板定位、晶片部件检查等。

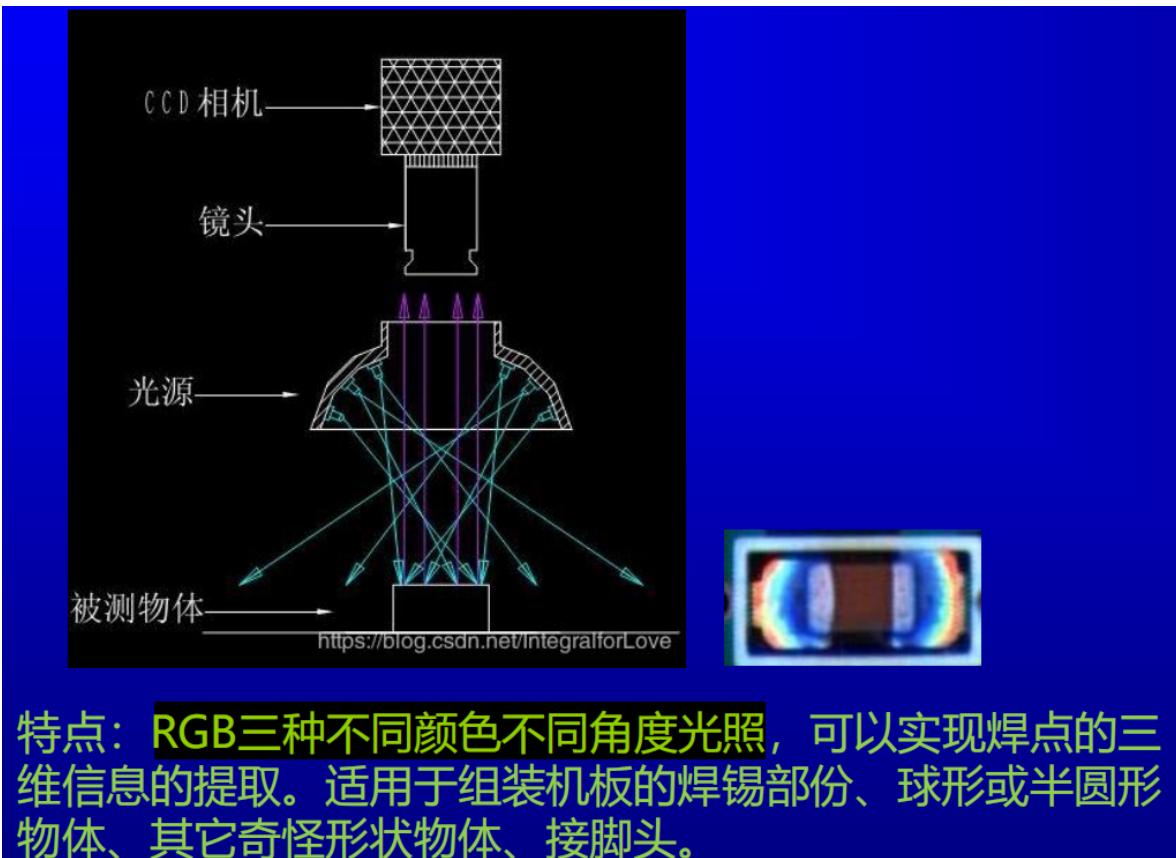
背光照明 (Backlighting)

- 尽量选择短波光源、准直平行光来做高精度的测量
- 对半透明的材料很有效（检测液位、玻璃或塑料的裂缝）
- 用于检测边缘或孔洞

- 光线从孔洞穿过, $\theta = \frac{\lambda}{D}$, θ 越小越好



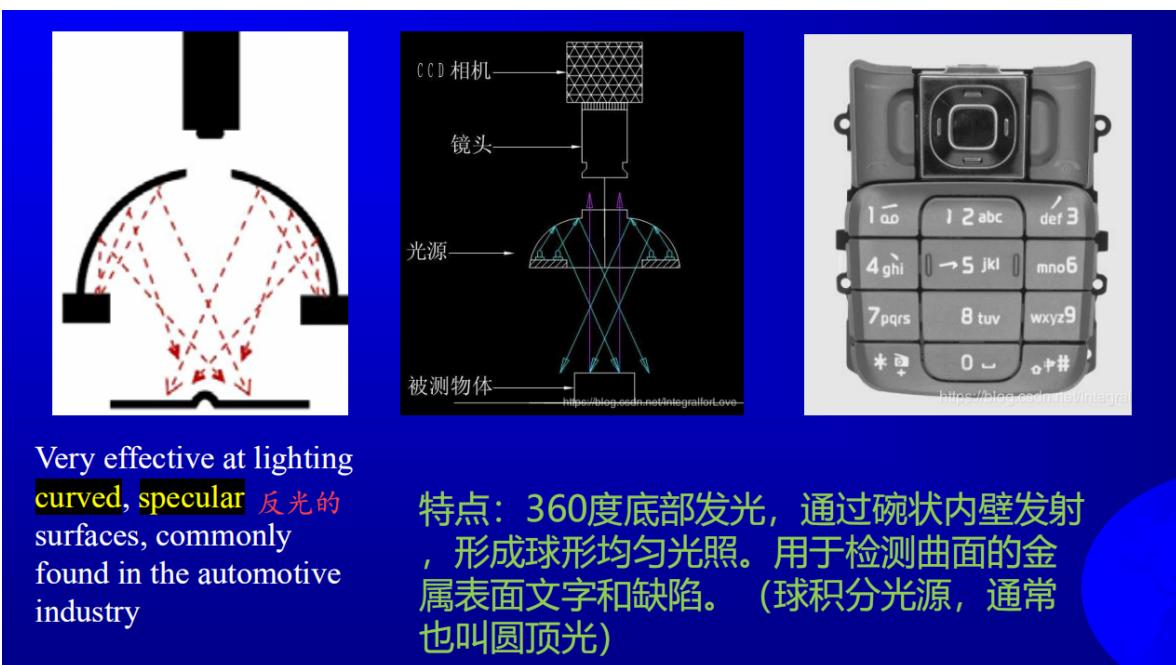
多角度照明 (Multi-angle Lighting)



特点：RGB三种不同颜色不同角度光照，可以实现焊点的三维信息的提取。适用于组装机板的焊锡部份、球形或半圆形物体、其它奇怪形状物体、接脚头。

积分球照明 (Diffuse Dome)

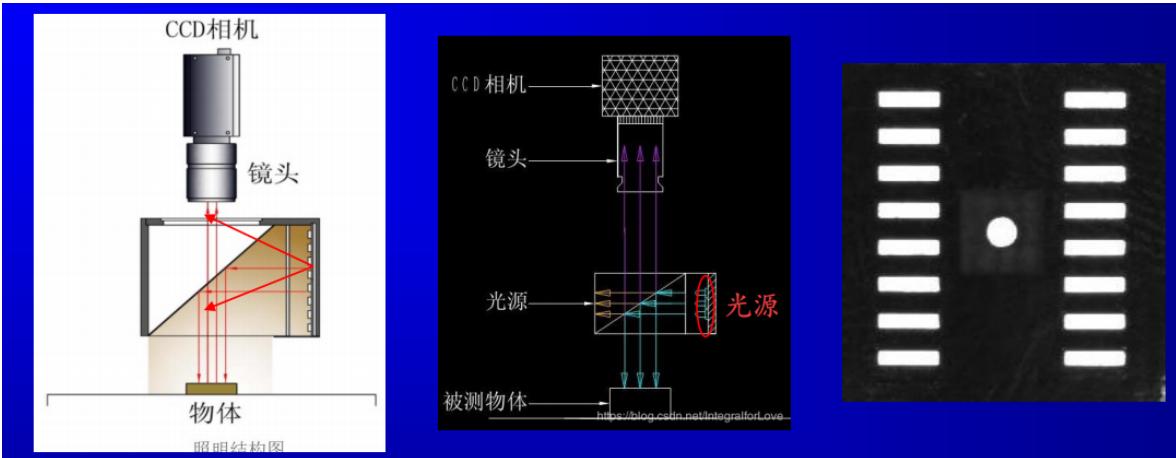
- 积分球照明的光照与阴天的光照很相似
- 最少的刺眼光束
- 不强调表面纹理和细节
- 不强调对比度
- 与暗场照明有相反的效果（不突出凹凸部位）



Very effective at lighting curved, specular 反光的 surfaces, commonly found in the automotive industry

特点：360度底部发光，通过碗状内壁发射，形成球形均匀光照。用于检测曲面的金属表面文字和缺陷。（球积分光源，通常也叫圆顶光）

同轴照明 (On-axis Diffuse)

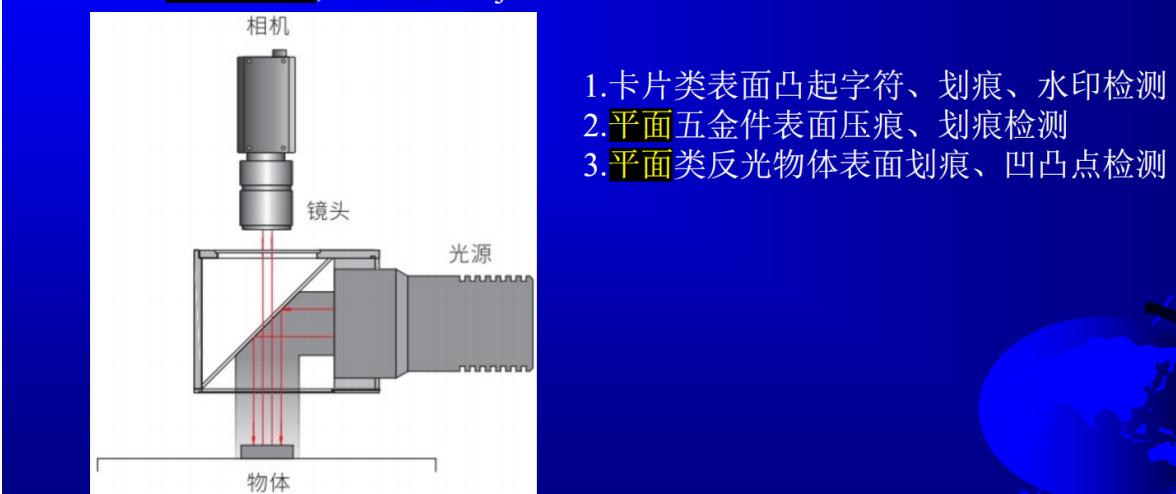


特点：类似于平行光的应用，光源前面带漫反射板，形成二次光源，光线主要趋于平行。用于半导体、PCB板、以及金属零件的表面成像检测，微小元件的外形、尺寸测量。

1. 高反光物体表面划痕等缺陷检测
2. Mark点定位，激光打标字符，二维码识别
3. 芯片和硅晶片的破损能检测
4. LED表面缺陷检测

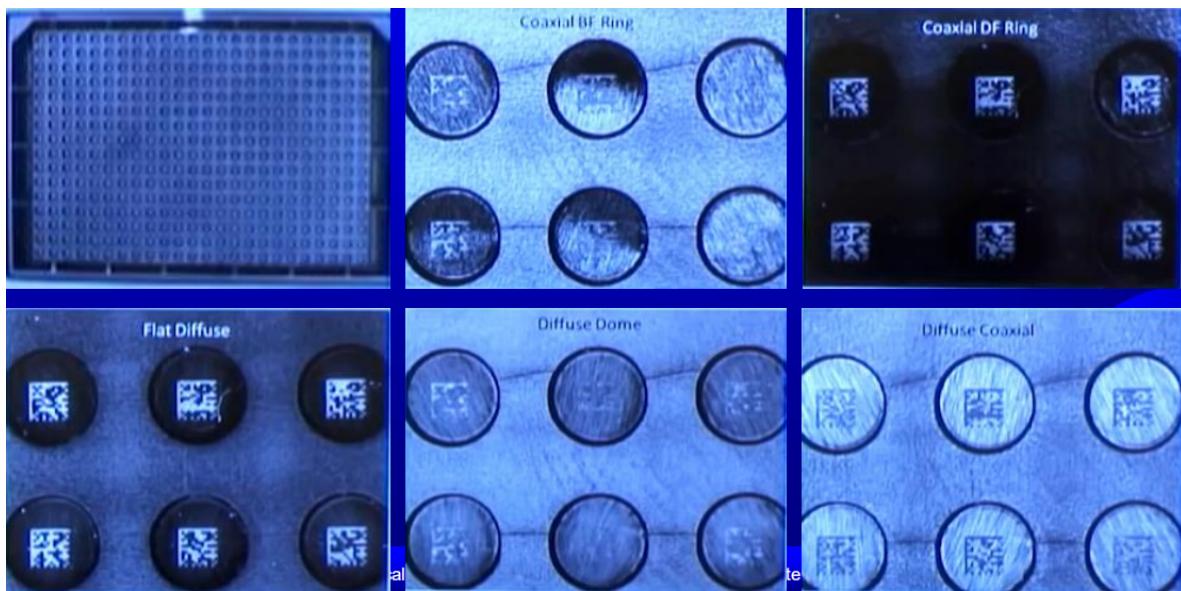
同轴平行照明 (On-axis Parallel Diffuse)

– Used on **non-curved**, reflective objects. 适用于平面、反射性物体



平面散射光 (Flat Diffuse)

- 更长的工作距离，更大的视野 (FoV)
- 混合散射光 (dome and coaxial)



光源选型原则

条光选型

条光选型：

- 1、**条光照射宽度最好大于检测的距离**，否则可能会照射距离远造成亮度差，或者是距离近而幅射面积不够
- 2、条光长度能够照明所需打亮的位置即可，无须太长造成安装不便，同时也增加成本,一般情况下，光源的安装高度会影响到所选用条光的长度，高度越高，光源长度要求越长，否则图像两侧亮度比中间暗
- 3、**如果照明目标是高反光物体，最好加上漫射板**，如果是黑色等暗色不反光产品，也可以拆掉漫射板以提高亮度

环光选型

环光选型：

- 1、了解光源安装距离，过滤掉某些角度光源；例如要求光源安装尺寸高，就可以过滤掉大角度光源，选择用小角度光源，同样，**安装高度越高，要求光源的直径越大**
- 2、**目标面积小，且主要特性在表面中间，可选择小尺寸0角度或小角度光源**
- 3、目标需要表现的特征如果在边缘，可选择90度角环光，或大尺寸高角度环形光
- 4、检测表面划伤，可选择90度角环光，尽量选择**波长短**的光源

背光源选型

- 1、选择背光源时，**根据物体的大小选择合适大小的背光源**，以免增加成本造成浪费
- 2、背光源四周由于的外壳遮挡，因此其亮度会低于中间部位，因此，选择背光源时，**尽量不要使目标正好位于背光源边缘**
- 3、背光源一般在**检测轮廓**时，可以尽量使用**波长短**的光源，**波长短的光源其衍射性弱**，图像边缘不容易产生重影，对比度更高；
- 4、背光源与目标之间的距离可以通过调整来达到最佳的效果，并非离得越近效果越好，也非越远越好；
- 5、检测液位可以将背光源侧立使用；

6、圆轴类的产品，螺旋状的产品尽量使用平行背光源；

同轴光选型

- 1、选择同轴光时主要看其**发光面积**，根据目标的大小来选择合适发光面积的同轴光；
- 2、**同轴光的发光面积最好比目标尺寸大1.5~2倍左右**,因为同轴光的光路设计是让光路通过一片45度半反半透镜改变,光源靠近灯板的地方会比远离灯板的亮度高,因此,尽量选择大一点的发光面避免光线左右不均匀;

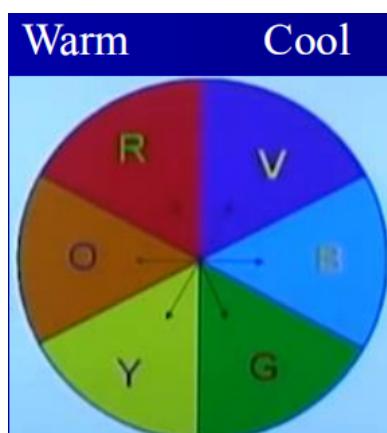
3、同轴光在安装时**尽量不要离目标太高**，越高，要求选用的同轴光越大，才能保证才均匀性

同轴平行光选型

- 1、平行同轴光光路设计独特，主要适用于检测各种划痕；
- 2、平行同轴光与同轴光表现的特点不一样，不能替代同轴光使用；
- 3、平行同轴光检测划伤之类的产品，尽量不要选择波长长的光源

颜色和波长

- 1、用单色光来制造对比度
- 2、用相似光或同系光来提亮：红光使得红色特征更亮
- 3、用反色光或反色光系来暗化：红光使得绿色特征更暗



光源选型实例★

酒瓶盖字符检测

- 检测的内容主要有字符识别、字符打标位置是否偏离



- 1、了解产品特性：瓶盖上面是黑色，另有红黑交错背景图案，字符为激光刻印显灰色，为了显现出条码，应该将字符打亮，背景与字符分辨明显；如果选用红色光源的话，背景中的红色会滤掉打白，会干扰同为白色的字符，所以，我们应该利用光源的互补原理，采用蓝色光源，将红色背景尽量打黑；



白色光源效果



蓝色光源效果



- 2、了解产品形状选择合适光源：瓶盖为圆形，直径为25MM，一般此情况可以选择同轴光或者环形光比较合适；
- 3、了解产品材质特性选择合适光源：瓶盖为金属材料，表面有印刷图案，比较光滑，反光度很强，选用同轴光或带角度的环形光比较合适；
- 4、模拟现场打光选择能用的光源：由于酒瓶必须装在包装纸箱里，瓶盖离纸箱上顶部的距离有80mm，考虑需要留一定的空间，因此，瓶盖离光源需要的距离为100mm或以上，如此高的距离，小同轴光跟小环光以及低角度光就不能满足要求，必须选用大同轴光跟大环光。
- 5、打光试验：根据以上情况选择大致的光源后，再进行性价比对比，选择性价比高的光源进行实际打光测试（同轴光如果提到110mm距离的话，需要用到120左右的光，单位价值比较高，所以选择环形光比较经济）。



- 6、最终确定光源：根据打光效果图进行软件处理，在得到可靠性及准确性的条件下选择正确的光源。



- 以上述案例可以看出：
- 1、产品的颜色影响光源的颜色；
- 2、产品的特性可以确定光源的照射方式，从而确定光源的类型；
- 3、产品的安装空间及相机、镜头、传感器的位置等障碍可以摒弃一些不方便安装的光源；
- 4、光源的安装高度影响光源的类型及大小；

第六课 软件 (Software)

Halcon介绍 ---- 见PPT

模板匹配分类

| 模板匹 配方法 | 利用特征 | 光照 变化 | 缩放 变化 | 混乱 无序 | 多通道 图像 | 纹理 图像 | 聚焦 模糊 |
|------------|----------------------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
| 基于灰 度 | 灰度值 | ✗ | ✗ | | ✗ | | ✗ |
| 基于形 状 | 边缘特征 | ✓ | ✓ | | ✓ | ✗ | ✓ |
| 基于组 件 | 边缘特征 (组成部件有 相对运动) | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ |
| 基于相 关 | | ✗ | | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ |
| 基于描 述符 | 特征点 | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✗ |

| | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|-------|------|------|
| 模板匹配 | 利用特征 | 光照变化 | 缩放变化 | 混乱无序 | 多通道图像 | 模糊图像 | 聚焦模糊 |
|------|------|------|------|------|-------|------|------|

第七课 算法1

基本数据结构

模拟图像

坐标是连续的

数字图像

坐标离散的, $g = f(r, c)$ 其中 r, c 分别为像素所在的行数 (对应纵坐标)、列数 (对应横坐标)

二值图像

易于处理, 可通过阈值分割来获得。

面积

$$A = \sum_{r=0}^{n-1} \sum_{c=0}^{m-1} f(r, c) \quad (13)$$

投影

横向投影 (行 r 的函数)

$$H[r] = \sum_{c=0}^{m-1} f(r, c) \quad (14)$$

纵向投影 (列 c 的函数)

$$V[c] = \sum_{r=0}^{n-1} f(r, c) \quad (15)$$

位置

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{\sum_{c=0}^{m-1} (c \cdot V[c])}{A} \\ \bar{y} &= \frac{\sum_{r=0}^{n-1} (r \cdot H[r])}{A} \end{aligned} \quad (16)$$

图像增强

行程编码

(a, b) : 表示【该行的一个行程; a 表示起始列, b 表示连续的 1 的个数

PPT12页

方便计算投影

连通域 (connected components)

A&B是连通的：对A&B中任意两点，存在连续的路径将这两点连起来

领域

四邻域：上下左右

八邻域：

约当曲线理论：有闭合边界曲线，则必产生内外两个连通域

元素标定 (寻找连通域) ★

三种方法：

- 递归算法（几乎不使用）
- 并行增长（需要并行硬件）
- Row-by-Row：最常用

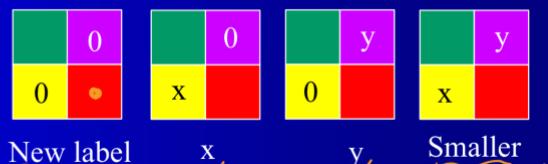
Component Labeling

- Row-by-Row (most common):

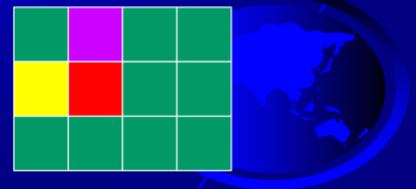
Classical Algorithm

Thresholded image

四种 mask：右方边和上面的值，决定赋值



二次扫描



按行程编码的深度优先算法：从左至右，从上到下重复搜索。当遇到第一个未处理的行程，然后搜寻与其连通的相邻行的行程，将其标为同一个记号。（用八邻域准则或四邻域准则 可能会得到不同结果）

PPT22

面积滤波 (Size Filter)

按面积去噪，首先要进行连通域标定。

欧拉数

连通域的数量 减去 孔洞的数目。

区域边缘 (region boundary)

PPT26

距离测量 (Distance measure)

三个性质：距离为正、对称、三角不等式

- 欧氏距离 $\sqrt{(r_1 - r_2)^2 + (c_1 - c_2)^2}$
- 城市街区 $|r_1 - r_2| + |c_1 - c_2|$

- 棋盘格 $\max(|r_1 - r_2|, |c_1 - c_2|)$

亚像素级边缘

灰度值变换 (Gray Value Transformations)

- 用于提高对比度
- 可以用查找表 LUT (lookup table), 来提高速度 $t_{r,c} = f_g[g_{r,c}]$
- 负片 (image negatives)
- 对数变换 Log transform
- 分段线性变换
- 指数变换

辐射度标定 (Radiometric Calibration)

认为像素的能量与灰度呈线性关系

$$G = aE + b \quad (17)$$

E : energy

G : Gray value

理想情况 $b = 0$

然而, 有时灰度值响应就是非线性的; 在这种情况下, 如果我们需要进行准确测量, 就必须确定非线性响应并求其逆响应。如果对非线性响应的图像使用逆响应, 那么结果就是线性响应的。确定逆响应函数的过程被称作辐射标定。

图像平滑 (Image Smoothing)

时域平均 (Temporal averaging)

不同时间采集 n 幅图像

$$g_{r,c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{g}_{r,c;i} \quad (18)$$

方差降低到原来的 $1/n$, 标准差变为原来的 $1/\sqrt{n}$

中值滤波

$$g_{r,c} = \frac{1}{(2n+1)(2m+1)} \sum_{i=-n}^n \sum_{j=-m}^m \hat{g}_{r-i,c-j} \quad (19)$$

模板的长宽均为奇数。

滤波器的边缘效应 (Border Treatment)

当滤波器在图像外围滑动时, 可以将图像外的像素设为0; 或者用与之相距最近的像素的灰度值替代

时间复杂度 (Time complexity)

利用结合律来减小运算量, 降低时间复杂度 PPT44

例子: 可分离的中值滤波器

高斯滤波

$$g_\sigma(r, c) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{r^2 + c^2}{2\sigma^2}} \quad (20)$$

一个 $n \times n$ 的中值滤波器对噪声的削减作用与 $\sigma = \frac{2n+1}{2\sqrt{\pi}}$ 的高斯滤波器相同。

傅里叶变换

空间域的卷积可以转换成在频率域的相乘，计算简单

原图像 $g(r, c) \rightarrow G(u, v)$

滤波器 $h(r, c) \rightarrow H(u, v)$

处理结果 $g(r, c) * h(r, c) \iff \mathcal{F}^{-1}[G(u, v)H(u, v)]$

二维傅里叶变换及其逆变换

$$\begin{aligned} H(u, v) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(r, c) e^{2\pi i (ur+vc)} dr dc \\ h(r, c) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H(u, v) e^{-2\pi i (ur+vc)} du dv \end{aligned} \quad (21)$$

第八课 算法2

广义霍夫变换

作用：模板匹配

流程

- 对模板进行离线操作
 - 找到模板的重心： $O = (x_c, y_c) = (\frac{1}{A} \sum_{(r,c)^T} r, \frac{1}{A} \sum_{(r,c)^T} c)$
 - 对模板上每一个边缘点 $e_i = (x_i, y_i)$ ，计算其梯度向量（可以用x,y方向的sobel算子，参见Canny），求出梯度方向角度 ϕ_i ，以及向量 $r = O - e_i$ 的方向角度 θ_i
 - 建立R-table，索引是边缘点的梯度向量范围 ϕ ，将其等量分割，以 $\Delta\phi$ 为间隔；表格存储的是满足梯度方向在此范围内的向量 r_k^i 的角度 θ_k^i 。 k 的存在是因为可能由不同的边缘点有相同的梯度方向，故存在 k 个角度 θ_k^i 。
- 对待匹配图像操作
 - 边缘处理 (canny)
 - 计算所有边缘点的梯度方向 ϕ_i ，对照 R-table 得到对应的 θ_k^i
 - 计算重心

$$\begin{aligned} x_c &= x_i + r_k^i \cos \theta_k^i \\ y_c &= y_i + r_k^i \sin \theta_k^i \end{aligned} \quad (22)$$

- 创建累加器：将 x_c, y_c 坐标系进行离散化，找到存储数值最大的累加器，即为图像中模板的位置