

# 机器视觉系统设计方法

## 1 设计基础

### 1.1 问题定义

对检测问题的定义是机器视觉系统设计的前提和基础，其涉及的方面较多，主要部分方面包括：（1）检测任务：任务描述；现有操作方法；约束条件（2）检测对象：对象描述；对象尺寸及其差异。（3）性能要求：精度；检测速度。其它还包括工况等。

### 1.2 视场

视场（Field of View）即成像于相机焦距平面的物平面总面积视场在一个方向的计算公式为

$$FOV = (D_p + L_v)(1 + P_a) \quad (1)$$

其中：FOV 为视场在一个方向上的尺寸； $D_p$  为该方向上的最大尺寸； $L_v$  为定位可能存在的最大变化； $P_a$  为预留的余量，其主要考虑到相机定位可能存在误差等，该值一般可取 10%。

### 1.3 分辨率

在机器视觉中有很多类分辨率，由于个体的理解差异和使用习惯，用法各异，需根据上下文进行理解。本文对其进行了梳理，具体如表 1 所示。

表 1 分辨率术语梳理

术语	单位	描述	影响因素
1 图像分辨率 (Image Resolution)	pixels	一帧图像的行列数	相机的图像传感器
2 空间分辨率 (Space Resolution)	mm/pixel	每个像素对应成像物体的物理长度	图像分辨率；镜头的放大倍数
3 特征分辨率 (Feature Resolution)	mm	系统可以稳定成像的最小特征	Shannon's Sampling Theorem
4 测量分辨率 (Measurement Resolution)	mm	可检测到的尺寸（位置）最小变化	可用的相关像素数目；相关像素的误差；拟合算法
5 像素分辨率 (Pixel Resolution)	bits	像素的位数	取决于相机或图像采集卡中的 ADC 位数

机器视觉系统不但可用于检测特征，并且可用于检测尺寸和位置的变化下面两组公式是最常用到的

#### （1）特征检测

$$\begin{cases} R_s = R_f / F_p \\ R_i = FOV / R_s \end{cases} \quad (2)$$

其中： $R_s$  为空间分辨率； $R_f$  为特征分辨率； $F_p$  可识别特征包含的最少像素数目，根据 Shannon's Sampling Theorem 其最小为 2，实际应用中，在图像对比度强并且信噪比高的情况下，最小为 3~4； $R_i$  为图像分辨率；FOV 为该方向的视场尺寸。

#### （2）尺寸（位置）变化检测

$$\begin{cases} R_m = T / \alpha \\ R_s = R_m / M_p \\ R_i = FOV / R_s \end{cases} \quad (3)$$

其中： $R_m$  为测量分辨率； $T$  为尺寸（位置）变化容许范围； $\alpha$  为变化允许范围和测量分辨率的比值，一般取 20 左右； $M_p$  为系统可达到的检测精度（亚像素级），在实验室最好可达到 0.001 个像素，在实际应用中一般可达到 0.1 个像素。

#### 1.4 运算负载

估算运算负载（processing load）公式如下

$$R_p = R_{i(horiz)} \cdot R_{i(vert)} / T_i$$

其中  $T_i$  为帧速。

在实际应用中，图像处理算法类型和开发软件包的效率对运算速度都有极大影响，但如下准则对机器视觉系统设计具有一定指导意义：运算负载小于或等于 10,000,000pixels/second 可采用基于 PC 的视觉处理系统；运算负载大于或等于 100,000,000pixels/second 通常需要更复杂的专用图像处理计算机。

## 2 设计方法

机器视觉系统主要部件包括：光源，镜头（有时包含滤光片），相机，图像采集卡，图像处理平台等（如图 1 和图 2 所示）。

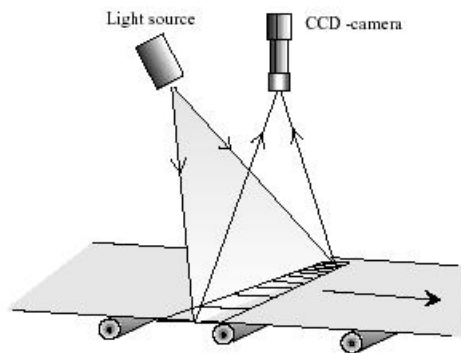


图 1 机器视觉系统示意图

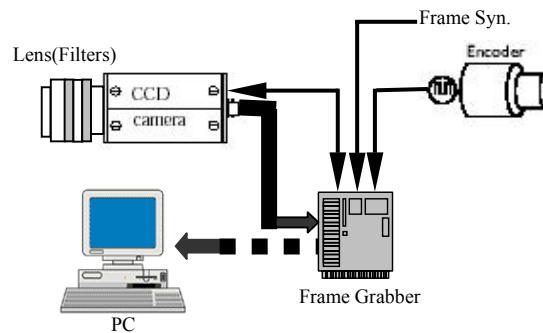


图 2 机器视觉系统基本构成部件

## 2.1 CCD 相机

CCD 相机作为机器视觉系统的图像传感器部件，主要包括三类：线扫（Line Scan），高灵敏度线扫（High Sensitivity Line Scan）和面扫（Area Scan）其中面扫又包括：隔行转移（Interline Transfer），全帧（Full Frame）和帧转移（Frame Transfer）三种类型各种类型 CCD 相机的传感器构架如图 3 所示，其性能比较见表 2。

在进行相机选择时，确定类型后首先需要考虑是系统的一些特殊要求，主要包括：（1）抗饱和性能（Booming Resistance）；（2）选用黑白相机（Monochrome Camera）或彩色相机（Color Camera）。其次我们根据问题要求选择合适的图像分辨率和像素分辨率。

需要说明的是，在彩色线扫相机中有两种类型：三线性（Tri-linear）和三片（Three-chip）两种，其结构原理示意如图 4 所示 三线性相机的图像传感器由紧密并排的三列线扫传感器构成，其三个颜色通道采集到的是运动物体不同位置的颜色信息，需要进行匹配 而三片相机不存在匹配问题，其采用的是三棱分光原理（如图 5 所示），该类相机较三线性相机价格更为昂贵。

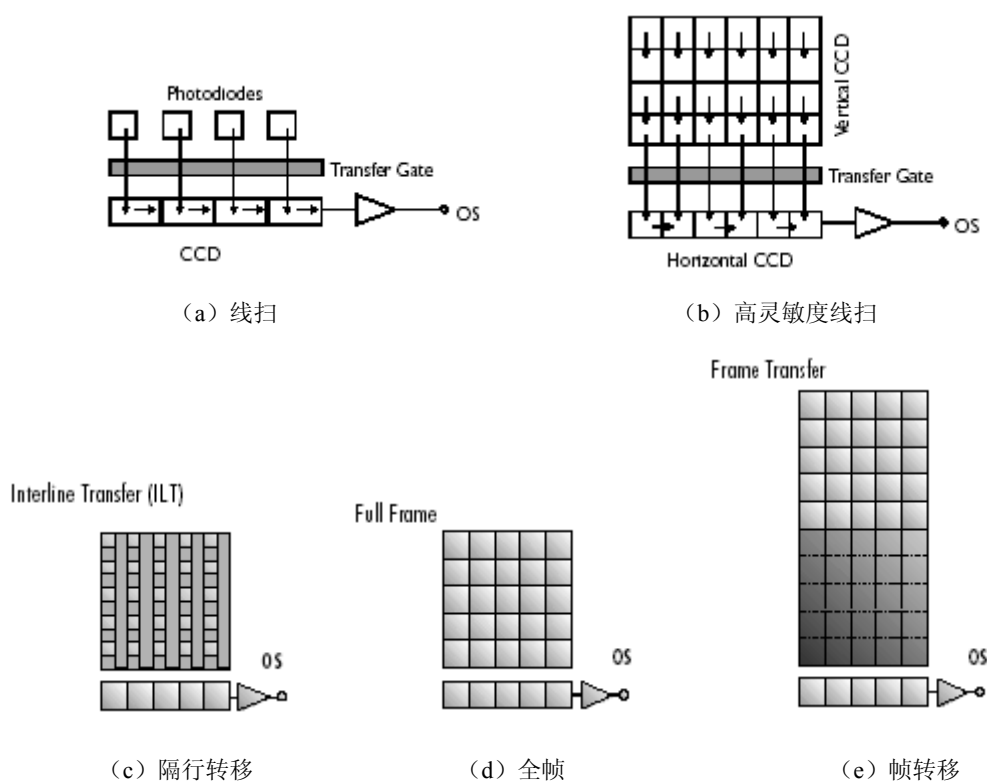


表 3 传感器构架

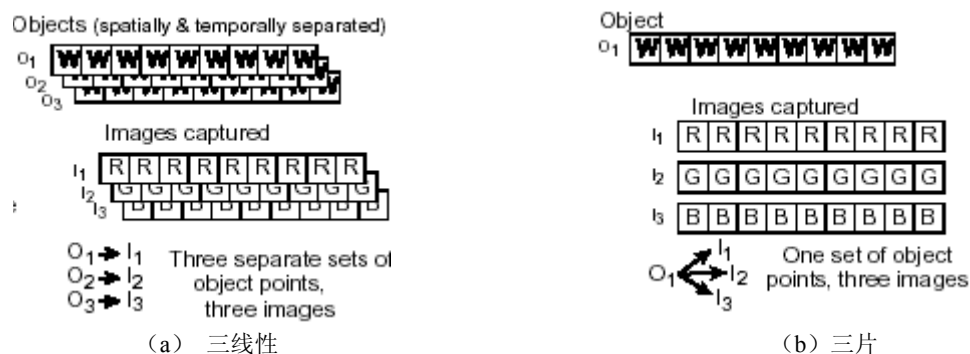


图 4 彩色线扫相机成像原理示意图

表 2 各类 CCD 相机性能与特点

相机类型	性能和优点	缺点
线扫	(1) 填充因子一般为 100%; (2) 动态范围大; (3) 可实现快速运动物体的无污染成像; (4) 对高空间分辨率成像应用是一种性价比较好的实现方式。	(1) 要求照度在整个视场尽可能均匀, 并且要求照度强度大; (2) 对要求镜头要求较高。
高灵敏度线扫	(1) 采用 TDI (Time Delay and Integration) 技术; (2) 可适用于高速应用场合; (3) 对光源要求较低, 甚至可以使用 AC 电源。	(1) 相机和机械传动系统的对准要求严格; (2) 要求运动物体速度恒定。
面扫	隔行转移	价格便宜, 适用于低端应用。
	全帧	(1) 填充因子一般为 100%; (2) 价格便宜。
	帧转移	(1) 填充因子一般为 100%; (2) 不需要对光照进行屏蔽。

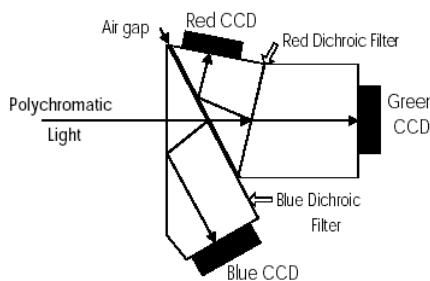


图 5 分光棱镜示意图

## 2.2 旋转编码器

旋转编码器 (Encoder) 是机器视觉系统一个重要的组成部分, 可对成像物体运动和相机行频之间进行同步。旋转编码器用光脉冲测量机械轴的角速度。机械轴主要有两种配置方式 (如图 6 所示): 主动轮连接方式和从动轮连接方式。主动轮连接方式的优点在于可以通过改变主动轮的直径调整图像运动方向的空间分辨率, 但可能滑动造成位移测量误差。从动轮连接方式可精确测量旋转速度, 但调整图像运动方向的空间分辨率灵活性较差。



(a) 主动轮连接方式

(b) 从动轮连接方式

图 6 机械轴配置方法

主动轮可按下式进行设计

$$c = R_s \times n \tag{4}$$

其中:  $c$  为主动轮周长, 单位为  $\text{mm}$ ;  $R_s$  为图像运动方向的空间分辨率, 单位为  $\text{mm}$ ;  $n$  为

旋转编码器的分辨率，单位为 pulses/rev。

在实际应用中，机械传动装置的运动速度很难达到恒定，在光照固定的情况下，由于行积分时间不同，图像会产生行条纹现象。为杜绝此现象，可使用 PRIN (Pixel Reset In) 信号。旋转编码器的输出信号输入到图像采集卡产生一固定积分时间，其时序如图 7 所示。

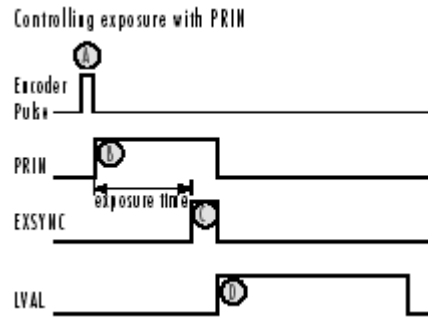


图 7 用 PRIN 控制曝光时序

### 2.3 镜头

镜头 (Lens) 的功能是将所需要的图像完好地投影到 CCD 传感器。

#### (1) 镜头格式

根据传感器物理尺寸可选择镜头格式 (Lens Formats)，其主要类型如表 3 所示。

表 3 镜头格式与图像传感器直径关系

Lens Format	Image Circle Diameter
C-Mount	14.4mm
F-Mount	37mm
1/3"	6mm
1/2"	8mm
2/3"	11mm
35mm	42.4mm

#### (2) 参数计算

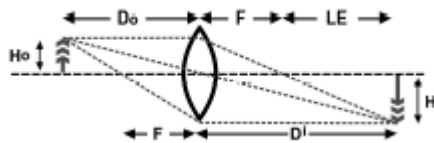


图 8 镜头几何关系示意图

图 8 为经典的薄镜头模型，该模型适用性较广，但不适用于高放大倍数镜头，广角镜头 (Wide Angle Lens) 和摄远镜头 (Telephoto Lens) 以下一些公式是在选择镜头参数常用到的

$$M_i = \frac{H_i}{H_0} \approx \frac{D_i}{D_0} \quad (5)$$

由  $\frac{1}{F} = \frac{1}{D_0} + \frac{1}{D_i}$ ，可得

$$F = \frac{D_0 D_i}{D_0 + D_i} = \frac{D_0 \frac{D_i}{D_0}}{1 + \frac{D_i}{D_0}} = \frac{M_i}{1 + M_i} D_0 \quad (6)$$

$$D_0 = \frac{M_i + 1}{M_i} F \quad (7)$$

$$LE = D_i - F = D_i - \frac{D_0 D_i}{D_0 + D_i} = \frac{D_i^2}{D_0 + D_i} = \frac{D_0 D_i \frac{D_i}{D_0}}{D_0 + D_i} = M_i F \quad (8)$$

(5) ~ (8) 式的参数定义参见图 8。

在机器视觉系统实际中，可以根据以下步骤计算参数：

步骤 1：若镜头物距范围为已知，取其中间值，并跳至步骤 2；否则，先选择焦距，其接近图像传感器直径，并跳至步骤 4。

步骤 2：根据 FOV 和传感器尺寸计算图像的放大倍数。

步骤 3：根据放大倍数和物距计算焦距。

步骤 4：选择最接近焦距计算值的镜头。

步骤 5：根据放大倍数和焦距重新计算物距。

若设计的物距不在镜头的标定范围，可考虑配一镜头扩展装置 (Lens Extender Kit)。

### (3) f/number

镜头的 f/number (f/stop) 即焦距和入瞳孔径的比值 fnumber 愈小，孔径愈大，更多的光可聚集到 CCD 传感器；而 f/number 愈大，可提高场深 (Depth of Field)，其使得镜头更容易聚焦，对物距的变化更不敏感，但需更强的照度。f/number 和光传输的关系如表 4 所示。

表 4 f/number 和光传输的关系

f-Number	Light Transmitted (relative to f/1.4)
f/1.4	100%
f/2.0	50%
f/2.8	25%
f/4.0	12.5%
f/5.6	6.3%
f/8.0	3.1%
f/11	1.6%
f/16	0.8%
f/22	0.4%

### (4) MTF

镜头实际上只能解析一定空间频率的信息，这种解析能力可用 MTF (Modulation Transfer Function) 进行刻画，用百分数进行表示。在光学工业标准中，采用 lp/mm (line pairs per millimeter) 进行衡量，其关系如图 9 所示。

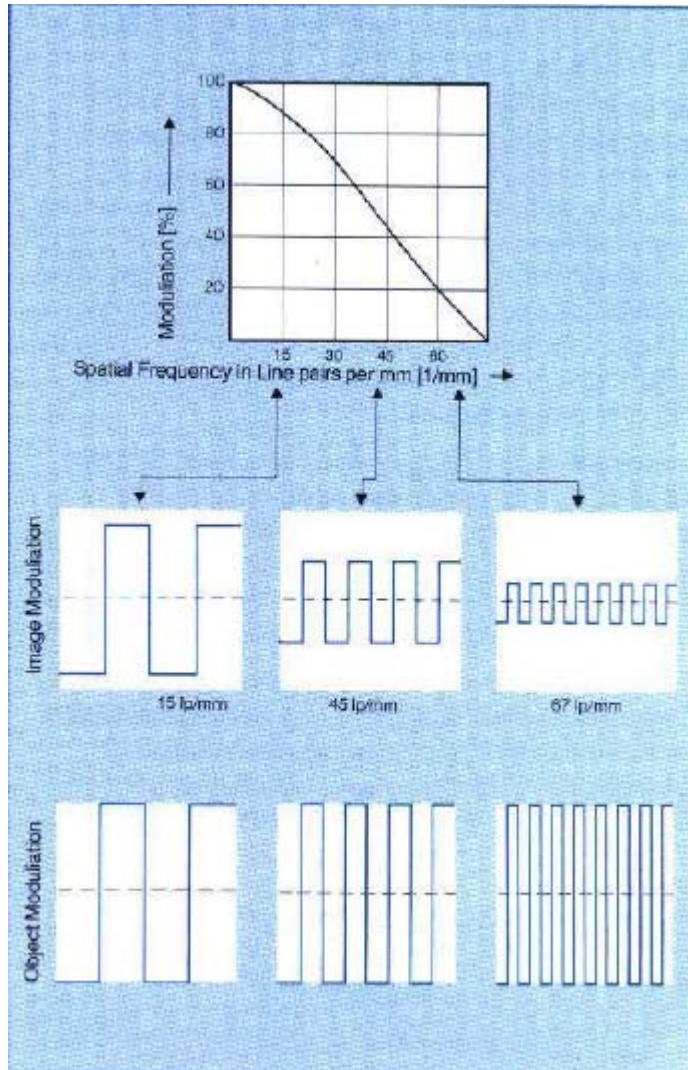


图 9 MFT 示意图

MFT 和像元尺寸的关系

$$R = \left( \frac{1}{2 \times P} \right) (lp/mm) \quad (9)$$

其中：R 为最大线对数；P 为像元尺寸 MTF 值超过 90% 成像质量好，而低于 10% 图像质量就比较糟糕了。并且镜头 MTF 必须同像元尺寸对应。

## 2.4 滤光片

照明 (Illumination) 是成像系统中最容易被人们忽视的部分，以下因素设计中必须考虑的，也是滤光器 (Filters) (如果需要) 设计的依据：(1) 光源的频谱响应曲线；(2) 物体表面特性；(3) CCD 传感器的频谱响应。

滤光器的功能主要有：(1) 光阻特性 (cutoff filter)，将可能影响成像质量的谱段能量进行滤除；(2) 带通特性 (polarizers filter)，只允许特定极性的光波通过；(3) 衰减特性 (darking filter)，衰减光谱能量。

## 2.5 照明技术

在机器视觉系统设计中，照明 (Lighting) 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 (color 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。

物体的主要光学特性包括:

(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 (Color): 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。

主要照明技术及特点如表 5 和图 10 所示。主要的光源类型及特点如表 6 所示。

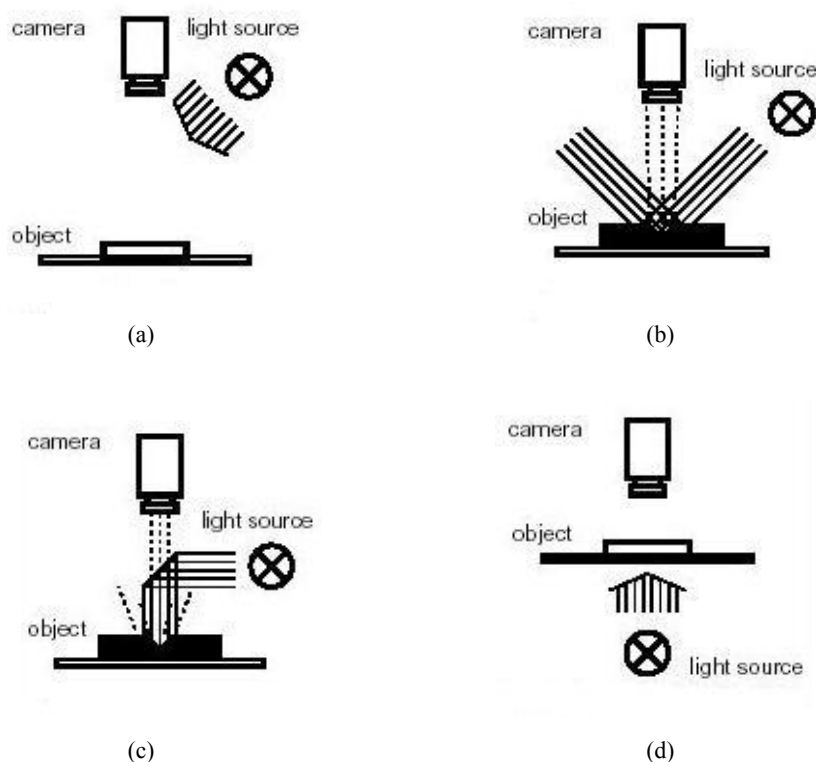


图 10 基本照明技术示意图



表 5 主要照明技术及特点

类型		描述	特点
Front lighting	1 Specular	光从一固定角度入射，并且直接镜面反射到相机的镜头（图 7（a））。	（1）适用场合：特征差异可由其镜面反射差异表征；（2）对物体姿态改变特别敏感。
	2 Semi-diffuse	光可从比较多的角度入射（图 7（a））。	（1）适用于漫反射光成像的场合；（2）合理配置可在中等视场获得较好的光照均匀性。
	3 Diffuse	光可从几乎所有的角度入射（图 7（a））。	（1）适用场合：可使由于表面方向产生的镜面反射和差异最小化。
	4 Off-axis	光从一固定角度入射，镜面反射光偏离相机，仅有漫反射光进入相机（图 7（b））。	（1）通常用于获得阴影信息；（2）很难实现均匀照明。
	5 Dark field	光源的光照方向同相机的视方向成接近 $90^{\circ}$ ，几乎平面表面的所有镜面反射和漫反射光全部偏离相机，只有不规则表面产生较强的镜面反射进入相机（图 7（c））。	
Back lighting	6 Diffuse	物体由一透明面板支撑，光源位于面板后面（图 7（d））。	易于设计和实现光照均匀性。
	7 Condenser	用一聚光镜头将光源的光导入相机镜头。	可用于产生一具有方向特性的后向照明。
	8 Dark field	光源的光照方向同相机的视方向成接近 $90^{\circ}$ 。	可用于检测透明材料中的异物。

表 6 主要光源类型及特点

类型	特点
1 日光 Daylight	颜色和强度随季节，时间和天气影响很大，不太适用于机器视觉系统。
2 钨光源 Tungsten light sources	（1）采用交流电源存在工频问题；（2）照度不均匀；（3）产生的热量多。
3 荧光灯 Fluorescent lamps	（1）可用整流器（Rectifier）防止光强调制而避免干涉；（2）可产生很大的均匀照度场，并且产生的热量不多；（3）光谱分布存在限制。
4 卤钨灯 Quartz Tungsten Halogen	（1）光强几乎可达到恒定，一般作为光纤系统（Fiber optical system）的供给光源（Feeding light sources）；（2）基于卤钨灯的光纤系统可调整光强的角度分布，但将近 40%左右的光强因为散射和反射效应而损失，并且价格较昂贵。
5 放电灯 Discharge lamps	（1）有很高的发光强度，发光度在时间上恒定；（2）光谱可能连续或离散，其取决于照明气体；（3）可用于频闪观测（stroboscopic）照明，价格也相当昂贵。

<p>6 LED Light Emitting Diodes</p>	<p>(1) 即时起作用, 几乎没有惯性大范围进行光强控制, 适用于频闪观测应用; (2) 具有单色 (monochrome) 特性, 适用于成像对象颜色畸变 (chromatic aberration) 的场合, 但在很多应用中这种特性成为一种缺陷; (3) 价格合理, 体积小, 重量轻, 寿命长 (可达到大约 100,000 小时), 并且产生热量少, 没有噪声和振动, 在机器视觉中应用日益广泛; (4) 二极管通常排列成矩阵或环状, 并且可作为光纤系统的供给光源。</p>
<p>7 激光 Lasers</p>	<p>(1) 有很高的光强, 激光是彩色并且相干的; (2) 可作为光纤系统的供给光源。</p>

关于光源选择的几点说明: (1) 卤光源 (Halogen light sources) 通常在蓝色频段产生较少能量 (相对于红外); (2) 光纤系统 (Fiber-optic light distribution systems) 通常在蓝色频段传播较少能量 (相对于红外); (3) 一些光源有老化问题, 一般这种老化是不均匀的, 即在一些频段产生较大的衰减, 其它频段不一定, 可在相机校准中对其进行补偿, 但前提是仍旧有足够的蓝光。

## 2.6 图像采集卡

图像采集卡 (Frame Grabber) 具有如下功能: 可处理来自不同图像源的信息, 并在各种不同应用中具有灵活性; 可快速高效地存储图像信息; 提供图形用户接口根据不同产品类型和价格, 还可包括如下功能: 具有 RISC 构架的快速 DSP; 并行多处理器系统; 大 RAM 存储能力; 强大的软件库; 交互式用户界面; 宜人的编程工具 但图像采集卡的应用存在如下两个方面的挑战: 随着 CMOS 传感器的广泛应用, 图像处理例程可直接在相机中完成; 而图像处理算法可直接在主机上实现。

为了满足不同需求, 大多数图像采集卡采用模块结构 (modular structure), 对不同应用可对模块进行不同配置 图像采集卡种类繁多, 很难对其统一结构进行描述, 但其通常包括如下模块: 输入单元 (input unit); 帧缓存 (frame buffer); 数字信号处理 (digital signal processors); 输出单元 (output unit)。

在机器视觉系统设计中, 必须遵循以下原则:

- (1) 相机特性: 图像采集卡必须与相机的输出格式 (模拟或数字)、数据率和时序兼容。
- (2) 计算机硬件和操作系统: 图像采集卡必须在机械上和功能上和计算机及操作系统兼容。
- (3) 显示功能: 对于频繁显示或刷新图像的应用, 可采用集成有专为显示功能设计的硬件部件的图像采集卡。
- (4) 增强功能: 对于较复杂应用, 可采用具有 DSP 或并行处理器等高性能图像采集卡。
- (5) 控制和状态信号: 图像采集卡的控制和状态信号必须和相机的时序同步。

## 2.7 图像处理平台

常用图像处理平台及特点如表 7 所示。

表 7 常用图像处理平台及特点

类型	特点
PC Based	最常使用的机器视觉处理器，可适用于大多数运算负载不超过 10,000,000pixels/second 的应用。
Packaged System	(1) 将相机、图像采集卡、处理器和软件集成于一体，通常同微处理器或微处理机相连，使用标准操作系统。(2) Packaged System 也可包含专用处理器以适应于处理高运算负载应用。(3) 处理性能相当于或高于 PC Based。
Integrated Camera	(1) 相机中有一内置处理器，其可置于同一外壳内，也可能是相连的部件。(2) Integrated Camera 通常比 Packaged System 更便宜，但通用性差一些。(3) 处理性能可接近于 PC Based。
Vision Engine	(1) 可由单个高速处理器或高速处理器阵列组成，可适用于各种运算负载。(2) 价格昂贵，并且需要专用的编程能力。

## 2.8 小结

图像质量的好坏是机器视觉系统成功的基础和前提，在实际应用中可用一些特征对其进行度量，主要特征及其描述如表 8 所示。需要说明的是，若通过显示器来观测采集到的图像，一定要考虑显示器的影响。

表 8 图像质量特征

特征	描述	影响部件
Resolution	分辨率：在广义上可理解为成像系统复制物体细节能力的一种度量。	(1) 镜头(有时包含滤光片)； (2) 相机。
Contrast	对比度：可定义为物体和背景的灰度级差异。	(1) 光源； (2) 镜头(有时包含滤光片)； (3) 相机。
Depth of Field (DOF)	场深：为物体可清晰成像的最大物距和最小物距之间的差值。	镜头孔径 (f/#)
Distortion	失真：由镜头的光学误差引起，导致图像中不同点的放大倍数存在差异。	镜头
Perspective Errors	视差：当镜头偏离最佳焦距时，放大倍数会产生变化，距离近的物体比远的物体显得更大。Telecentric lens 已经在光学上消除了这种现象。	镜头

## 3 光学分析

为了对机器视觉系统进行最优配制，分析光照条件、物体特性和相机输出之间的关系是有用的和必要的，整个光学过程如图 11 所示。

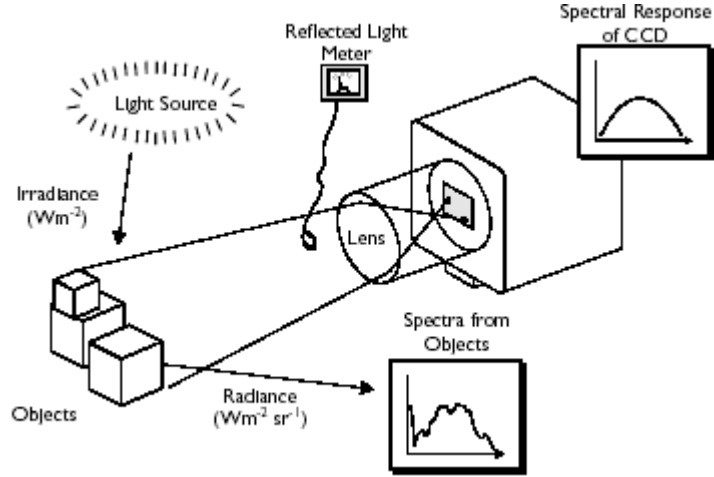


图 11 机器视觉系统光学通路示意图

### 3.1 相机镜头

机器视觉系统中，CCD 传感器中每一个像元单元对应物体的一组特征尺寸，系统的放大倍数为

$$m = \frac{\text{size of image}}{\text{size of object}} = \frac{ID}{OD} = \frac{f}{OD - f} \quad (10)$$

其中：f 为镜头焦距，其余参数参见图 12。

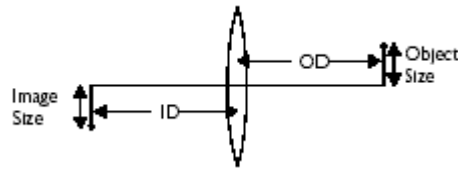


图 12 相机镜头示意图

相机镜头聚集场景的反射光到 CCD 传感器 严格说来，镜头会吸收一些光并且有其谱吸收响应，但在近似分析中，可忽略。因而，CCD 传感器的照度为

$$\begin{aligned} \text{Irradiance} &= \text{object radiance} \times \frac{\frac{1}{4} \pi d^2}{ID^2} \\ &= \pi \times \text{object radiance} \times \frac{1}{[2(f/\#)(m+1)]^2} \\ &= \pi \times \text{object radiance} \times \left(\frac{NA}{m+1}\right)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

其中：d 为入瞳直径；ID 为像距；f/# 为 f-number；NA 为数字孔径；m 为放大倍数。

### 3.2 单色 (Monochromatic) 情形

在单色光源条件下，并且物体平面为漫反射平面（如图 13 所示），有

$$E_{(\text{object})} = L_{(\text{source})} \cos(\varphi) \frac{\pi}{4} \left(\frac{S}{LS}\right)^2 (W.m^{-2}) \quad (12)$$

其中：s 为光源直径；LS 为光源到物体距离。

若物体表面反射呈半球状（Lambertian 平面），并且反射率为 R，则

$$L_{(object)} = E_{(object)} \frac{R}{\pi} (W.m^{-2}.sr^{-1}) \quad (13)$$

在估算时 18% 是一个应该记住的反射率数值。

根据 (11) 式可计算 CCD 传感器的照度

$$E_{(sensor)} = \frac{T_r L_{(object)} \pi}{[2(f/\#)(m+1)]^2} (W.m^{-2}) \quad (14)$$

其中： $T_r$  为镜头的透射系数。

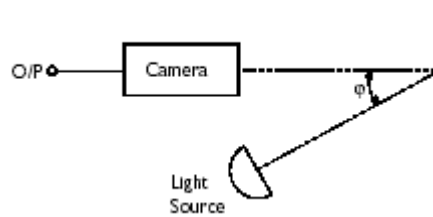
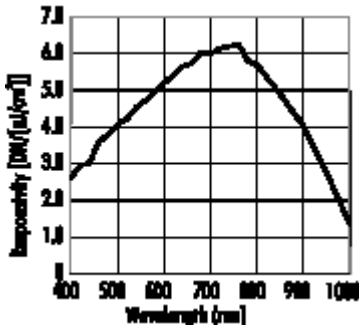


图 13 单色光光源条件下相机输出响应示意图

相机的输出除取决于照度外，还取决于 CCD 传感器波长响应特性和积分时间

$$O_{(output)} = 10^5 \times E_{(sensor)} \cdot T \cdot R_e (DN) \quad (15)$$

其中：T 为积分时间，单位为 s； $R_e$  传感器的波长响应系数（如图 14 所示），单位为  $DN/(nJ/cm^2)$ ，DN (Digital Number) 为相机的灰度级输出。



monochrome line scan camera(dalsa CL-P1/CT-P1)

图 14 CCD 相机响应曲线

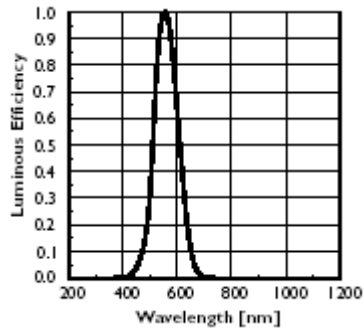


图 15 CIE Luminous Efficiency Curve

### 3.3 多色 (Polychromatic) 情形

为了确定光源的光谱曲线，通常建模为等价黑体黑体为一理想物体，其发出平滑而连续的光谱，并且由其温度唯一确定（如图 16 和图 17 所示）。黑体曲线只适用于白炽光源（incandescent light sources），荧光管和激光都有其独特的发射光谱，但可等价为黑体“色温”

运用等价黑体对光源进行光谱分析时，有两个常用定理：

#### (1) Planck's Law

Planck's Law 刻画了温度和光谱辐射之间的关系

$$L(\lambda) = \frac{1.19 \times 10^{23}}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{14388000}{\lambda T}\right) - 1 \right]} (W \cdot cm^{-2} \cdot nm^{-1} \cdot sr^{-1}) \quad (16)$$

(2) Wien's Displacement Law

用 Wien's Displacement Law 可确定光谱能量最大的波长

$$\lambda = 2897800 / T \quad (17)$$

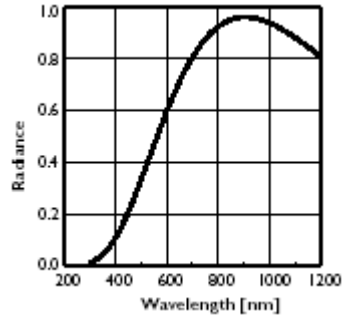


图 16 黑体曲线

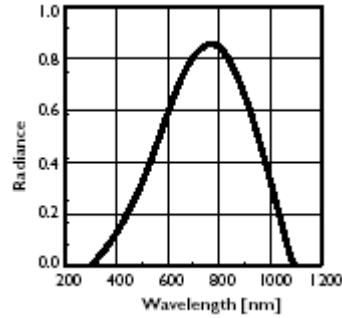


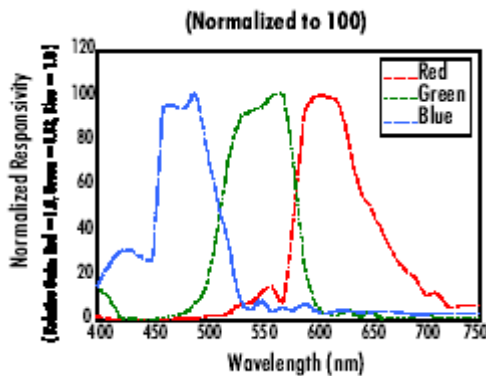
图 17 带有 IR Filter 的黑体

在光源颜色为多色时, 必须考虑相机对全部光谱的响应 最为简单而直观的方法是对感兴趣的所有波长, 以单色光方式分别计算相机输出响应, 并对其进行累加 在实际应用中, 只需对相机响应进行估算就足够了, 具体实现方法:

(1) 将光源光谱划分为离散谱段  $\lambda_1 - \lambda_2, \lambda_2 - \lambda_3, \dots, \lambda_n - \lambda_{(n+1)}$ , 可以认为每一谱段照度恒定并且等于相应谱段波长中点处的照度。

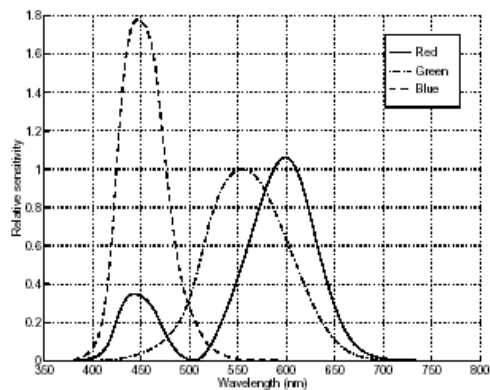
(2) 对每一谱段以单色光方式分别计算相机输出响应, 并对其进行累加。

对于彩色相机类同, 只是分别对三个颜色通道进行相应计算 典型的彩色 CCD 相机的输出响应如图 18 所示。



color line scan camera (dalsa Trillium camera)

图 18 CCD 相机响应曲线



每一曲线能量相等

图 19 三刺激颜色理论颜色感应曲线

从图 14 和图 15, 图 18 和图 19 的比较可发现, 黑白彩色相机成像机理和人眼视觉存在一定差异, 其间关系及对后继图像处理的影响还亟待研究 辐度学和光度学之间的关系和各种

单位转换较为繁琐，可参考图 15 和表 9~表 12。

表 9 一些有用的转换系数

1 ASB (apostilb)	=	0.318 lux Sr <sup>-1</sup>
1 Footcandle	=	1 Lumen / Ft <sup>2</sup>
1 Footcandle	=	10.764 meter Candles
1 Candle	=	1 Lumen/Steradian
1 Candle / m <sup>2</sup>	=	3.142 × 10 <sup>4</sup> Lambert
1 Lambert	=	2.054 Candle / in <sup>2</sup>
1 Lux	=	1 Meter Candle
1 Lux	=	1.49μW/cm <sup>2</sup> at 540nm
1 meter Candle	=	1 Lumen / m <sup>2</sup>
1 Lumen	=	average light emission of one candle into a unit solid angle (in steradians)

表 10 辐度学单位

Symbol	Name	SI units
L <sub>e</sub>	Radiance	W m <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup>
E <sub>e</sub>	Irradiance	W m <sup>-2</sup>
I <sub>e</sub>	Intensity	W sr <sup>-1</sup>
F <sub>e</sub>	Flux	W
Q <sub>e</sub>	Energy	J

表 11 光度学单位

Symbol	Name	Units
L <sub>v</sub>	Luminance	cd m <sup>-2</sup>
E <sub>v</sub>	Illuminance	lux (lx)
I <sub>v</sub>	Intensity	candela (cd)
F <sub>v</sub>	Flux	lumen (lm)
Q <sub>v</sub>	Energy	Talbot

表 12 光度学亮度单位之间的相互转换

Multiplication Factors FROM	Cd/cm <sup>2</sup> (stilb)	cd/ft <sup>2</sup>	Cd/m <sup>2</sup> (nit)	Lmb	Ft.Lmb	Mtr.Lmb (apostilb)	Threshold of Unaided Vision	Typical Level (clearsky)
cd/cm <sup>2</sup> (stilb)	1	A	10000	π	πA	10000 π	10 <sup>-7</sup>	0.3
cd/ft <sup>2</sup>	1/A	1	B	π/A	π	πB	10 <sup>-4</sup>	300
cd/m <sup>2</sup> (nit)	10 <sup>-4</sup>	1/B	1	10 <sup>-4</sup> π	π/B	π	10 <sup>-3</sup>	3000
Lmb	1/π	A/π	10 <sup>-4</sup> π	1	A	10 <sup>-4</sup>	3 × 10 <sup>-7</sup>	1
Ft.Lmb	1/πA	1/π	B/π	1/A	1	B	3 × 10 <sup>-4</sup>	1000
mtr.Lmb	10 <sup>-4</sup> /π	1/πB	1/π	10 <sup>-4</sup>	1/B	1	3 × 10 <sup>-3</sup>	10000

## 4 光学建模

### 4.1 照度

在机器视觉中，要求光源的照度 (Irradiance) 在整个照明区域中尽可能均匀，但实际上照明区域中的每一点存在一定差异可以认为其只在强度上存在一比值关系，而光谱能量分布是一样的。因而每一点的照度可表示为

$$L_i(x, y, \lambda) = r(x, y)L_0(x, y, \lambda) \quad (18)$$

其中： $L_0(x, y, \lambda)$  为一基准点的照度； $r(x, y)$  为在照明区域的位置函数。

物体表面的反射率表示为  $R(x, y, \lambda)$ ，因而物体表面的辉度 (Radiance) 为

$$L_r(x, y, \lambda) = \frac{1}{\pi} L_i(x, y, \lambda) R(x, y, \lambda) = \frac{1}{\pi} r(x, y) L_0(x, y, \lambda) R(x, y, \lambda) \quad (19)$$

像元的照度为

$$B(m, n, \lambda) = L_r(x, y, \lambda) P(x, y) F(\lambda) \quad (20)$$

其中：  $P(x, y)$  为镜头的输入输出函数，  $P(x, y) = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{f}\right)^2 \cos^4 \alpha$ ，  $f$  为焦距，  $d$  为镜头

直径，  $\alpha$  为点  $(x, y)$  和光轴的夹角， 其推导和分析见本节附录；  $F(\lambda)$  为滤光片输入输出函数， 对不同颜色通道该函数不同。

(20) 式可写为

$$B(m, n, \lambda) = [r(x, y) \cos^4 \alpha] \frac{1}{4} \left(\frac{d}{f}\right)^2 F(\lambda) L_0(x, y, \lambda) R(x, y, \lambda) \quad (21)$$

在表面的较小区域内， 可近似认为  $r(x, y)$  为一固定值  $r_0$ ， 其均值为 1， 合适选择光源及其相应参数， 方差  $\sigma_{K_1}$  可控制在较小值 该区域与光轴的夹角  $\alpha$  亦可认为为一固定值  $\alpha_0$ 。 因而

$$\begin{aligned} B(m, n, \lambda) &\approx [r_0 \cos^4 \alpha_0] \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{f}\right)^2 F(\lambda) L_0(x, y, \lambda) R(x, y, \lambda) \\ &= K_1 L_0(x, y, \lambda) R(x, y, \lambda) \end{aligned} \quad (22)$$

其中：  $K_1 = \frac{1}{4} \left(\frac{d}{f}\right)^2 [r_0 \cos^4 \alpha_0] F(\lambda)$ ， 其为一固定值。

## 附录 A

在此分析物体上一点辉度和图像传感器上对应点的照度之间的关系（如图 A.1 所示）设物体表面某块面元的面积为  $\delta O$ ， 对应图像传感器的像元面积为  $\delta I$ 。 从物体面元到镜头中心的光线与光学轴的夹角为  $\alpha$ ， 与物体表面面元法线  $\mathbf{n}$  的夹角为  $\Theta$  物体沿光轴到镜头的距离为  $z$ 。

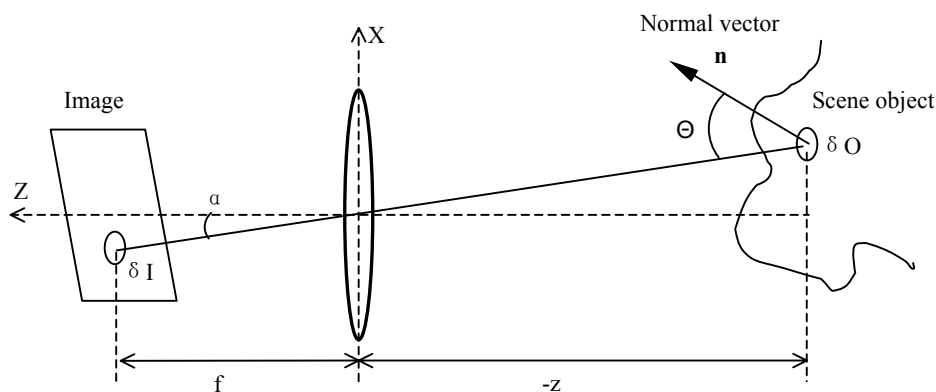


图 A.1 照度 E 和辉度 L 关系

先考虑从镜头中心观察物体面元  $\delta O$  和像元面元的立体角 从镜头中心看到的像元面积为  $\delta I \cos \alpha$ ， 而像元与镜头中心的距离为  $f / \cos \alpha$ ， 因而像元所对应的立体角为



$$\frac{\delta I \cos \alpha}{(f / \cos \alpha)^2}$$

同理可知从镜头中心看到的物体面元所对应的立体角为

$$\frac{\delta O \cos \Theta}{(z / \cos \alpha)^2}$$

由上述两个立体角相等得

$$\frac{\delta O}{\delta I} = \frac{\cos \alpha}{\cos \Theta} \frac{z^2}{f^2} \quad (\text{A.1})$$

再看物体表面射出的光有多少将穿越镜头，由镜头面积可得从物体面元看到的镜头所对应的立体角

$$\Omega_L = \frac{\pi}{4} \frac{d^2 \cos \alpha}{(z / \cos \alpha)^2} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{z}\right)^2 \cos^3 \alpha \quad (\text{A.2})$$

若物体表面在朝向镜头方向上的辉度为  $L$ ，则物体表面面元射出并穿越镜头的功率为

$$\delta \Phi = L \delta O \Omega_L \cos \Theta = \pi L \delta O \left(\frac{d}{z}\right)^2 \frac{\cos^3 \alpha \cos \Theta}{4} \quad (\text{A.3})$$

镜头将光能聚集到像元如果镜头造成的能量损耗可忽略，并且没有其它的光到达像元，则像元的照度为

$$E = \frac{\delta \Phi}{\delta I} = L \frac{\delta O}{\delta I} \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{z}\right)^2 \cos^3 \alpha \cos \Theta \quad (\text{A.4})$$

将 (A.1) 代入 (A.4) 得

$$E = L \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{f}\right)^2 \cos^4 \alpha \quad (\text{A.5})$$

其中： $\cos^4 \alpha$  刻画了镜头的系统光学缺陷，称为晕影（vignetting）效应， $\alpha$  越大衰减越厉害，这意味着靠近图像边缘的像素更暗一些； $d/f$  称为 f-number。

## 4.2 相机

CCD 相机中，单个像元成像基本公式为

$$I = T \int_{\lambda} \int_m \int_n B(m, n, \lambda) S(m, n) q(\lambda) d\lambda dm dn \quad (\text{23})$$

其中： $T$  为积分时间； $B(m, n, \lambda)$  为照度； $S(m, n)$  为像元的空间响应函数； $q(\lambda)$  为光电转换函数； $(m, n)$  为像元平面连续坐标； $\lambda$  为波长。

将 (22) 带入 (23) 得

$$I = K_1 T \int_{\lambda} \int_m \int_n L_0(x, y, \lambda) R(x, y, \lambda) S(m, n) q(\lambda) d\lambda dm dn = K_1 I_0 \quad (\text{24})$$

(24) 式是 CCD 相机理论上的像元成像公式，其存在诸多噪声来源，主要有以下八种，

其具体为：

#### (1) 暗电流 (Dark Current)

暗电流即硅片上由于热能而产生的自由电子。其与温度有关，温度越高，热激发产生的载流子越多，暗电流亦越大。据计算，温度降低 $10^0 C$ ，暗电流可降低 1/2。对于很多 CCD 相机，对不同像元单元其暗电流存在很大差异。在工业现场，通过降低温度可将每个像元单元的暗电流电子数控制在 1 个以内。在此用  $N_{DC}$  表示由于暗电流产生的噪声。

#### (2) 光子响应不均匀性 (Photo Response Nonuniformity)

在均匀照明条件下，CCD 相机各像元存在差异，其具体表现在各像元电荷容量和光电转换效率的不同，这种差异称为光子响应不均匀性。光子响应不均匀性源于传感器的不同结构和制造工艺水平。

光子响应不均匀性是和波长  $\lambda$  有一定相关性。为简化问题，近似认为它们是不相关的，可以将单个像元收集电量的建模为  $K_2 I$ ，即  $K_2 K_1 I_0$ ， $I$  如式 (23) 和式 (24) 所示， $K_2$  对于单个像元是固定值，其为  $S(m, n)$  和  $q(\lambda)$  尺度系数的乘积。 $K_2$  均值为 1，方差  $\sigma_{K_2}$  是空间相关的，是对 CCD 所有像元单元之间光子响应差异的一种度量。现今的制造工艺水平已经可以将  $\sigma_{K_2}$  控制在很小。

#### (3) 光晕 (Blooming)

当光照过强，有些像元单元可能过饱和，并且会向相邻像元单元溢出电荷，称之为光晕。当光晕严重时，其可影响相邻诸多像元单元。幸运的是，现代 CCD 相机大都提供了反光晕功能，因而可不考虑光晕的影响。

#### (4) 光子噪声 (Shot Noise)

由于光子发射是一个随机过程，因而势阱中收集的光电荷也是随机的，这就成为噪声源。其与 CCD 传感器无关，取决于光子的量子特性，成为 CCD 相机的基本限制因素。该噪声源在低光强下有较大影响。光子噪声  $N_s$  对 CCD 相机的最终影响与暗电流和光子响应不均匀性皆有关系，其可以近似为服从泊松分布

$$N_s \{X = j\} = \frac{\lambda^j e^{-\lambda}}{j!} \quad j = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (25)$$

其中： $j$  为电荷数目； $\lambda = K_2 K_1 I + N_{DC}$ 。

光子噪声的均值和方差均为  $\lambda$ ，其与入射光子成正比。

#### (5) 电荷转移效率 (Charge Transfer Efficiency)

电荷转移效率即 CCD 像元单元将电荷转移到输出放大器的效率。电荷转移效率一般小于 1。现今制造工艺可以使其达到 0.99,999 或更高。因而，可以近似忽略电荷转移效率的影响，即认为 CCD 像元单元的电荷全部转移到输出放大器。

#### (6) 放大器噪声 (Read Noise)

输出放大器产生的噪声称之为放大器噪声。该噪声可建模为 0 均值噪声， $\sigma_R$  可控制在较小值，并且与电量的大小无关。

因而，可将模拟电压的最终表达式写为

$$V = (K_2 I + N_{DC} + N_S + N_R) A \quad (26)$$

其中：A 为相机电路和输出放大器的联合增益。

#### (7) 量化噪声 (Quantization Noise)

在由模拟电压转换为数字量时，存在量化误差，称之为量化噪声。量化过程可以表示为

$$(n - \frac{1}{2})q < V \leq (n + \frac{1}{2})q \quad (27)$$

其中：q 为量化步长，n 满足  $0 \leq n \leq 2^b - 1$ ，b 为 A/DC 的转换位数，一般为 8 位，有时也可达到 10 位。

量化噪声  $N_Q$  服从区间  $[-\frac{1}{2}q, \frac{1}{2}q]$  均匀分布，其均值为 0，方差为  $\frac{1}{12}q^2$ 。

综合上面所有对于 CCD 相机噪声来源的分析，可以将最终的像素表达式为

$$D = (K_2 K_1 I_0 + N_{DC} + N_S + N_R) A + N_Q \quad (28)$$

其中： $I_0$  为理想的电量 因而，图像的光学校准就可以归结为电压  $AI_0$ （即理想的像素值）的求取。

## 5 光学校准

可将 (28) 式改写成一维离散形式，即和彩色线阵相机一个颜色通道相对应的形式

$$\begin{aligned} D(i) &= K_2(i)K_1(i)AI_0(i) + [N_{DC}(i) + N_S(i) + N_R(i)]A + N_Q(i) \\ &= aAI_0(i) + b = aI_t(i) + b \end{aligned} \quad (29)$$

其中： $a = K_2(i)K_1(i)$ ， $b = [N_{DC}(i) + N_S(i) + N_R(i)]A + N_Q(i)$ ， $I_t(i) = AI_0(i)$ 。

从 (29) 式我们可以看出，像素值的理想值和实测值之间存在线性关系，其系数  $a$  和  $b$  均为随机变量组合而成的随机变量，系数中相应分量在本文前面已经进行了分析 在此需要说明的是 (29) 式成立的条件为 (1) 光源所在视场的照度基本达到空间域和时间域均匀；(2) 相机的各噪声源的影响必须控制在前面分析的约定之中 换言之， $a$  和  $b$  的方差必须控制在较小值，(29) 式才有意义。

可按如下方法进行数据采集以进行光学校准：

(1) 采集没有辉度输入的情况下 CCD 相机的输出值（可将镜头盖合上的方法实现这一采集过程），其理想值为 0，相应像元的理想值和实测值可表示为元组形式  $(0, u_{ij})$ ，其中： $i$  对应 CCD 相机的像元序号， $j$  为每一像元的采集次数。

(2) 对国标使用的粉体标准白板进行采样，标准白板表面对应的像元的灰度值输出应该是非常一致的，其理想值为一标定值  $C$ ，相应像元的理想值和实测值元组表示为  $(C, v_{ij})$ 。

对每一像元可以先计算 (1) (2) 情况下采集到数据的平均值

$$u_i = \sum_j u_{ij}, \quad v_i = \sum_j v_{ij} \quad (30)$$

然后两点方程式

$$\begin{cases} u_i = b_i \\ v_i = a_i C + b_i \end{cases} \quad (31)$$

解得  $a_i = \frac{1}{C}(v_i - u_i)$ ,  $b_i = u_i$ ,  $i$  对应 CCD 相机的像元序号。

因而可得校准方程

$$I_i = \frac{D_i - b_i}{a_i} \quad (32)$$

其中： $I_i$  为校准后的像素灰度值， $D_i$  为测量的像素灰度值。

前面分析是针对彩色线阵 CCD 相机的一个颜色通道，实际操作中，三个颜色通道完全相同。该方法亦可移植到面阵 CCD 相机。我们将该方法称为“两点法”。

图 20 到图 23 为一组两点法的实测图。

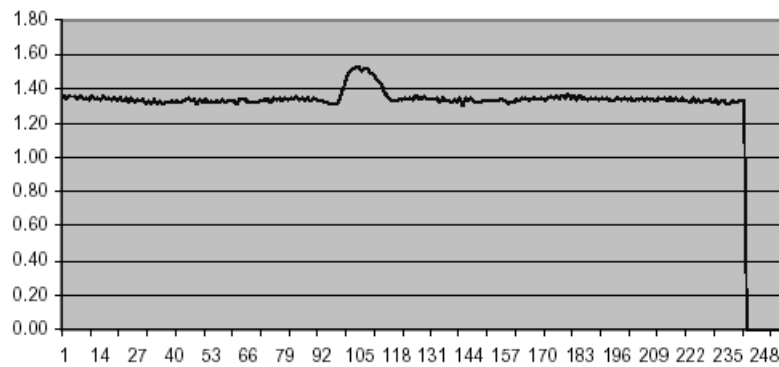


图 20 校准系数



图 21 待校准图像

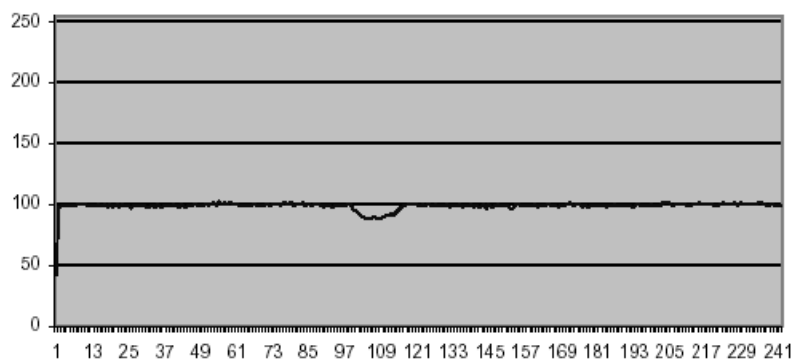


图 22 校准前灰度值

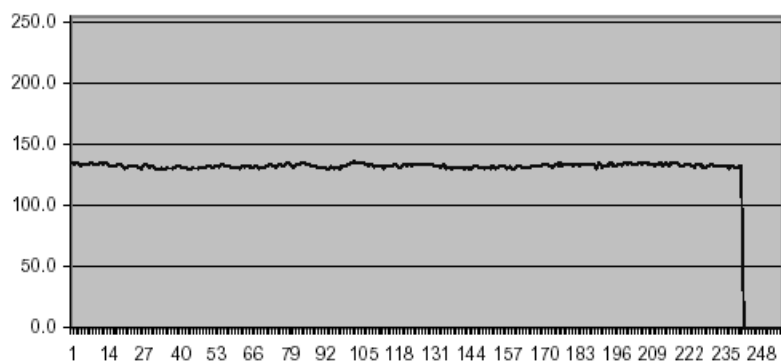


图 23 校准后灰度值

## 6 结语

对机器视觉系统设计方法进行整合，并从理论上进行了相应分析，保证了设计方法的理论正确性。设计方法和理论分析还需进一步完备。

### 参考文献

- 1 Perry West-Automated Vision Systems, Inc.. A Roadmap for Building a Machine Vision System
- 2 Dalsa Inc.. Technical Documents
- 3 Glenn E. Healey, Raghava Kondepudy. Radiometric CCD Camera Calibration and Noise Estimation, IEEE Trans. PAMI, 1994, 16(3): 267~276
- 4 Young-Chang Chang, John F. Reid. RGB Calibration for Color Image Analysis in Machine Vision, IEEE Trans. Image Processing, 1996, 5(10): 1414~1422
- 5 Milan Sonka, Vaclav Hlavac, Roger Boyle. Image Processing, Analysis, and Machine Vision (Second Edition) , 影印版, 北京: 人民邮电出版社, 2002