

# 相机

**相**机是用于拍摄及存储或传输图像的远程传感器。光线经过光学系统收集并聚焦到光敏表面（传感器）上，由此通过化学或电子过程，将电磁辐射的强度和频率转换成信息。

此类最简单的系统由一个暗室或暗箱组成，光线仅从一个小孔进入暗室或暗箱并聚焦到对面的箱壁上，在此可目测或由感光材料（即底片）拍摄。这种成像方法可以追溯到几个世纪前，被称作“camera obscura”（拉丁语为“暗室”）法，现代相机也由此得名。

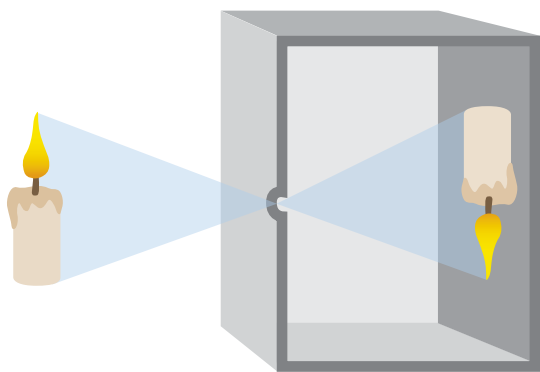


图1：针孔相机工作原理。

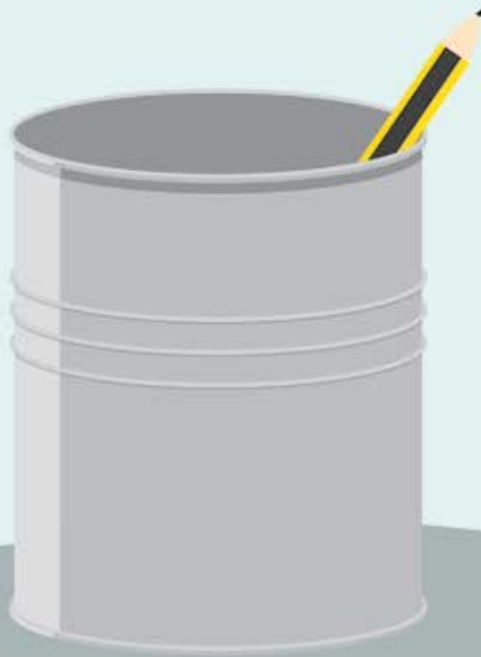
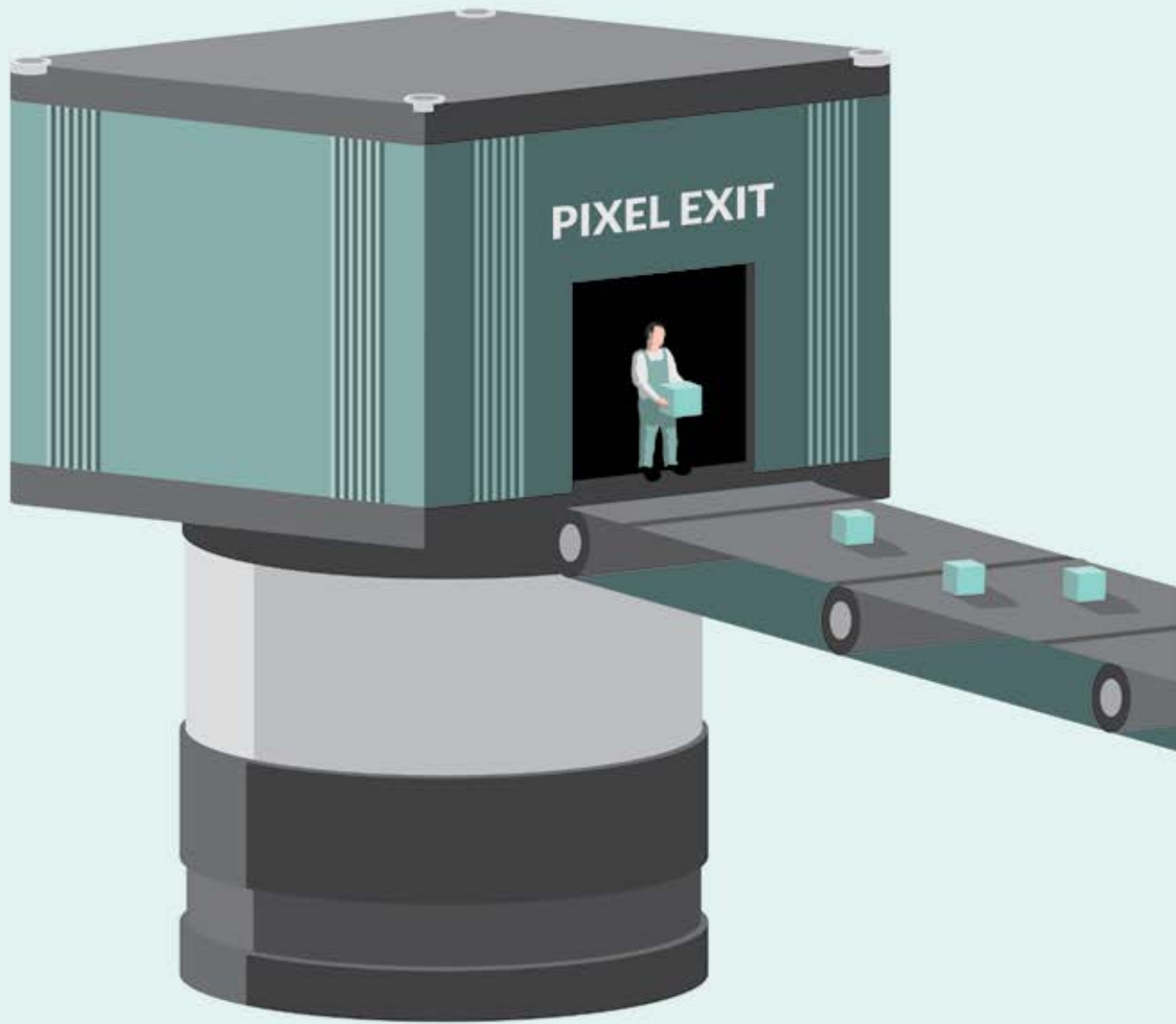


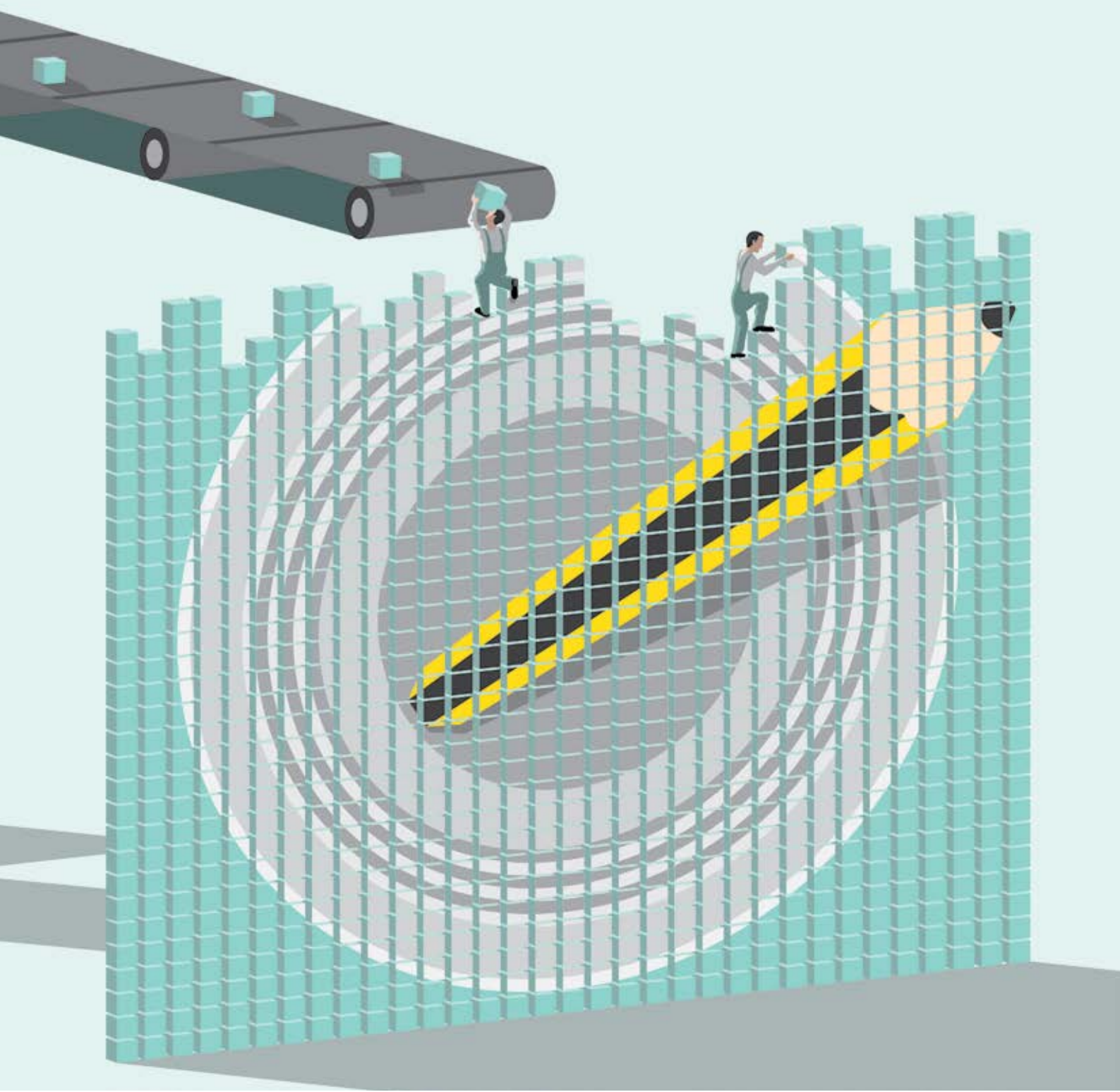
图2：针孔成像：“法国巴黎 Hotel de Ville 一角 (2015)”  
由 Abelardo Morell © 拍摄。

在过去几十年中，随着电荷耦合装置 (CCD) 的开发和近年来 CMOS 技术的发展，相机技术得到了很大改善。之前的标准系统（如电子管摄像机）已停止使用。

图像分辨率和采集速度的提升无疑也提高了机器视觉相机的成像质量及速度。









## 相机类型

### 矩阵相机和线扫描相机

机器视觉系统应用中使用的相机可分为两类：面扫描相机（也称为矩阵相机）和线扫描相机。前者结构更加简单且技术要求更低，后者则是在矩阵相机不适用的情况下的首选方案。面扫描相机使用特定数目的有源元素（像素）拍摄 2-D 图像，线扫描相机传感器则采用单列像素。

### 传感器尺寸和分辨率

传感器尺寸（或格式）通常指定为英制分数值，例如 1/2”、2/3”。但是，传感器的实际尺寸与该分数值并不相同，这常常会使用户发生混淆。这种做法可追溯到 50 年代电视摄像管的时代，且仍作为标准沿用至今。此外，始终有必要查看传感器规格，因为即使两个传感器的规格相同，尺寸和纵横比也可能略有不同。空间分辨率是传感器区域内所包含的有源元素（像素）的数目：分辨率越高越能检测到图像上更加精细的细节。假设我们需要检测一个 30 x 40 mm 的视场，查找 40\*40 μm 的缺陷，缺陷至少由三个像素显示。

总共可能存在  $30*40/(0.04*0.04) = 0.75*10^6$  处缺陷。假设查看一个缺陷至少需要 3 个像素，则我们至少需要一台 2.25 MP 像素的相机。这给出了传感器所需的最低分辨率，但是，必须始终估算整个系统的分辨率（同时包括镜头分辨率）。表 1 简要提供了一些常用的传感器尺寸和分辨率。尺寸相同的传感器可能具有不同的分辨率，因为像素尺寸可能有所不同，强调这一点至关重要。尽管对于给定的传感器规格，像素越小，分辨率越高，但是小像素不一定始终为理想选择，因为其感光性更差且会产生更高的噪声；此外，镜头分辨率与像素尺寸必须始终正确匹配，以确保最佳的系统性能。

传感器类型		1/3"	1/2"	2/3"	1"	4/3"	4 K (线扫描)	8 K (线扫描)	12 K (线扫描)
传感器尺寸	(mm)	4.80 x 3.60	6.40 x 4.80	8.45 x 7.07	12.8 x 9.64	18.1 x 13.6	28.7	41	64
像素尺寸	(μm)	5	5	5	5	5	7	5	5.3
分辨率	(mm)	960 x 720	1280 x 960	1690 x 1414	2560 x 1928	3620 x 2720	4000	8000	12000
分辨率	(像素)	0.6 M	1.2 M	2.5 M	5 M	10 M	4 K	8 K	12 K

表 1: 常用传感器尺寸和分辨率示例。

### 传感器类型: CCD 和 CMOS

数码相机中最常用的传感器技术为 CCD 和 CMOS。

**CCD (电荷耦合器)** 传感器由一块复杂的电路板构成，电路板上具有将光子（光线）转换为电子的光敏半导体元件。元件累积的电荷与曝光时间成正比。

光线被收集到势阱中，随后释放并以不同方式读取（参见图 3）。基本上，所有的架构均将信息传递给寄存器，有时通过无源区进行存储。

电荷随后被放大至可以读取并量化的电压信号。

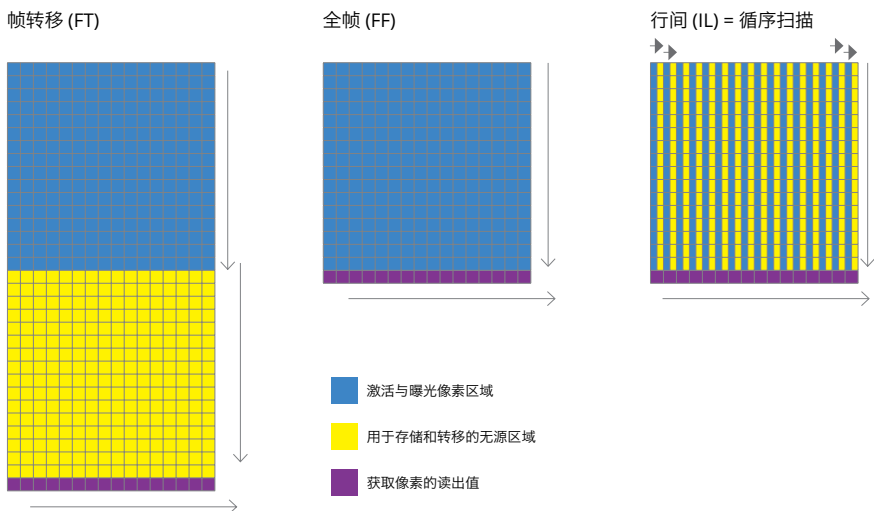


图 3: 电荷耦合装置架构。



**CMOS**（互补金属氧化物半导体）传感器从概念上讲不同于 CCD 传感器，因为读出操作可以逐像素进行，而不是按照顺序模式。事实上，信号在每一个像素位置处放大，因此可大大提高帧率，并可读出操作定义自定义的感兴趣区域 (ROI)。CMOS 和 CCD 传感器几乎同一时期发明，尽管以往认为 CCD 技术更加高端，近年来 CMOS 传感器在性能方面已经赶上 CCD 传感器。

**全局快门与卷帘快门 (CMOS)**。在卷帘快门 CMOS 传感器中，采集过程是从较上行像素逐行进行到末行像素，在第一行与最后一行之间存在 1/帧率的时间差。

读出操作完成后，逐行采集过程可以再次开始。如果物体正在移动，像素间的时间差将清晰体现在图像上，从而导致物体变形（参见图 4）。全局快门的采集方法为同时激活所有像素，因此可避免此问题的发生。



图4：卷帘快门拍摄效果。

## 传感器及相机特性

### 传感器特性

**像素缺陷**可分为三种类型：亮点、噪点和坏点。亮点是无论亮度如何始终饱和的元素（输出最大信号，如全白）。坏点正好相反，始终输出零（黑色）信号。噪点则产生随机的信号。这几种缺陷与亮度和曝光时间无关，因此可以轻松消除，例如利用周围像素的平均值对缺陷进行数字替换。

**噪声**。噪声具有多种类型，可影响实际的像素读值。噪声可能由几何、物理或电子因素引起，可能为随机分布，也可能为恒定分布。以下列出了一些情况：

- 散粒噪声源于光源的离散本性。当亮度很低时 - 就单个像素的微小表面而言 - 光子数随时间的相对起伏非常明显，正如投掷硬币一样，在仅投掷几次时，出现正面或反面的概率会显著偏离 50%。这种起伏即为散粒噪声。
- 暗电流噪声由热效应随机产生的电子引起。热电子的数目以及相应的噪声会随温度及曝光时间的增加而增加。
- 量化噪声关系到连续的原始（模拟）电压值向离散的处理后（数字）电压值的转换过程。
- 增益噪声由不同像素间的性能差异（在灵敏度和增益方面）引起。这是可以测量和消除的“恒定噪声”的一个实例。

**灵敏度**是用于量化传感器对光线响应方式的参数。灵敏度与量子效率紧密相关，量子效率是指有效转换为电子的光子比例。

**动态范围**是传感器采集的最大信号与最小信号的比值。达到上限后，像素对于任何更高的亮度值呈现白色（饱和），而在达到或低于下限时，像素呈现黑色。

动态范围通常表示为最大值与最小值的比值的对数值，也可以用以 10 为底的对数（分贝）或以 2 为底的对数（倍数或光圈数）表示，如下所示。例如，人眼能够分辨星光或烈日下的物体，在这两种情况下，亮度差异为 90 dB。然而该范围不可同时使用，因为人眼需要时间以适应不同的光线条件。

优质 LCD 的动态范围约为 1000:1，一些最新的 CMOS 传感器的动态范围测量值约为 23 000:1（在光圈数为 14.5 时测得）。

比例因子	分贝	光圈数
1	0	0
2	3.01	1
3.16	5	1.66
4	6.02	2
10	10	3.32
32	15.1	5
100	20	6.64
1024	30.1	10
10 000	50	13.3
1 000 000	60	19.9
1 073 741 824	90.3	30
10 000 000 000	100	33.2

表2：动态范围D、分贝(10 log D) 和光圈数(log<sub>2</sub> D)。



SNR（信噪比）用于表示噪声的存在，由于存在噪声，动态范围所定义的理论最低灰度值通常无法达到。SNR 是最大信号与总噪声的比值，单位为 dB。SNR 的最大值受限于散粒噪声（由光的物理本质决定，因此无法避免），可以近似表达为

$$SNR_{\text{最大值}} = \sqrt{\text{开根号[单一像素中电子的最大饱和容量]}}$$

SRN 给出了灰度级的极限，灰度级在模拟信号（连续）与数字信号（离散）的转换中很有意义。例如，如果最大 SNR 为 50 dB，最好选择 8 bit 传感器，因为这种传感器的 256 灰度级与 48 dB 相对应。使用灰度级更高的传感器意味着产生特定等级的纯噪声。

光谱灵敏度参数用于描述不同波长的光线放射光能量的效率。人眼有三种不同类型的感光细胞，这些感光细胞对不同波长的可见光的敏感度不同，因此整体敏感度曲线结合了三种不同细胞。机器视觉系统通常基于 CCD 或 CMOS 相机，可检测到波长为 350 至 900 nm 的光线，其中峰区波长介于 400 到 650 nm 之间。各种不同的传感器也可检测紫外光谱，或者检测近红外光谱（与紫外光谱相对），检测波长更长的光线（如短波红外线或长波红外线）需要截然不同的技术。

## EMVA 标准 1288

EMVA 标准 1288 对描述传感器特性和质量的不同参数进行了集中明确的表述。该标准列出了为全面描述传感器实际行为而必须提供的基本参数，以及为获得这些参数而明确定义的测量方法。

标准参数包括：

- 灵敏度、亮度信号的线性度以及噪声
- 暗电流（取决于温度：可选）
- 传感器非均匀性及缺陷像素
- 光谱灵敏度（可选）



	灵敏度，线性度和噪声	暗电流	传感器非均匀性和缺陷像素	光谱灵敏度
测量步骤	通过逐渐增加曝光时间（从快门关闭直到饱和）测量曝光量。光量由此测得（如光度计）	由曝光时间逐渐增加的暗图像测得。由于暗电流取决于温度，因此可给出不同温度下的值	在无光情况下（目的为查看亮点）以 50% 饱和度拍摄多张图像。空间变形参数由傅立叶算法计算得出	在不同波长的光线条件下拍摄图像
结果	量子效率（转化的光子数与入射总光子数的百分比 (%)）	无光时产生的信号，以每秒电子数计	明暗信号的不均匀性	光谱灵敏度曲线
	暗噪声，以电荷单位 (e-) 计		明暗光谱图和（对数）直方图	
	绝对灵敏度（产生信号所需的最小光子数）			
	动态范围，以光圈数表示			
	SNR，以光圈数表示			
	饱和容量（饱和时的最大电子数）			

## 相机参数

**曝光时间**是允许光线照射到传感器的时间。该值越高，进光量越多。

当光源不足时，增加曝光是首选且简易的解决方案，但这会带来一些问题：首先，噪声始终随曝光时间的增加而增加；此外，拍摄移动物体时可能产生模糊效应。事实上，如果曝光时间过长，物体将在若干不同像素上成像，这将造成众所周知的“动态模糊”效应。

另一方面，过长的曝光时间将导致曝光过度 - 即多个像素达到最大进光量并因此呈现白色，即使每个像素点上的亮度实际并不相同也是如此。



图5：动态模糊效应。

**帧速率。**帧速率为传感器拍摄完整图像的频率，通常以每秒帧数 (fps) 表示。

显然，帧速率必须适应具体应用需求：每分钟检测 1000 个瓶子的生产线必须能够以  $1000/60 = 17$  fps 的最低帧速率拍摄图像。

**触发。**大多数相机可以控制采集过程的开始，并根据具体应用进行调节。

对于典型的触发系统而言，在从外部设备（如位置传感器）接收到输入后，光源与图像采集设备同时激活。

该技术可确保感兴趣的特征处于成像系统的视野之内，因此在拍摄移动物体图像时至关重要。

**增益**在数码相机中是指捕获的电子数与模数转换装置 (ADU) 生成的电子数（即图像信号）之间的关系。提高增益意味着提高 ADU 与捕获电子数之间的比例，这将导致图像亮度显著增加。显然，该过程也会增加图像噪声，因此总体 SNR 保持不变。

**像素组合**是组合传感器邻近像素读出值的相机功能，组合通常采用行/列的形式， $2 \times 2$  或  $4 \times 4$  正方形形式（参见图 6）更为常见。尽管分辨率必然会降低，但多项其他特征将会改善。例如， $2 \times 2$  组合时，分辨率将减半，但灵敏度和动态范围将增加到 4 倍（因为计算每一势阱的容量总和），读出时间减半（帧速率加倍），噪声减为原来的四分之一。

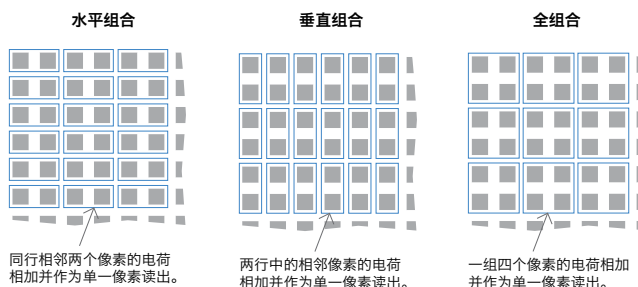


图 6：传感器组合。

## 数码相机接口

### Camera Link



**自动成像协会 (AIA) 标准**（通常称为 Camera Link）是一项针对数字视频的高速传输的标准。AIA 标准定义了相机与图像采集卡之间的电缆、连接器和相机功能。

**速度。**Camera Link 可提供超高的速度性能。通常可选用不同的带宽配置，例如 255 MB/s、

510 MB/s 和 680 MB/s。带宽决定了图像分辨率和帧速率的比值：典型的基本配置相机能够以 50 帧/秒或更高的速度采集 1 兆像素的图像；完全配置相机能够以超过 100 帧/秒的速度采集 4 兆像素的图像。Camera Link HS 是在单线路上达到 300 MB/s 的新一代标准（在 20 线路上高达 6 GB/s）。

**成本。**Camera Link 可实现中高性能采集，因此，更加昂贵的相机通常采用这一标准。此外，该标准需要图像采集卡以处理巨大的数据负荷，其他标准则无此项要求。

**电缆。**Camera Link 标准所定义的最大电缆长度为 10 m；基本配置相机需要一条电缆，完全配置相机则需要两条电缆。

**通过电缆供电。**Camera Link 可通过 PoCL 模块 (Power over Camera Link) 为相机供电。此外，若干采集卡也支持这一功能。

**CPU 使用量。**由于 Camera Link 使用图像采集卡，采集卡作为独立模块将图像传输至电脑，因此这一标准并不会消耗大量的系统 CPU。



## CoaXPress



**C**oaXPress 是在 Camera Link 之后开发的第二代标准。该标准基本上包括基于同轴电缆的设备电源、数据和控制信号传输。

**速度。**如果使用单一电缆，将控制数据从设备传输到图像采集卡时的速度可以达到

781.25 MB/s，从图像采集卡传输到远程设备时的速度可以达到 20 Mbit/s，该速度是 GigE 带宽的 5 - 6 倍。一些型号可以半速运行 (390.625 MB/s)。目前，图像采集卡最多可并行连接 4 条电缆，从而达到约为 1800 MB/s 的最大带宽。

**成本。**在最简单的情况下，CoaXPress 使用单根同轴电缆传输数据，同轴电缆是一种简便且低成本解决方案。否则，需要图像采集卡，也就是必须安装附加板卡，这将带来额外的系统成本。

**电缆。**全带宽下的最大电缆长度为 40 m，半带宽下的最大电缆长度为 100 m。

**通过电缆供电。**提供的电源为 24 V，最高可提供 13 W 的功率，这能够满足大多数相机的需要。

**CPU 使用量。**CoaXPress 与 Camera Link 类似，使用图像采集卡，采集卡作为独立模块将图像传输至电脑，也就是说，该标准对系统 CPU 的消耗非常小。

## GiG-E



**G**ig-E Vision 是一种对 Gigabit Ethernet 进行标准化的相机总线技术，可向 Gigabit Ethernet 新增“即插即用”功能（例如设备搜索）。该技术的优势在于带宽相对较高、电缆长度较长并且应用广泛，因此成为工业应用的良好解决方案。

**速度。**Gigabit Ethernet 具有 125 MB/s 的最大理论带宽，考虑到实际情况的限制，最大理论带宽降到 100 MB/s。该带宽堪比火线标准，且仅次于 Camera Link 标准。

**成本。**GigE Vision 的系统成本适中；电缆较便宜并且无需图像采集卡。

**电缆。**电缆长度是 GigE 标准的关键因素，最长可达 100 m。对于电缆长度而言，这是唯一比得上模拟图像的数字解决方案，并且该功能现已帮助 GigE Vision 取代模拟解决方案（例如监控应用）。

**通过电缆供电。**GigE 相机通常提供以太网供电 (PoE)。但是，有些以太网卡不能提供足够的电力，因此必须使用有源交换机、集线器或以太网电源供电。

**CPU 使用量。**GigE 系统的 CPU 负荷可能根据所使用驱动程序的不同而不同。过滤驱动程序更为通用，且易于创建和使用，但在上层操作数据包，从而会对系统 CPU 负荷产生影响。优化的驱动程序专为特定的网络接口卡编写，工作在更低层，因此不会对系统 CPU 负荷产生太大影响。

## USB 3.0



**U**SB (通用串行总线) 3.0 标准是 USB 标准的二次修订版，专为计算机通信而开发。USB 3.0 基于 USB 2.0 标准构建，可提供更高的带宽和高达 4.5 W 的电力。

**速度。**USB 2.0 的最大速度为 60 MB/s，USB 3.0 的速度可以达到 400 MB/s，因此，该标准类似于中等配置中所使用的 Camera Link 标准。

**成本。**USB 相机成本通常较低；并且无需视频采集卡。因此，USB 是市场上成本较低的相机总线。

**电缆。**无源 USB 3.0 电缆的最大长度约为 7 米，有源 USB 3.0 电缆在配合中继器使用的情况下可以达到 50 m 的长度。

**通过电缆供电。**USB 3.0 可提供高达 4.5 W 的电力，因此无需使用额外的供电线。

**CPU 使用量。**USB 3.0 Vision 可以将图像直接传输至 PC 内存，因此无需占用 CPU。

## GenIcam 标准



**G**enIcam 标准 (GENeric Interface for CAMeras) 旨在为所有相机提供独立于相机硬件的通用软件接口。一些新技术标准基于 GenIcam (如 Camera Link HS、CoaXPress 和 USB3 Vision)。

GenIcam 标准的目的是为每个图像系统提供“即插即用”功能。该标准包含三个模块，可以采用通用方式处理机器视觉领域中的主要任务：

- GenApi: 使用描述文件 (XML) 实现相机配置和访问控制
- 标准功能命名协定 (SFNC): 为相机中的常用功能提供推荐名称，以实现互用性目标
- GenTL: 描述传输层接口，该接口可设置相机、采集图像并将图像传输至用户接口