

## 第四章 光与光学

了解光在物理世界中的传播方式对理解虚拟现实至关重要。一个原因是这关系着视觉的显示和光线如何在我们的眼界面成像。光线从显示器发出，以重现光线的方式到达视网膜。在目前这一代 VR 头戴式设备中，工程镜头和人眼系统是成像的研究对象。研究光传播的另一个原因是虚拟世界的构建。第 3 章涵盖了理论的几何建模方面。接下来就是在虚拟世界里模拟物理世界的光传播，这将在第 7 章继续讲解，第七章介绍了什么内容应该在视觉显示器上呈现。最后，光线传播也有助于理解相机如何工作，这为提供虚拟世界提供了另一种方式：通过全景视频。相机对于追踪也很重要，这将在第 9.3 节讨论。

4.1 节介绍了光的基本物理特性，包括它与材料及其光谱特性的相互作用。第 4.2 节提供了镜头如何工作的理想模型。然后，4.3 节将展示镜头行为偏离理想模型的许多方式，这从而降低 VR 体验。在第 5 章中详细介绍了眼睛和人类视觉之前，4.4 节介绍了人眼作为镜头的光学系统，第 4.5 节介绍了可视为工程眼睛的相机。

### 4.1 光的基本行为

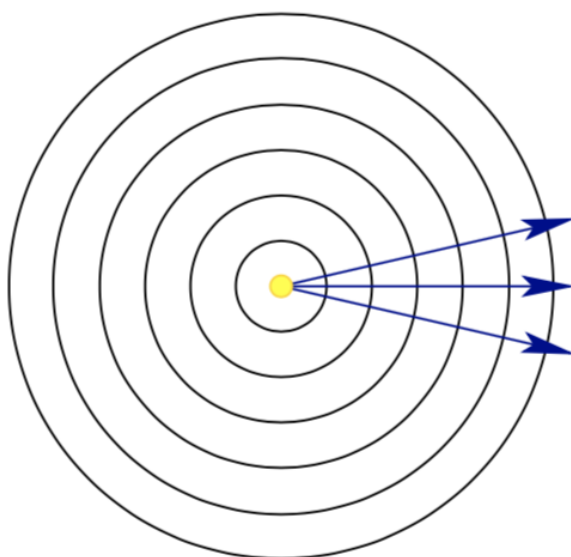


图 4.1：从点光源发出的波和可见光线。

光可以用三种看起来相互矛盾的方式来描述：

1. 光子：在空间中高速移动的微小能量粒子（本书不需要量子力学！）。当考虑传感器或接收器接收的光子数量时，这种解释是有帮助的。
2. 光波：通过空间的波纹，类似于在水面上传播的波浪，但是是三维的。波长是峰值之间的距离。在研究颜色的光谱时，这种解释是有帮助的。
3. 光线：光线追踪单个假想光子的运动。方向垂直于波前（见图 4.1）。这个解释在解释镜头和定义可见性概念时很有用。

幸运的是，现代物理学已经证明了这些解释实际上是如何相容的；在本书中每个都很有用。

## 扩散波

图 4.1 显示了波如何从一个假想点光源传播。所有方向的密度都是相同的(径向对称)，但随着距离光源越来越远,密度会越来越小。重新命名半径为  $r$  的球体的表面积为  $4\pi r^2$ 。考虑围绕光源对准球形屏幕，每秒击中半径为 1 的屏幕的光子总数应该与半径为 2 的屏幕相同；然而，密度（每秒每个区域的光子数）应该减少  $1/4$ ，因为它们分布在面积的 4 倍以上。因此，光子密度随距离点光源的距离而二次减小。

随着点光源变得越来越远，波前的曲率也慢慢减小。如果光波无限地传播，那么它们将完全变平，如图 4.2 所示。这导致平行波前的重要情况。没有镜头或镜子的帮助，实际上不可能从物理世界中的微小光源获得这种情况，因为它不可能如此遥远；然而，它既是远距离光源的有用近似，也是数学描述透镜的理想方法。请记住，在与点光源有限的距离内，光线始终发散；没有镜头或镜子的帮助，就不可能使它们汇合。

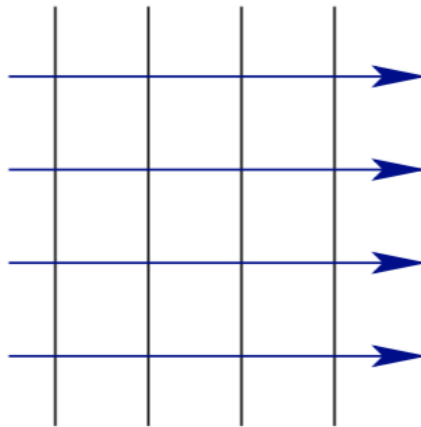


图 4.2：如果点光源离“无限远”，那么将获得平行波前。此设置的其他名称包括：平行光，平行光线，无限远光线，无穷远光线和零聚散度。

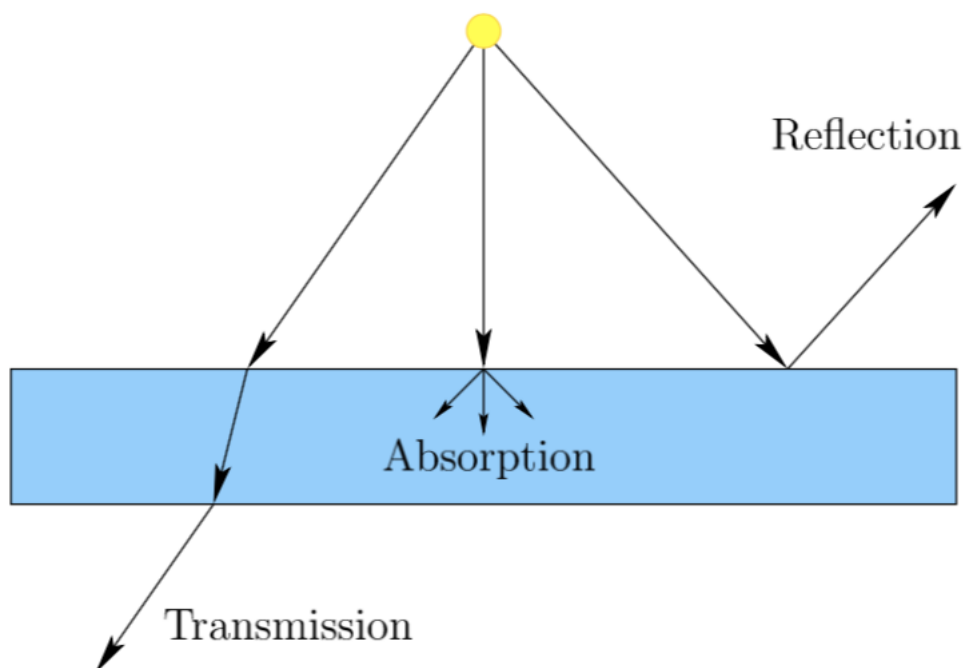


图 4.3：当光能碰到不同介质的边界时，有三种可能性：透射，吸收和反射。

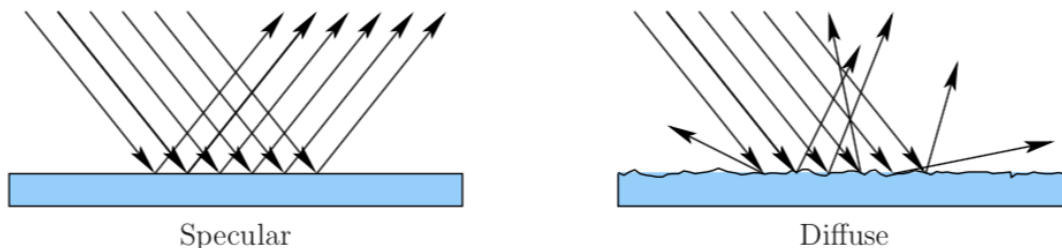


图 4.4: 显示了两种极端的反射模式。 镜面反射意味着所有光线都以相同的角度反射。 漫反射意味着光线散射的方式与其接近角度无关。 镜面反射对于抛光表面（例如镜子）是常见的，而漫反射对应于粗糙表面。

### 与材料的相互作用

当光线撞击材料表面时，可能会发生三种行为之一，如图 4.3 所示。在透射的情况下，能量穿过材料并从另一侧离开。对于像玻璃这样的透明材料，透射光线会按照斯涅尔定律减速并弯曲，这将在 4.2 节中介绍。对于不透明的半透明材料，射线在离开之前会散射到各个方向。在吸收的情况下，当光被捕获时，能量被材料吸收。第三种情况是反射，其中光线从表面偏转。沿着完美光滑或抛光的表面，光线以相同的方式反射：出射角等于入射角。如图 4.4。这种情况称为镜面反射，与漫反射相反。反射光线在任意方向上散射。通常，所有三种传播，吸收和反射的情况同时发生。在这些情况之间划分的能量数量取决于许多因素，例如接近角度，波长以及两种相邻材料或介质之间的差异。

### 一系列波长

图 4.1 给出了一个过于简单化的视图，可以很容易地理解 4.2 节中的理想镜头。 不幸的是，它忽略了许多在其他设置中变得重要的细节，例如了解镜头像差（第 4.3 节）或光与物理世界中的材料如何相互作用。因此本节的其余部分考虑了出现的各种现实出现的问题。

### 相干与混杂的光线

第一个复杂因素是光源通常不会发出相干光，这个术语意味着波前完全在时间和空间上对齐。 激光是一种确实会产生相干光的特殊情况。 它发出一个恒定波长的并行波，这些波也在时间上同步，以便它们的峰在它们传播时对齐。 常见的光源，如灯泡和太阳，反而会发出一系列具有不同波长的波，并且没有对齐它们的峰。

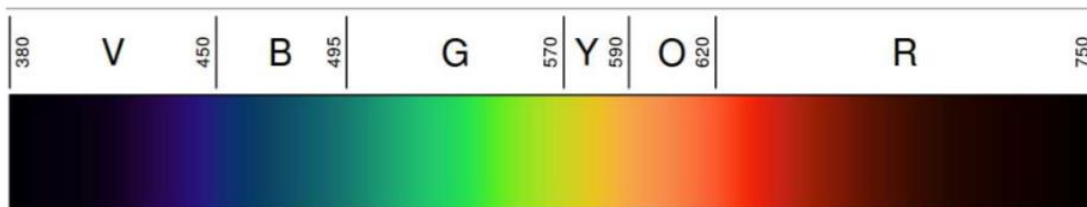


图 4.5: 可见光谱对应于波长在 400nm 和 700nm 之间的电磁波的范围。（图自维基百科的大卫埃克斯）

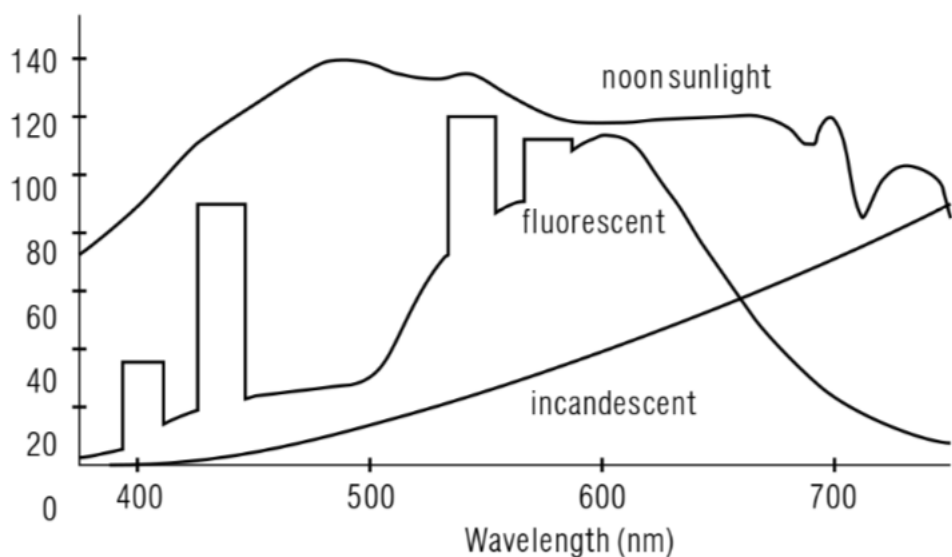


图 4.6：一些常见光源的光谱功率分布。（图[292]）。

### 波长和颜色

为了从混合的波中理解，我们将描述它们在波长方面如何分布。图 4.5 显示了人类可见的波长范围。每个波长对应一个光谱颜色，这就是我们用一个固定在那个波长上的相干光源会感知到的。700 至 1000nm 之间的波长称为红外线，这对我们来说是不可见的，但有些相机可以感知它们（参见第 9.3 节）。100 到 400nm 之间的波长称为紫外线；它们也不是我们可见光谱的一部分，但是一些鸟类，昆虫和鱼类可以感知超过 300nm 的紫外线波长。因此，我们关于可见光的概念已经与人类的看法联系在一起。

### 光谱功率

图 4.6 显示了如何为常见光源分配波长。一个理想的光源将具有所有可见波长表示的相同的能量，从而产生理想化的白光。相反的是完全黑暗，这是黑色的。我们通常不允许光源将光线直接传播到视网膜上（不要盯着太阳！）。相反，我们观察周围物体反射的光线，使我们感觉到它们的颜色。每个表面都有自己的反射波长分布。反射回来的光能部分取决于波长，导致如图 4.7 所示的曲线。对于我们将物体表面视为红色，红色波长必须包含在光源中，表面必须强烈反射红色波长。其他波长也必须被抑制。例如，光源可能是白色（包含所有波长），并且物体可能强烈反射所有波长，导致表面呈现白色而不是红色。6.3 节将提供色彩感知的更多细节。

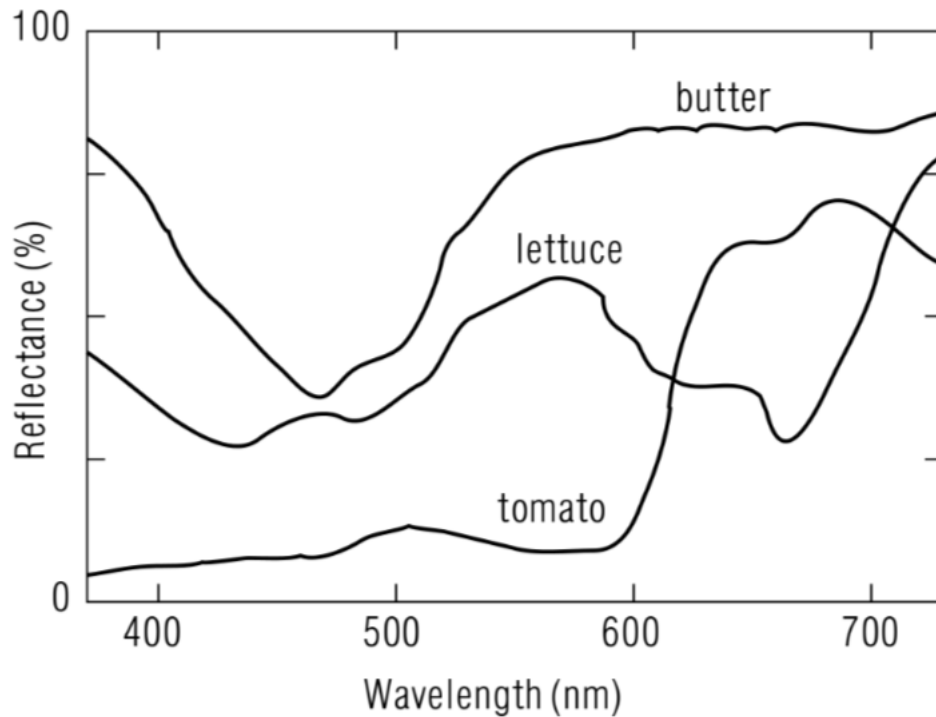


图 4.7：一些常用材料的光谱反射功能。（图[292]）。

## 频率

通常情况，谈论频率而不是波长是有用的。频率是波峰每秒通过固定位置的次数。使用波长  $\lambda$  和速度  $s$ ，频率  $f$  计算如下：

$$f = \frac{s}{\lambda}. \quad (4.1)$$

光在真空中的速度通用常数  $c$  表示，其值约等于  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。在这种情况下，(4.1) 中的  $s = c$ 。光在真空中的传播速度比在空气中大约快 0.03%，这使得在大多数工程计算中差异被忽略。空气中可见光的频率范围大约为 400 至 800 太赫兹，这通过应用 (4.1) 获得。随着光线通过密度较大的介质（如水或透镜）传播， $s$  明显变小；这种差异是光学系统的基础，下面将会介绍。

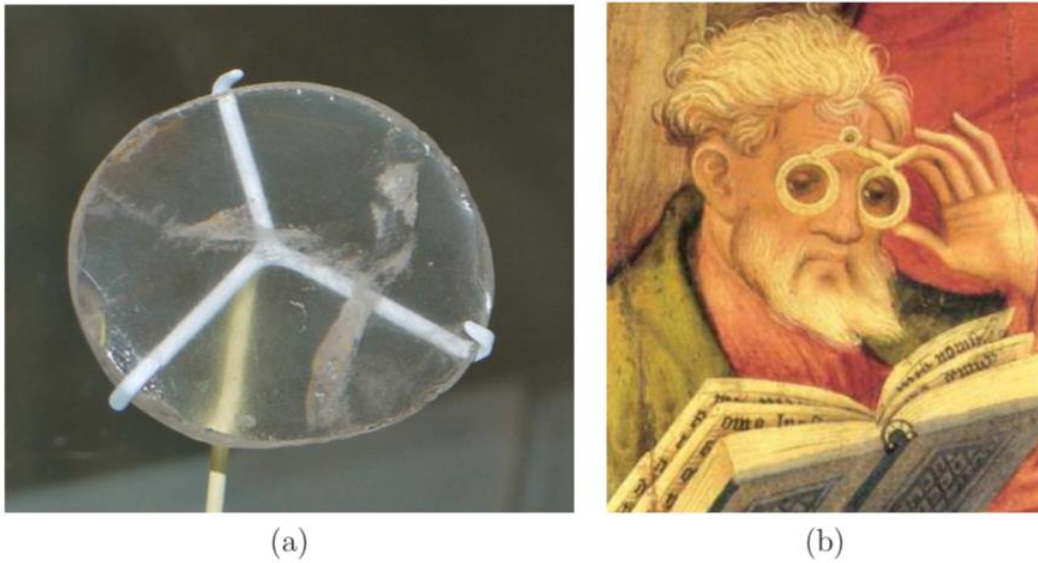


图 4.8: (a) 最古老的已知人造透镜, 在古代亚述尼姆鲁德的公元前 750 年至前 710 年制作而成。目前还不知道这个神器是纯粹的装饰物还是用来制作聚焦的图像的。图片来自大英博物馆。(b)1403 年由 Conrad Soest 绘制的一幅画, 显示老年男性使用老花镜。

## 4.2 镜头

镜头已经制造了数千年, 其中最古老的已知工件如图 4.8 (a) 所示。它在公元前 700 年建于亚述尼姆鲁德。无论是透明材料还是用作反射镜的抛光表面, 透镜都会弯曲光线, 从而形成聚焦图像。几个世纪以来, 它们的使用造就了几种著名的设备, 如眼镜 (图 4.8 (b)), 望远镜, 放大镜, 望远镜, 照相机和显微镜。因此, 光学工程充满了设计模式, 以说明如何优化这些易于理解的设备的设计。VR 头戴式耳机与传统光学设备不同, 导致许多超出了几个世纪以来存在的标准模式的新的挑战。因此, VR 的镜头设计模式仍在编写中。解决当前挑战的第一步是了解简单镜头的工作原理。

### 斯内尔定律

镜片的工作原因是斯涅耳定律, 它表达了当进入或退出透明材料时光线有多少弯曲。回想一下, 介质中的光速小于真空中的速度  $c$ 。对于给定的材料, 将其折射率定义为:

$$n = c / s \quad (4.2)$$

其中  $s$  是介质中的光速。例如,  $n = 2$  意味着光线穿过介质的时间是真空的两倍。对于一些常见的例子, 空气  $n = 1.000293$ , 水  $n = 1.33$ , 冠玻璃  $n = 1.523$ 。

图4.9显示了入射光波和射线的情况。假设在这个例子中, 光从空气传播到玻璃, 所以  $n_1 < n_2$ 。令  $\theta_1$  表示相对于表面法线的入射角, 并让  $\theta_2$  表示通过材料时得到的角度。斯内尔定律将四个量相关联:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2.$$

典型地, 给出  $n_1 / n_2$  和  $\theta_1$ , 使得 (4.3) 求解  $\theta_2$  来获得:

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left( \frac{n_1 \sin \theta_1}{n_2} \right).$$

如果  $n_1 < n_2$ ，则  $\theta_2$  比  $\theta_1$  更接近于垂直。如果  $n_1 > n_2$ ，则  $\theta_2$  离垂直更远。 $n_1 > n_2$  的情况也是有趣的，因为如果入射角  $\theta_1$  太大，光可能不能穿透表面。 $\sin^{-1}$  的范围是 0 到 1，这意味着 (4.4) 仅在以下公式才提供  $\theta_2$  的解：

$$(n_1/n_2) \sin \theta_1 \leq 1.$$

如果上述条件不成立，那么光线就会从表面反射出来。这种情况发生在水下并仰望表面时。取决于观察角度，游泳者可能会看到反射，而不是能够看到上面的世界。

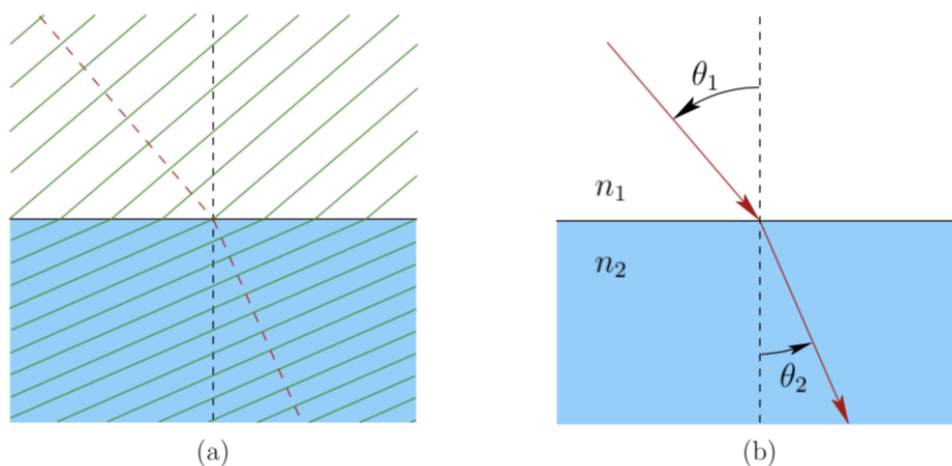


图4.9：从折射率较低的介质（如空气）传播到具有较高折射率的介质（如玻璃）。（a）当波前进入较低介质时，显示较慢传播对波前的影响。（b）这显示了总是垂直于波前的光线弯曲的结果。斯涅耳定律将折射率和角度与  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$  相关联。

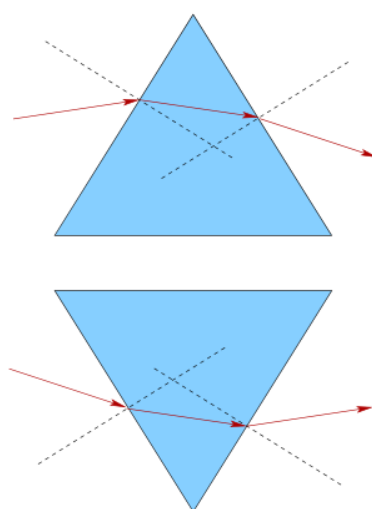


图 4.10：上半部分说明只要入射光线的斜率不太高，一个简单的棱镜可将向上的光线弯曲成向下的光线。



这是通过在进出边界应用斯内尔定律实现的。将棱镜倒置会导致向下光线上升。把它们放在一起，我们会看到，一个透镜就是棱镜的组合，它们迫使发散的光线通过折射实现会聚。

## 棱镜

设想利用如图 4.10 的方法通过棱镜照射激光束。斯内尔定律可以用来计算光线进入和退出棱镜后的弯曲方式。对于垂直棱镜，略微向上的光线经过棱镜后向下弯曲，棱镜的折射率越大，会导致更大的弯曲。通过将棱镜倒置，向下的光线会向上弯曲。一旦折射率固定，弯曲仅取决于射线进入和离开表面的角度，而不取决于棱镜的厚度。为了生成一个透镜，我们将利用这个原理并构建一种图 4.10 的曲面版本。

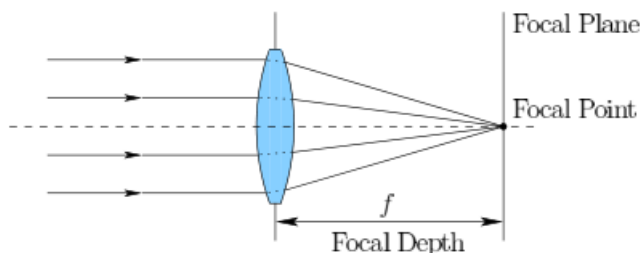


图 4.11：一个简单的凸透镜会使平行光线聚焦在焦点处。虚线为光轴，它垂直于镜头并穿过其中心。

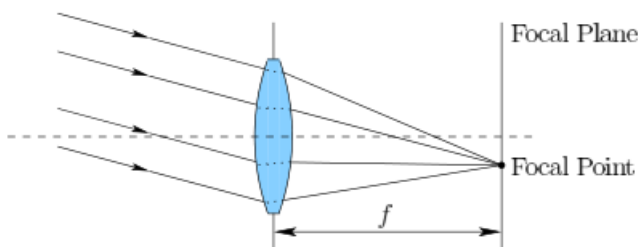


图 4.12：如果光线不垂直于透镜，则焦点偏离光轴。

## 简单的凸透镜

图 4.11 展示了一个简单的凸透镜。镜头表面不再是菱形，而是球状弯曲的，这可以使得平行的水平入射光线会聚到镜头另一侧的一个点上。这个特殊的聚合地点被称为焦点。它与镜头中心的距离称为焦距。

图 4.11 的入射光线有两个特点：1) 它们是平行的，因此对应于无限远的光源；2) 它们垂直于透镜的中心平面。如果光线平行但不垂直于透镜平面，则焦点相应地移动，如图 4.12 所示。在这种情况下，焦点不在光轴上。平行入射光线方向有两个自由度，对应了包含所有可能焦点的聚焦平面。不幸的是，这种平面度只是一个近似值；4.3 节则解释了这其中实际发生的事情。基于这种理想化的设定下，真实图像生成在图像平面上，就好像是一个投影屏幕，显示了世界在镜头前的样子（假设世界上的所有物体都很遥远）。如果光线不平行，那么仍然可以将它们聚焦成真实图像，如图 4.13 所示。假设透镜焦距为  $f$ 。如果将光源

源放置在与透镜距离为  $s_1$  的位置，当且仅当满足以下等式（斯内尔定律）时，经过该透镜的光线才会聚焦：

$$\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} = \frac{1}{f} \quad (4.6)$$



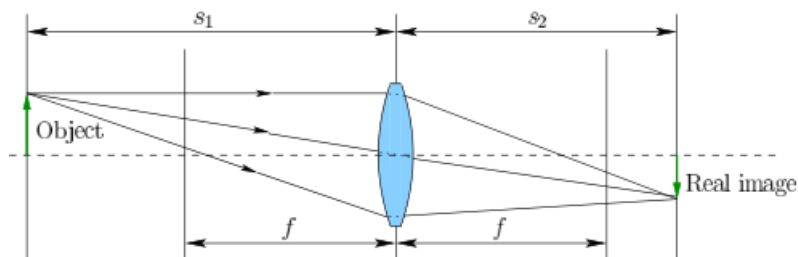


图 4.13: 在现实世界中, 一个物体并不会是无穷远的。如果使用 (4.6) 计算, 当物体距离透镜  $s_1$  时, 实际图像形成平面位于透镜后方  $s_1 > f$  处。

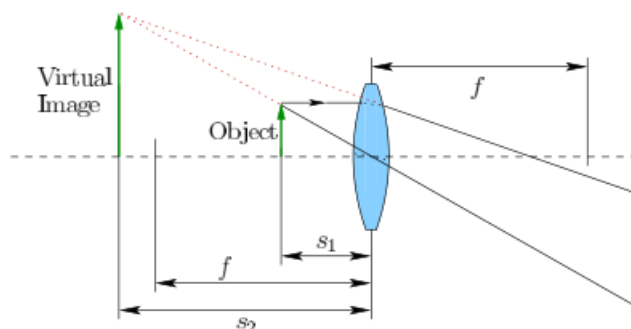


图 4.14: 如果物体非常接近透镜, 那么透镜不能强制出射光线会聚至某一点。但在这种情况下会出现一个虚拟图像, 透镜的作用为放大镜。这是通常用于 VR 设备的方式。

图 4.11 对应于  $s_1$  无穷大的理想情况, 对此求解 (4.6) 得到  $s_2 = f$ 。如果被观察物体位于与镜头垂直的平面中但不完全平坦, 该怎么办? 实际上在这种情况下, 不存在可以将整个物体聚焦单个平面, 我们必须接受这样一个事实, 即只有大部分内容可以被汇聚起来。更糟糕的是, 现实世界中绝大部分都是这样的情况, 包括我们眼睛的会聚功能 (见 4.4 节)。

如果光源放置得离镜头太近, 那么出射光线可能会发散, 以至于镜头不能强制会聚。如果  $s_1 = f$ , 则出射光线将平行 ( $s_2 = \infty$ )。如果  $s_1 < f$ , 则根据 (4.6) 得到  $s_2 < 0$ 。在这种情况下, 不形成真实图像; 但此时会发生一种有趣的现象: 放大现象, 也就是当我们看着镜头时会出现虚像, 如图 4.14 所示。这正是图 2.11 所示的 View-Master 和 VR 头戴式设备发生的情况。

### Lensmaker 方程

对于一个给定的简单透镜, 焦距  $f$  可以使用 Lensmaker 等式计算得到:

$$(n_2 - n_1) \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) = \frac{1}{f} \quad (4.6)$$

参数  $r_1$  和  $r_2$  分别表示透镜前后表面的曲率半径。该公式假设透镜很薄, 这意味着镜头厚度相对于  $r_1$  和  $r_2$  来说非常小。此外, 通常假定  $n_1 = 1$ , 为空气的折射率。

## 凹面镜片

为了完整起见，我们还给出了简单凹型透镜的情况，如图 4.15 所示。平行光线经过凹型透镜被迫发散，而不是会聚；然而，该情况仍可以通过反向延散发射线找到焦点，因而也有负焦距的概念。该情况下，Lensmaker 公式（4.7）需要稍调才可计算  $f$  [104]。

## 屈光度

VR 光学系统中，单个镜头通过连续组合几个透镜的方式构成。这样组合的效果是什么呢？眼科医生则提出了一种用简单算术来解决这个问题。该想法是定义一个屈光度  $D$ ， $D = 1/f$ ，即焦距的倒数。如果透镜将平行光线聚焦在镜头后方 0.2m 处，则  $D = 5$ 。较大的屈光度表示较强的聚焦能力。对于凹透镜而言， $D < 0$ ，则较低的数值意味着较强的发散能力。为了连续组合多个透镜，我们只需利用到它们的屈光度，便可确定其作为单个简单镜片时的等效功率。图 4.16 展示了一个简单的例子。

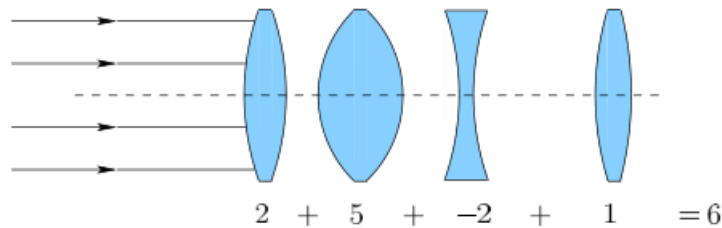


图 4.16：计算透镜链光强度的方式十分简单：将它们各自的屈光度代入加法计算。这四个透镜的配置相当于一个 6 屈光度的镜头，其焦距为 0.1667 米

## 4.3 光学畸变

如果现实世界中的镜头完全按照 4.2 节中的描述进行光线会聚或发散，那么 VR 系统将简单得多，且令人印象深刻。事实上，许多统称为畸变的缺陷会降低由镜头形成的图像质量。由于这些问题在日常使用中都很明显，例如通过 VR 设备观看内容，因而这些问题非常重要，需要采取相关的补偿措施并应用到 VR 系统中。

### 色差

回顾一下 4.1 节的内容，光通常是一束具有波长光谱的波。你可能看到过，当白光通过棱镜折射时，整个可见光谱按颜色被很好地分开。这是一个美丽的光学现象，但对于镜头来说，这是非常糟糕的，因为它分散了图像的各种颜色成分。这个问题被称为色差。

问题的实质在于通过介质的光速取决于波长。因此，我们设定介质的折射率  $n(\lambda)$  以表示它是  $\lambda$  的函数。图 4.17 展示了简单凸透镜的色差现象。此时，焦距为波长的函数。如果我们沿着相同的光线将红色，绿色和蓝色激光直接照射到镜头中，则每种颜色的光线会在不同的位置穿过光轴，产生红色，绿色和蓝色焦点。

回顾 4.1 节的光谱功率分布和反射函数。对于常见的光源和介质，透过头的光线会形成连续的焦点集合。图 4.18 显示了一个具有色差伪像的图像。因而可以通过组合不同介质的凸透镜和凹透镜减少色差，使得发散的射线被强制收敛[298]。

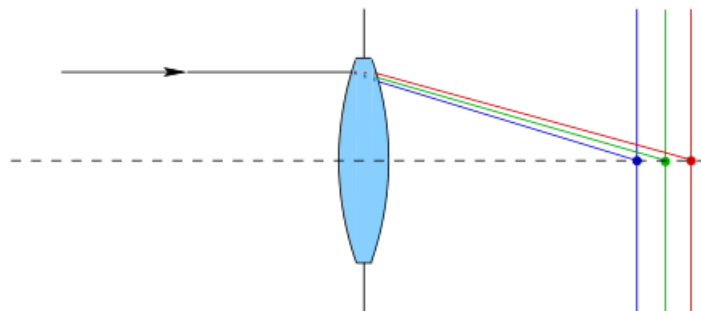


图 4.17：色差是因不同波长的光线在同一介质内的不同光速所引起的，导致每种颜色的光线都有不同的聚焦平面。



图 4.18：上子图被适当地聚焦，而下子图遭受了色差问题。（图由 Stan Zurek 提供）

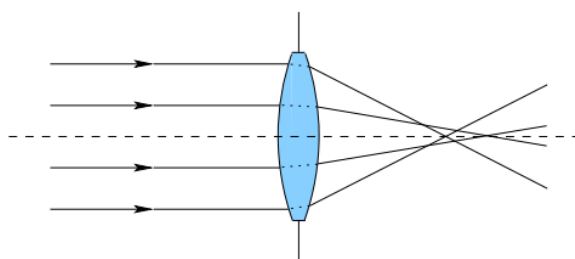


图 4.19：球面像差引起焦点无法聚集，因为远离光轴的光线比周边的光线折射更厉害。

### 球面像差

图 4.19 显示了球面像差，这是由远离镜头中心的光线折射得比中心附近的光线多。其结果类似于色差，但这种现象是单色像差，因为它与光波长无关。输入的平行光线集中在不同的深度，而不是集中在一个点上。得到的结果自然是成像模糊，而且无法通过移动物体、镜头或图像平面来补偿。此外，图像还可能会聚焦到一个曲面上，称为 **Petzval 曲面**，而不是图像平面。这种像差是由于球形透镜造成的。非球面透镜更复杂，它具有非球面表面，专门用于消除球面像差并减少其他像差。

### 光学失真

即使图像本身投射到图像平面上，它也可能在外围发生扭曲。假定透镜是径向对称的，

则这种失真是随着距离光轴越远而图像拉伸或压缩越严重的失真现象。图 4.20 举了两个例子来解释这种失真现象：桶形失真和枕形失真。对于具有宽视场的镜头，失真更强，特别是鱼眼镜头这种极端情况。图 4.21 显示了一个桶形失真较强的图像。纠正这种失真对于目前具有宽视场的 VR 头戴式设备至关重要，否则，呈现的虚拟世界就会变形。

像散性

图 4.22 描述了像散性，这是对不垂直于晶状体的入射光线发生的晶状体像差。直到现在，我们的镜头图纸都是 2D 的，然而，需要引入第三个维度来了解这种新的畸变。射线可以在一维上发生轴偏移，但在另一维中对齐。通过沿着光轴移动图像平面，不可能使图像成为焦点。相反，这样会出现水平和垂直震源深度，如图 4.23 所示。

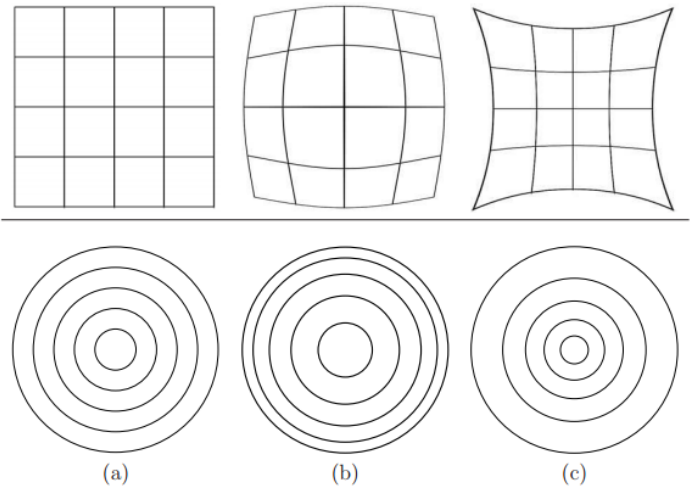


图 4.20：常见的光学畸变。（a）原始图像。（b）桶形失真。（c）枕形失真。对于第一行的畸变，网格变得非线性扭曲。第二行说明它仍然保持圆对称。



图 4.21：一个带有桶形失真的图像，由鱼眼镜头拍摄。  
（图片由维基百科用户 Ilveon 提供。）

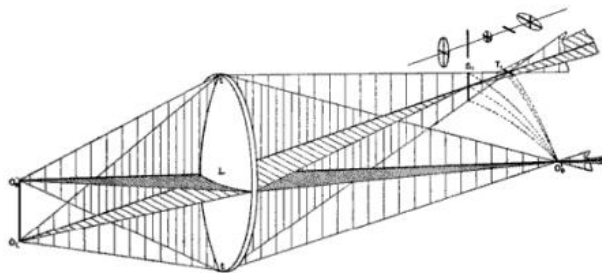


图 4.22：像散性主要是由于入射光线在一个平面内偏离轴线，而在另一个平面内接近垂直。

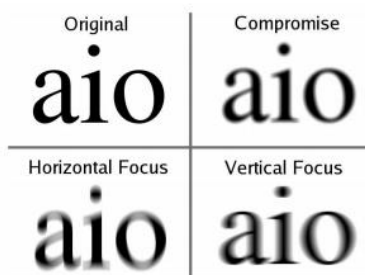


图 4.23：由于像散性，无法将图像完美地聚焦。在一个深度上，它可能会水平聚焦，而另一个深度上则是垂直聚焦。因此我们被迫需要选择妥协。

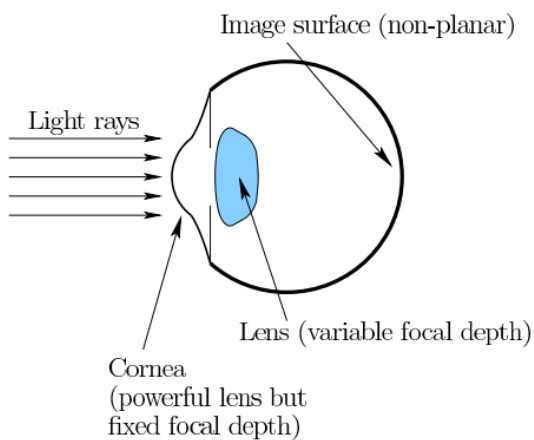


图 4.24：人眼光学系统的简化视图

### 昏迷和眩晕

最后，晕眩也是一个失真。在这种情况下，由于光线远离镜头垂直，图像放大倍数变化很大。结果是图像平面中的“彗星”图案。另一种现象是镜头眩光，非常明亮的光线通过镜片散射并且显示圆形图案。这经常出现在电影中，当视点通过太阳或星星时产生，有时候是人为添加的。

此节的所有像差都会使系统复杂化或降低 VR 设备的体验；因此，大量的努力都花在了缓解这些问题上。

## 4.4 人眼

我们已经在本章中以足够的概念来描述人眼的基本操作，这显然是任何 VR 系统中的重要组成部分，被视为镜头和图像光学系统的一部分。人类视觉的生理和感知部分我们将在第 5 章介绍。

图 4.24 显示了人眼的横截面。平行光线从左边进入，与图 4.11 相比，它显示了工程凸透镜的相似情况。虽然眼睛的操作与设计的环境相似，但在这个阶段会出现几个重要的区别。焦平面被视网膜的球形曲面所取代。视网膜包含将光转换为神经脉冲的光感受器；这在 5.1 节和 5.2 节中有介绍。眼球的内部实际上是液体，而不是空气。沿着从外部空气到视网膜路径结构的折射率如图 4.25 所示。

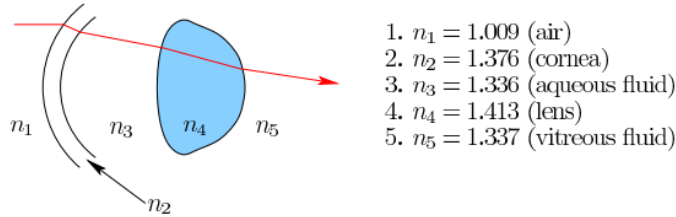


图 4.25：一束光在击中视网膜之前通过五个媒质，它们的折射率已在图中标出。考虑到斯涅尔定律，由于从空气到角膜的过渡，将发生最大弯曲。请注意，一旦光线进入眼睛，它只能通过液体或固体介质。

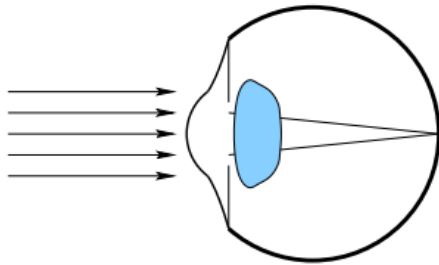


图 4.26：带有晶状体的正常眼睛。

眼睛的光焦度眼球的外径大约为 24mm，这意味着至少需要 40D 的镜片才能使平行光线聚焦到眼睛内部的视网膜中心（回忆 4.2 节中的屈光度）。实际上眼睛有两个凸透镜：角膜和晶状体。角膜是最先进入的眼睛的最外面部分，具有最大的光焦度，约 40D。眼睛晶状体不那么强大，提供额外的 20D。通过添加屈光度，角膜和晶状体的组合是 60D，这意味着平行光线聚焦到距离外角膜大约 17mm 距离的视网膜上。图 4.26 显示了这个系统如何作用于正常视力的人的平行光线。远处物体的图像由此聚焦到视网膜上。

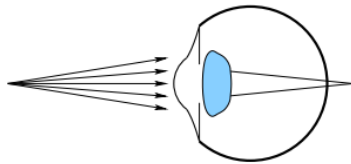


图 4.27：一个近物会产生发散的光线，但如果晶状体松弛，图像在视网膜上模糊不清。

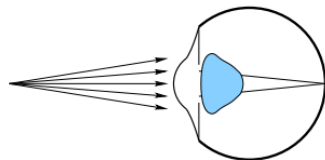




图 4.28：调节过程：眼睛肌肉拉动晶状体，使其增加聚光力量并将图像聚焦在视网膜上。

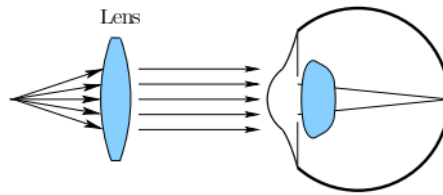


图 4.29：在眼前放置凸透镜是提升聚光能力的另一种方式，以便附近的物体可以在眼睛中汇聚焦点。这就是老花镜的原则。

### 焦距适应

当我们想把注意力集中在一个附近的物体上，而不是一个“无限远”的地方时，会发生什么？如果不改变光学系统，图像在视网膜上会模糊，如图 4.27 所示。幸运的是，晶状体改变了屈光度以适应更近的距离。这个过程被称为适应，如图 4.28 所示。屈光度的变化是通过拉动晶状体改变其形状的肌肉来实现的。在年幼的儿童中，晶状体可以增加 15 到 20D 的力量，这就解释了为什么一个孩子可能会把一些东西放在你面前，并希望你专注于它，因为他们能！在 20D 时，这对应于聚焦在离角膜仅 5cm 的物体上。年轻人已经失去了这种能力，可以容纳 10D 左右。因此，在正常的视力下，他们可以读一本书到 10 厘米左右的距离（眼睛会有些疲劳）。一旦成年人达到 50 岁，几乎没有适应调节能力。这种情况称为老花眼。图 4.29 显示了最常见的治疗方法，即戴上老花镜。

### 视力异常

视力问题将陪伴一个人的一生。出现异常的一个可能是光学系统没有足够的力量来将平行光线会聚到视网膜上。这种状况被称为远视。可以用眼镜来调节。简单的解决方法是在眼睛前面放置一个凸透镜（正屈光度），就像老花镜一样。相反，一些眼睛有太多的力量。这种情况称为近视，可将一个凹透镜（负屈光度）置于眼前，以适当降低聚光力。回想一下，我们有两只眼睛，而不是一只眼睛。这使得每只眼睛都有可能出现不同的问题，导致每只眼睛的镜片屈光度不同。其他视力问题可能不只是聚光力的问题。最常见的是散光，这在第 4.3 节中有介绍。在人眼中，这是由于角膜过于椭圆形而不是径向对称造成的。需要特殊的镜片来纠正这种情况。您可能还想知道第 4.3 节中的像差是否出现在人眼中，如色差。他们会发生，但是他们会被我们的大脑自动纠正，因为我们已经在生活中学会了如何去解释这些有缺陷的图像。

### 简单的 VR 头戴式设备

现在假设我们正在通过放置一个非常接近眼睛的屏幕来构建 VR 头戴式设备。如果距离接近 10 厘米，年轻人已经无法把它放在焦点上。我们希望将其放近点以便填满用户的视角区域。因此，通过使用凸透镜来增加光焦度，其功能与老花镜相同，见图 4.30。这也是第 4.2 节放大的过程。镜头通常放置在焦点处。使用 (4.6)，这意味着  $s_2 = -f$ ，而导致  $s_1 = \infty$ 。屏幕显示为无限远的巨大虚拟图像。但请注意，真实图像仍会投射到视网膜上。我们不会察觉身边的世界，除非视网膜上形成了身边的真实图像。



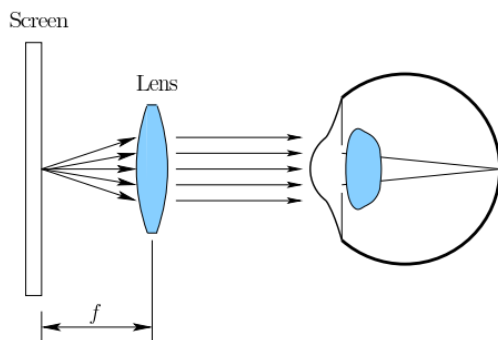


图 4.30: 在 VR 头戴式设备中，镜头放置得使屏幕看起来无限远。

为了解决某些人的视力问题，头戴式设备上可能会出现对焦旋钮，这会改变镜头和屏幕之间的距离。这调整了光焦度，使得镜片和角膜之间的光线不再平行。它们可以被制造为会聚，从而帮助远视的人。或者，它们可以分散，这有助于近视的人。这样，人们可以取下眼镜看屏幕，而不用将镜片放在眼睛之前。但是，如果每只眼睛需要不同的屈光度，则每只眼睛都需要一个对焦旋钮。此外，如果他们有散光，那么这个情况不能被纠正。将眼镜放在头戴式耳机内部可能是唯一剩下的解决方案，但它可能不舒服，并且可能会缩小视野。

本节中许多细节已被略过或简化。VR 头戴式设备的一个重要细节是每个镜头应该完全居中在角膜前方。如果两个镜头之间的距离永久固定，那么这样就不能满足使用头盔的每个人的需求。瞳距是人眼中心之间的距离。人类的平均瞳距约为 64 毫米，但其种族，性别和年龄（以儿童为例）差别很大。为了能够将镜头对准每个人，镜头中心之间的距离应该可以从 55 到 75 毫米调整。这是双筒望远镜的常见范围。不幸的是，情况并非如此简单，因为我们的眼睛也在眼窝内旋转，这改变了角膜相对于晶状体的位置和方向。这放大了第 4.3 节介绍的光学像差问题。第 5.3 节将介绍眼球运动。另一个重要细节是保真度：放置在我们眼前的屏幕需要什么分辨率，以免我们注意到像素？一个类似的问题是，在一张印刷好的纸上需要多少个每英寸点数（DPI），以便即使在放大镜下观察时也不会看到这些点？我们在 5.1 节回到这个问题。

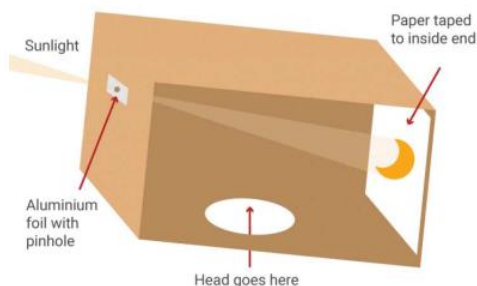


图 4.31: 用于查看日食的针孔摄像机。（图来自于 TimeAndDate.com。）

#### 4.5 相机

现在我们已经解决了人眼问题，描述工程化的眼睛模型似乎很自然，这被称为相机。人们已经发明并使用了数百年的相机，从暗箱开始，允许光线通过针孔，呈现有真实图像的表面。图 4.31 显示了一个可以用于观看日食的例子。（回想一下第 3.4 节中的透视变换数学）。十八世纪的艺术家用了一面镜子和一张描图纸来转换图像并使其完美复制到平面上。在整个 19 世纪，各种基于化学的技术被开发出来，直到发现了光子撞击成像表面会自动蚀刻出图像。在整个 20 世纪，电影被广泛使用，直到数码相机通过使用传感器以电子方式捕获图像，从而完全避免了蚀刻过程。两种流行的技术是电荷耦合器件（CCD）阵列和 CMOS 有

源像素图像传感器，如图 4.32 (a) 所示。这种数字技术记录沿着图像击中每个像素位置的光量，从而直接产生捕获的图像。这些设备的成本近年来一落千丈，业余爱好者可以购买像图 4.32 (b) 所示的相机模块，价格低于 30 美元。

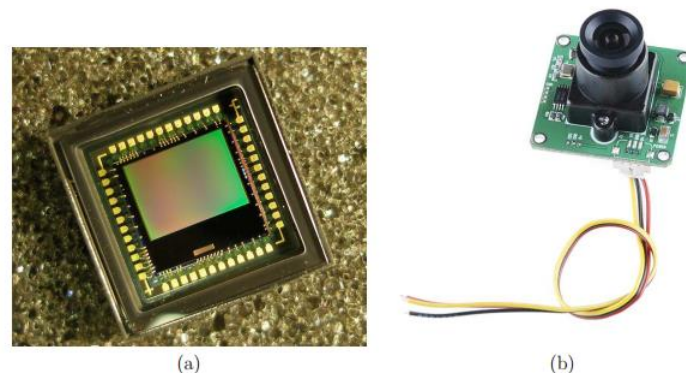


图 4.32: (a) 一个 CMOS 有源像素图像传感器。(b) 低成本 CMOS 摄像头模块 (SEN-11745)，适用于爱好者项目。

## 快门

拍摄数字图像时出现几个实际问题。图像是像素的二维阵列，每个像素都具有红色(R)，绿色(G)和蓝色(B)值，其值通常在 0 到 255 之间。请考虑命中图像平面的总光量。对于更高分辨率的相机，每个像素通常会有更少的光子，因为像素更小。每个感测元件（每个像素一个颜色一个）可以被想象成一个收集光子的桶，就像雨滴一样。要控制光子的数量，快门会阻挡所有的光线，打开一段固定的时间，然后再次关闭。长时间间隔（低快门速度），收集更多光线，然而，缺点是场景中的运动物体会变得模糊，并且传感元件可能会被太多的光线饱和。摄影师必须在确定快门速度时考虑到场景中的光线量，感光元件的灵敏度以及相机和物体在场景中的移动情况以达到平衡。

与快门相似，CMOS 传感器的工作是逐行发送图像信息。因此，传感器与滚动式快门连接，在信息发送之前，每个线路都允许光线进入。这意味着捕捉不会在整个图像上同步，从而导致奇怪的伪像，如图 4.33 所示。与滚动快门和运动一起工作的图像处理算法通常会转换图像以纠正这个问题。CCD 传感器一次抓取并发送整个图像，产生全局快门。CCD 一直比 CMOS 传感器更昂贵，这导致智能手机中滚动快门相机的普遍出现；然而，全局快门相机的成本迅速下降。



图 4.33: 由于滚动式快门效应，飞行直升机的机翼明显向后弯曲。

光圈光学系统也影响到达传感器的光量。如图 4.31 所示，使用针孔，光线会落到图像传感器上，但对于大多数目的而言（除了观看日食以外）它不够明亮。因此，使用凸透镜代

替，使得多条光线会聚到图像平面中的相同点，如图 4.11。这为每个感测元件产生更多的光子。主要缺点是镜头在单一深度地聚焦物体，同时模糊其他物体，如图 4.6。在针孔的情况下，所有的深度基本上都是“对焦”的，但是可能没有足够的光线。因此，摄影师希望调整光学系统的行为更像一个针孔或更像一个完整的镜头，取决于预期的结果。结果是一个可控的光圈（图 4.34），它出现在镜头后面并设置光线进入的孔的大小。小半径通过阻挡除镜头中心之外的所有物体来模仿针孔。较大的半径允许光线穿过整个镜头。我们的眼睛以类似的方式通过收缩或扩大我们的瞳孔来控制光照水平。最后，请注意，光圈越大，第 4.3 节中所述的像差越会干扰成像过程。

### 进一步阅读

大部分基本镜头和光学系统概念都包含在大学物理入门教材中。对于更高级的概念，尤其是镜头像差，请参阅经典的光学工程文本：[298]。快速覆盖光学几何的便捷指南是[104]。[156]中详细介绍了利用电子，激光和 MEMS 的光学系统。 这为理解下一代视觉显示技术提供了基础。一本考虑人眼与工程光学元件结合的出色书籍[296]。相机涵盖了许多不同的角度，包括计算机视觉[111,318]，相机工程[126]和摄影[297]。成像的数学基础在[19]中有全面的介绍。

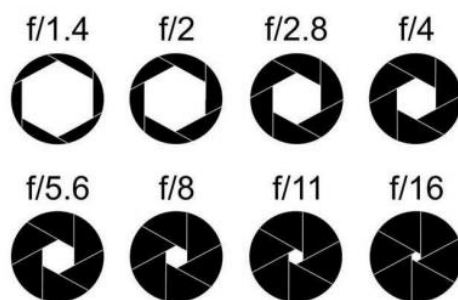


图 4.34：光圈设置的光谱，控制进入镜头的光量。显示的数值称为焦比或光圈。