

## 第二章 颜色

### 2.1 光的视觉效应

颜色是一种光的视觉效应。颜色视觉（简称“色觉”）是视觉感知的一部分，是一种用来区分由不同波长的光波组成的光的能力，在感知器官中发挥着重要作用。这种视觉效应在很多动物中都存在且有着相似的潜在机制。在灵长类动物中，颜色视觉可能是在各种视觉任务的选择性压力下进化而来的，包括觅食营养丰富的嫩叶、成熟的水果和花朵，以及识别捕食者的伪装、感知其他灵长类动物的情绪状态等。

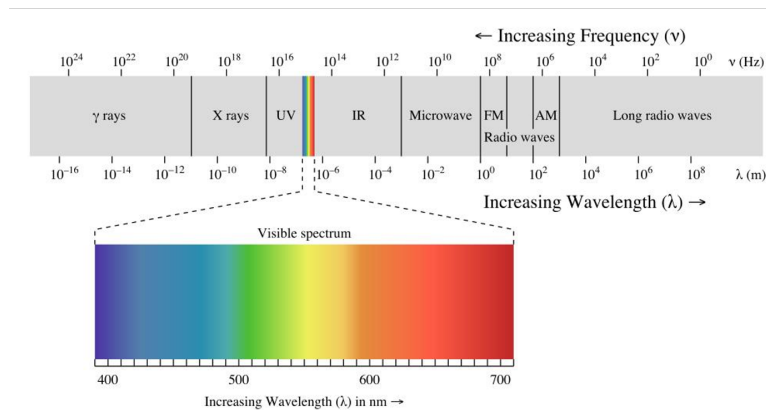


图 2.1: 可见光的波长范围

#### 2.1.1 什么是颜色？

颜色，或称色彩，是眼、脑和我们生活经验对光的类别描述的视觉感知特征。这种对颜色的感知来自于可见光光谱对人眼视锥细胞的刺激。颜色是由光反射所产生的，这种反射是由物体的物理性质决定的，如光的吸收、发射光谱等。在实际中，人眼对颜色的感知不仅取决于光的物理性质，还被心理因素等影响，如人对一种颜色的感知经常受到周围其他颜色的影响。此外，不同的文化对特定的颜色赋予了不同的意义。尽管受到其他因素的影响，跨学科研究以及对婴儿研究指出，人类有着一种天然的神经基础，使其对颜色的感知有一种比较通用的划分，即将颜色大致划分为红色、黄色、绿色、蓝色。

#### 2.1.2 人眼如何感知颜色？

如2.1.1中所述，颜色是人眼对光的视觉效应。而我们知道，人眼只能看到波长位于某一范围的光，即可见光。可见光是人眼可以见到的电磁波，其只是电磁波谱上的很窄的一段频

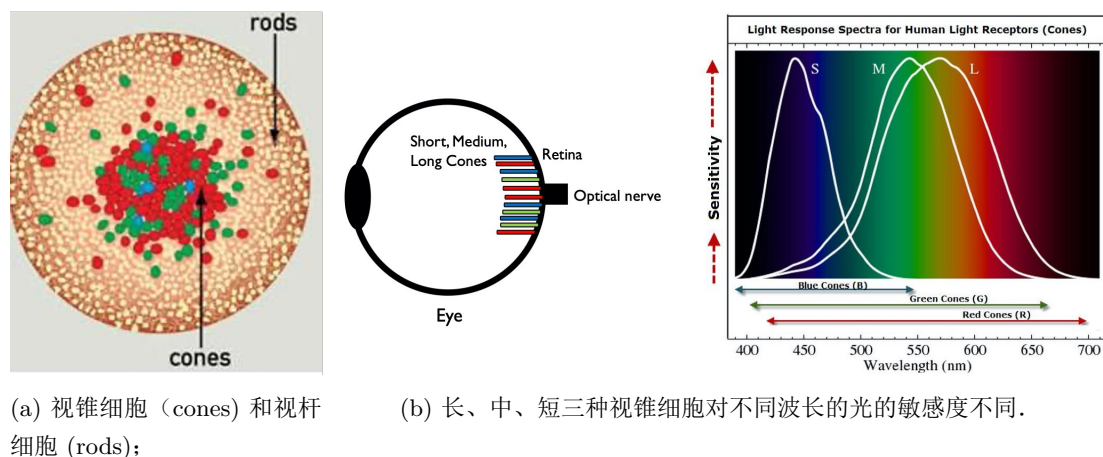


图 2.2: 人眼对颜色的感知.

谱, 一般具有介于  $400\text{nm}$ – $700\text{nm}$  之间的波长, 如图2.1所示.<sup>1</sup> 可见光是波长比紫外线长、比红外线短的电波<sup>2</sup>. 当光波进入人的眼睛后, 主要依靠两种细胞来感知光: 视锥细胞和视杆细胞.

如图2.2a中所示, 视锥细胞分布在视网膜的中央, 每个视网膜大概有 700 万个, 它对光的波长敏感. 视锥细胞按照其所敏感的光的波长可以分为三种: 长、中、短, 分别对红、绿、蓝三种光敏感, 如图2.2b中所示. 视锥细胞可以在较明亮的环境中提供辨别颜色和形成精细视觉的功能. 我们眼所能辨别的颜色种类是有上限的, 约为 1000 万种, 超过该范围的更多颜色是无法被人眼辨别的. 但是, 在大脑的处理和心理因素等的影响下, 人类可以感受到更为丰富的颜色. 视杆细胞分散分布在视网膜上, 每个视网膜上约有 1 亿个以上这类细胞不区分光线波长, 对光线更为敏感 (其敏感程度为视锥细胞的 100 多倍). 由于视杆细胞对波长不敏感, 它无法感受颜色, 但在较弱的光线下可以提供对环境的分辨能力. 例如夜晚时, 我们无法很好地对问题的颜色进行分辨, 但是我们可以感知到物体的轮廓.

## 2.2 颜色空间

为了表示颜色, 人们建立了多种颜色模型, 以一维、二维、三维甚至四维空间来表示某一颜色, 这种坐标系统所能定义的颜色范围即颜色空间. 不同的颜色空间所适用的应用背景有所不同, 如显示器中采用的 RGB 颜色空间是基于物体发光定义的 (R、G、B 刚好对应于光的三原色); 工业印刷中常用的 CMYK 颜色空间是一种减光模式 (C、M、Y、K 分别对应青 (Cyan)、品红 (Magenta)、黄 (Yellow) 和黑 (Black)); HSV<sup>3</sup>空间是从人的视觉直观反映提出的 (H、S、V 分别对应于色调、饱和度和明度). 在2.2.1到2.2.2中, 将对几种常见的颜色空间进行介绍.

值得注意的是, 颜色之所以能构成“空间”, 是建立在格拉斯曼定律 (*Grassmann's law*) 的基础上的. 1953 年, 格拉斯曼总结出色光混合的四大定律:

1. 人眼能且仅能感知颜色的三种特征, 即: 色相、饱和度和亮度.
2. 两种色光, 若它们对人眼的色觉刺激相同, 则它们在色光混合实验中的表现就完全相同, 无论这两种色光的光谱组成如何.

<sup>1</sup>不同资料对可见光波长范围的定义有所不同, 如有的资料将可见光波长范围为  $420\text{ nm}$  –  $680\text{ nm}$ 、 $380\text{ nm}$  –  $800\text{ nm}$  等.

<sup>2</sup>除了可见光外, 光还包括非可见光, 如紫外光、红外光、X 光.

<sup>3</sup>HSV 颜色空间又称为 HSB 颜色空间, B 即 Brightness.

3. 无论两种色光的功率谱如何，只要它们具有相同的色相和饱和度，混合时就会产生另一种具有相同色相和饱和度的色光。
4. 混合色光的亮度等于各组分色光的亮度之和。

上述定律使得我们可以在颜色的集合上定义运算，从而使其成为一个线性空间。事实上，关于颜色混合的交换律、结合律、加法逆元、加法零元、数乘单位元和数乘分配律的存在，都已经是我们画图、Photoshop、Word、Powerpoint 等软件使用过程中默认的前提了。

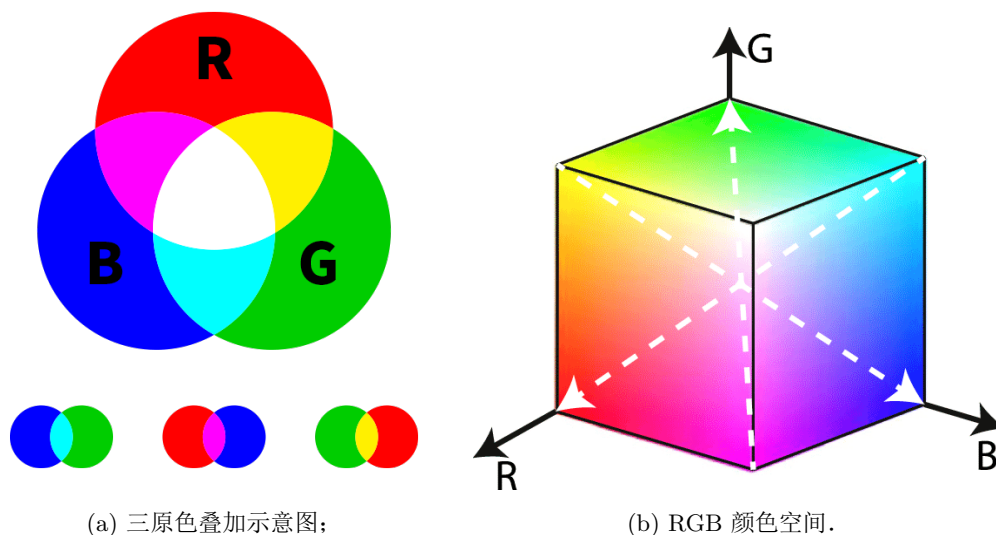


图 2.3: RGB 颜色空间及其原理。

### 2.2.1 RGB 颜色空间

RGB 颜色空间是工业界的一种颜色标准，通过对红、绿、蓝三原色以不同的比例相加而产生多种多样的颜色。如图2.3a所示，当三种原色相加时，形成白色。反之，当所有基色的值都为 0 时，便得到黑色。在 RGB 颜色空间中，以 R、G、B 作为坐标系的轴，同时以每条轴上的分量来代表其对应的原色的比例，使用三个轴上不同分量的组合便可表示不同的颜色，便构成了 rgb 颜色空间，如图2.3b所示。这个空间几乎包括了人类视力所能感知的所有颜色，是目前运用最广的颜色系统之一。RGB 颜色空间在颜色的处理过程中主要用来描述显示器、电视、扫描仪、数字相机等设备的。例如，LED 显示器中的每个像素都是通过红色、绿色和蓝色 LED（发光二极管）的组合来显示颜色的。在 RGB 颜色空间中，又有 Adobe RGB、sRGB、ColorMatch RGB、Wide Gamut RGB、CIE RGB 等颜色空间。

### 2.2.2 CMYK 颜色空间

与 RGB 颜色空间不同的是，CMYK 颜色空间是一种减光模型，它主要应用于印刷中，而且它是一种减色模型。【为什么 CMYK 被称为减色模型？】这与 CMYK 颜色空间的工作原理相关：在打印时，我们通常是在白色的纸张上进行打印。纸张呈现白色是因为它反射了照在其表面的光中所有波长的成分。因此，当纸张的一个位置被打印上墨水后，它便不再反射入射光中的所有成分，即吸收了光中大部分的成分，只反射部分光，从而使得该位置呈现出特定的颜色。例如，当在纸张上打印上红色墨水，那么光中的大部分成分被吸收，只有红

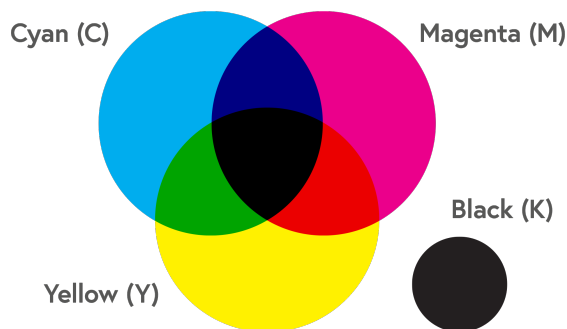


图 2.4: CMYK 颜色空间中基色的叠色示意图.

色光会被反射出来, 被人眼所感知到. 从而, 打印墨水可以理解为从原本的反射光中减去了其他颜色的成分, 所以它被称为一种减色模型.

CMYK 颜色空间又称为 CMY 颜色空间, 这是由于在理论上, 青色、品红和黄色三种基色的组合可以形成各种颜色. 但是在实际中, 这三种颜色的油墨很难叠加出真正的黑色, 因此在打印、印刷时又引入了黑色 (Black) 以强化暗调, 加深暗部颜色, 便形成了最终的 CMYK 颜色空间. 同时, 使用其他颜色的油墨合成黑色的成本要更高, 直接使用黑色油墨可以节约成本. 图2.4给出了 CMY 颜色空间中三种基色叠加的示意图, 在该空间中每一种颜色都是通过三种基色的百分比来表示的, 原色的混合会产生更暗的颜色.

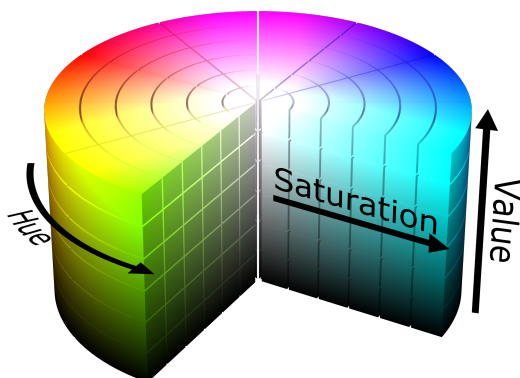


图 2.5: HSV 颜色空间.

### 2.2.3 HSV 颜色空间

HSV 颜色空间是根据颜色的直观特性由 A. R. Smith 在 1978 年创建的一种颜色空间, 也称六角锥体模型 (Hexcone Model). 在 HSV 颜色空间中, H 表示色相, 通常取值范围是  $[0^\circ, 360^\circ]$ , 以红橙黄绿青蓝紫的顺序对应不同的颜色 ( $0^\circ$  对应红色,  $120^\circ$  对应绿色,  $240^\circ$  对应蓝色), 构成一个首尾相接的色相环. S (Saturation) 是饱和度, 即颜色的纯净程度 (颜色被白色稀释的程度); V (Value) 表示明度, 它决定颜色空间中颜色的明暗程度. 明度的取值范围为  $0\% - 100\%$ , 值越高, 表示颜色越明亮, 值为  $0\%$  时表示纯黑色. 图2.5中直观展示了 HSV 颜色空间. RGB 和 CMYK 颜色模型都是面向硬件的, 而 HSV 颜色空间是根据人观察颜色的生理特征而提出的颜色模型, 人的视觉系统对亮度的敏感度要强于颜色值.

在我们选购电子设备时, 经常听到色域这个词, 那么它是什么呢? 色域, 是指某种颜色空间中能够表示、或者某种显示设备能够显示的颜色的范围. 在实际中, 并不是所有的可见

光谱中的颜色都可以被计算机显示器显示。同时，三种颜色墨水的组合，也并不能产生出可见光谱中包含的所有颜色。

## 2.3 颜色感知

在实际中，人眼所感知到的颜色并不完全由物体本身所反射的光的颜色决定，由于人的生理和心理的影响，在颜色感知中存在着一些有趣的现象。

### 2.3.1 颜色立体视觉

当光线通过角膜时，会发生轻微衍射。眼睛通常能够将黄色波长的光（598nm）调到最清晰的焦点，从而使得波长较长的红色光波会聚在视网膜后面。波长较短的绿色和蓝色光波会聚在视网膜前面。因此，人眼产生了一种视觉假象，即长波长的光（颜色）会被认为比波长短的光（颜色）来自更近的地方，也有些人会产生相反的感觉，这种现象被称为颜色立体视觉（Chromostereopsis）。如图2.6中所示，左边的红色心形仿佛漂浮在蓝色部分的前面，而右边的蓝色心形则仿佛浮动在红色内容的后面，这就是由于颜色立体视觉效果造成的，也有一些人会产生相反的感觉。早在16世纪实际，人们便已经利用了这种现象去创作艺术作品，如图2.7a中的彩色玻璃，以及近些年来也有一些作品利用了该现象，如图2.7b所示。

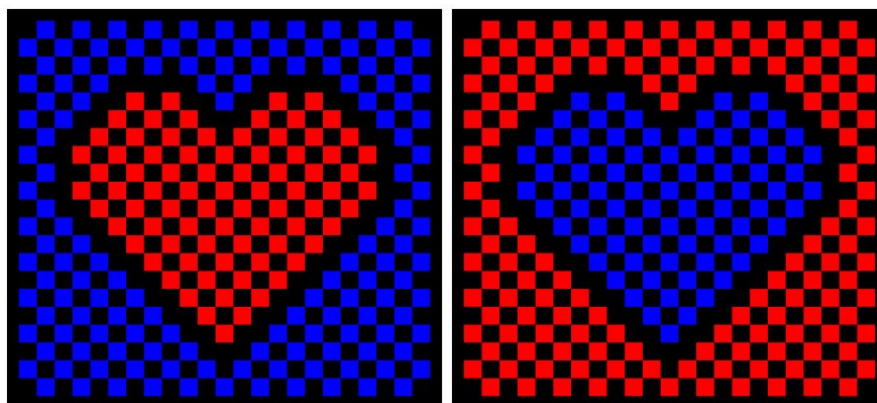


图 2.6: “浮动的心”。

### 2.3.2 颜色恒常特性

颜色恒常特性指的是我们能够在不同的照明条件下保持对颜色的感知较为恒定的能力。如图2.8中所示，在不同的光照环境下，即便看到的颜色会被光照影响（因此相机拍摄得到的图片中物体呈现出不同的颜色），我们对该物体的颜色的感知却是可以保持较为恒定的，这有利于我们对物体的识别。

### 2.3.3 边界效应

当我们观察形状或物体时，它的边界的颜色会影响我们对其内部的颜色感知。当观察图2.9中上下两幅图像时，我们会认为它们的长方形背景以及多边形内部的颜色是不同的。事实上，除了边界部分之外，这两幅图像中其他部分的颜色是相同的。我们会产生对它们的颜色产生不同的感知，是由于两幅图中不同的边界颜色所带来的影响。



(a) 16 世纪的艺术作品；

(b) 2015 年的一幅电影海报。

图 2.7: 颜色立体视觉.

### 2.3.4 同时颜色对比

同时颜色对比颜色是指：将同一种颜色的表面放置在不同颜色的背景中时，它会被感知为不同的颜色。当观察2.10 中的左右两幅图像时，它们的对角线上的线条上的颜色会被感知为不同的颜色，但其实它们的颜色是相同的。

### 2.3.5 色诱导

色诱导（color induction）亦称“诱导色觉”，它是指：我们对某一物体颜色的感知受到另一物体颜色的影响，使其邻近的灰色变为其补色的现象，这是由同时颜色对比现象造成。当观察图2.11 时，我们会看到红色的可乐瓶。但是，图2.11 中并没有红色像素，那些我们认为红色的部分其实是原本应该是灰色的。这是因为我们在感知图像中的颜色时，由于

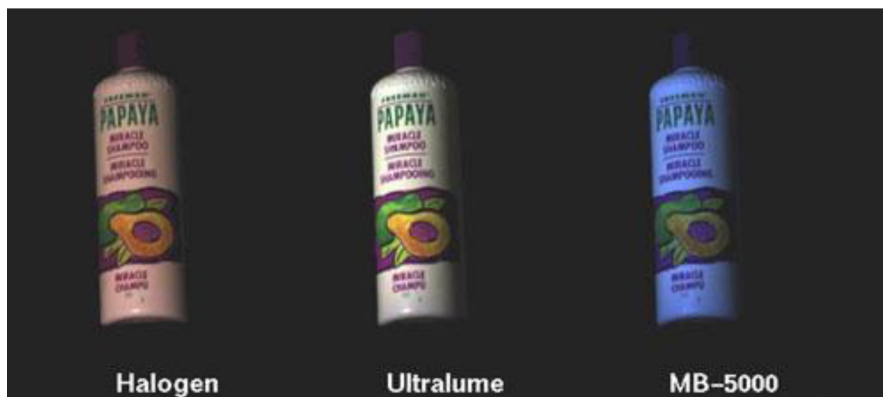


图 2.8: 对同一物体在不同光照下拍摄得到的图片。

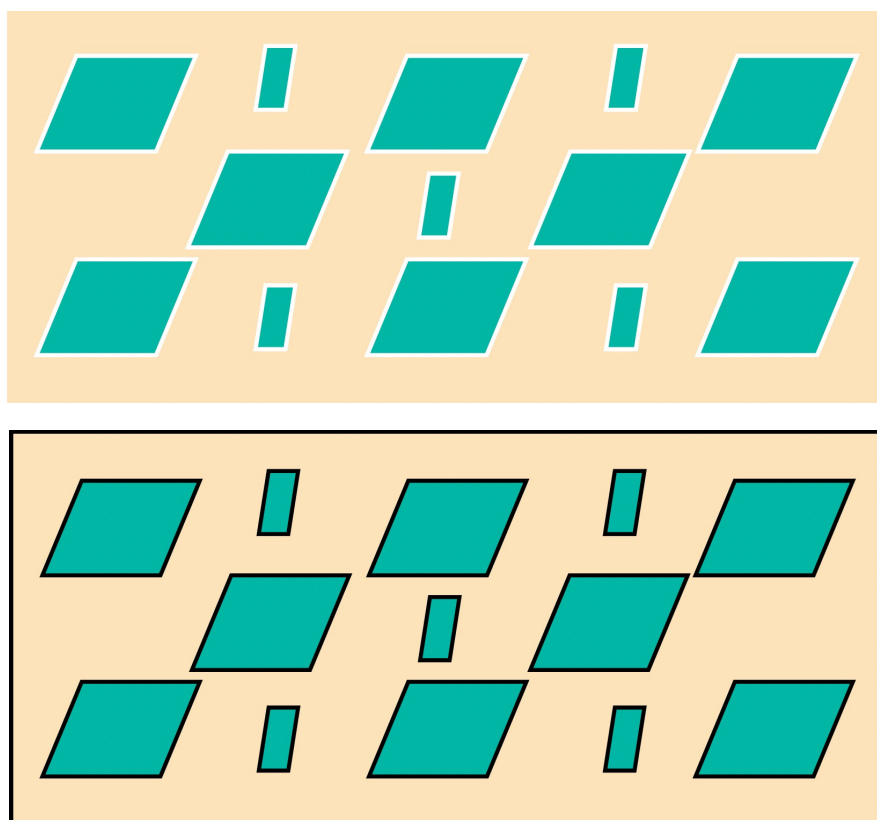


图 2.9: 颜色感知中的边界效应.

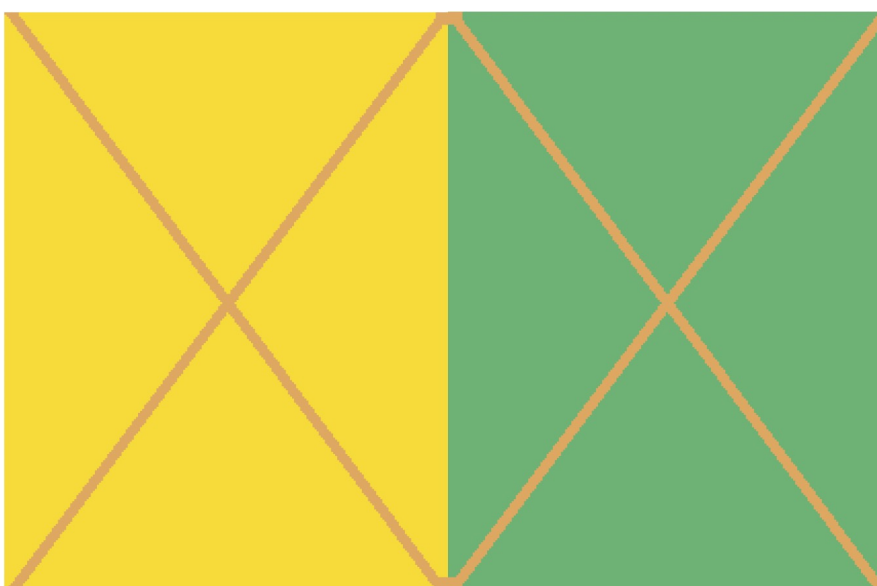


图 2.10: 颜色感知中的同时颜色对比效应.

“本应该是白色的”字体部分在图像中为青色，我们的大脑假设了图像中场景中的光照为青色。从而，由于我们的颜色感知的颜色恒常性——即自动排除光照对物体颜色的影响，最终我们的大脑将图中的灰色部分感知为红色。

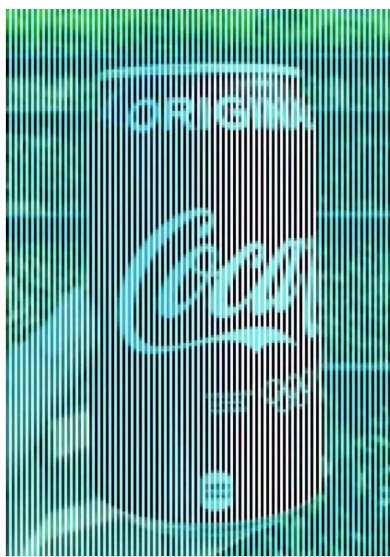


图 2.11: 色诱导现象.

### 2.3.6 动视错觉

一个有趣的视觉错觉是动视错觉，它使我们在观看静态图片时会产生图片里的内容在运动的错觉。例如，当我们的眼睛盯着2.12看时，我们会感觉到图中的内容仿佛在转动。关于这一现象的产生机制，科学家们尚未完全研究清楚。

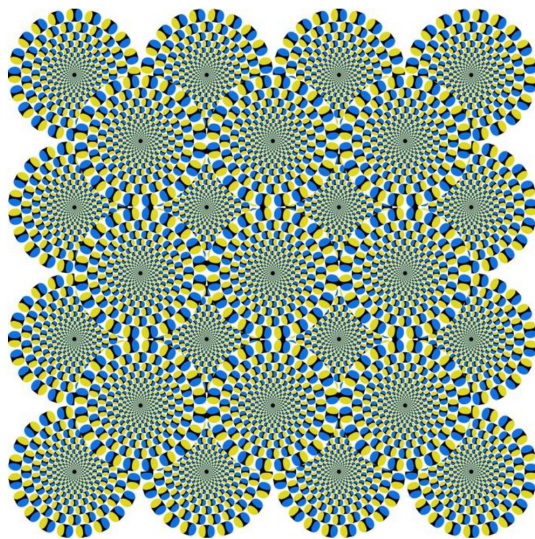


图 2.12: 动视错觉.

### 2.3.7 一些颜色感知缺陷

在 2.1.2 一节中，我们提到人眼中的视锥细胞对颜色的感知十分关键。因此，当一些人的眼睛由于先天或后天的原因出现问题时，会出现一些颜色感知缺陷。例如，当眼睛中只有一种或者没有视锥细胞时，便会造成全色盲（Monochromatism），即只能感知明暗以及不同程度的灰色。当眼睛中只有两种视锥细胞时，会造成三种主要的双色视觉：患有红色盲（Protanopia）的人无法看到红色光，患有绿色盲（Deuteranopia）的人无法看到绿色光，患有黄蓝色盲（Tritanopia）的人无法看到蓝色光。此外，也有一些人的眼睛尽管有三种视锥细胞，但是其看到的颜色和正常的人眼不一样。在图2.13中，我们展示了三种不同的双色视觉对颜色感知的影响。



(a) Normal;

(b) Protanopia;

(c) Deuteranopia;

(d) Tritanopia;

图 2.13: 双色视觉对颜色感知的影响。