

1 颜色

1.1 颜色的物理与感知

1.1.1 颜色的物理本质

定义 1.1 颜色 颜色 (Color) 是特定波长的光引起的视觉效应.

定义 1.2 可见光 可以被肉眼感知的电磁波称为可见光 (Visible Light). 其波长范围大约在 380nm 到 750nm 之间.

单一波长的光称为**单色光 (Monochromatic Light)**, 在自然界中比较少见. 而大多数自然界的光是由多种波长的光混合而成的, 称为**复色光 (Polychromatic Light)**¹.

复色光的形成有两种方式. 一种是发射光以加法形式组合, 例如红, 绿, 蓝三种色光混合形成白光; 另一种是吸收光以减法形式组合, 例如青, 品红, 黄三种颜色的颜料混合形成黑色.

在计算机图形学中, 我们主要研究的是显示器等发射光的设备, 因此主要使用加法颜色模型来表示颜色. 在数学上, 可以用 $I(\lambda)$ 表示复色光中各波长 λ 的光强.

1.1.2 颜色的感知

人眼对光的感知是通过视网膜上的视锥细胞和视杆细胞实现的.

定理 1.3 视杆细胞的作用与分布 视杆细胞 (Rod Cells) 对光强的敏感度高, 但不区分颜色. 视杆细胞在视网膜上分散地分布.

定理 1.4 视锥细胞的作用与分布 视锥细胞 (Cone Cells) 对光的波长敏感. 视锥细胞主要集中在视网膜的中央区域.

定理 1.5 视锥细胞的分类 视锥细胞按其对不同波长光的敏感性可分为三类:

1. S 视锥细胞: 对短波长 (蓝色光) 敏感, 峰值约在 420 nm.
2. M 视锥细胞: 对中波长 (绿色光) 敏感, 峰值约在 534 nm.
3. L 视锥细胞: 对长波长 (黄色光) 敏感, 峰值约在 564 nm.

尽管视锥细胞所敏感的颜色是蓝, 绿, 黄三色, 但由于黄色和绿色过于接近, 在图形学中通常使用红, 绿, 蓝三色表示各种颜色.

¹自然界中的白光, 例如太阳光等, 包含了可见光的所有频段的电磁波. 它的光谱几乎是连续的 (除了某些特定的, 由特定元素造成的吸收峰).

定理 1.6 色彩立体效应 光线通过角膜时会发生轻微的衍射. 眼睛通常能够将黄色波长的光 (598 nm) 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. 这就使得人会认为较长波长的光来自更近的地方, 较短波长的光来自更远的地方. 这种现象称为**色彩立体效应 (Color Stereoscopic Effect)**.

定理 1.7 颜色恒常特性 人的视觉具有**颜色恒常特性 (Color Constancy)**, 即在不同光照条件下, 人们对物体颜色的感知基本保持不变. 例如, 在白天和黄昏时分, 我们仍然认为一件物体的颜色是相同的, 尽管其反射光谱可能有显著变化.

颜色恒常特性的一个典型的例子就是棋盘阴影错觉. 与颜色恒常特性的另一个密切相关的视觉效应是色诱导效应.

定理 1.8 色诱导 由于颜色恒常特性的存在, 人们在感知颜色时通常会扣除环境光的影响 (即倾向于将看到物体的颜色向环境光的补色靠拢). 这就导致了**色诱导 (Color Induction)** 现象.

定理 1.9 边界效应 物体边界的颜色也会影响人们对物体颜色的感知, 这称为**边界效应 (Edge Effect)**. 例如, 具有深色边界的物体会被感知为更暗的颜色, 而具有浅色边界的物体会被感知为更亮的颜色.

定理 1.10 色彩和视觉敏锐度 人对于物体清晰度的感知主要取决于物体的亮度变化, 而不是颜色变化. 另外, 人对于蓝色目标的空间敏锐度的感知要比其它颜色差得多, 这意味着蓝色的物体看起来更容易模糊.

1.2 颜色的离散表示

1.2.1 色彩空间

任意一种人眼可以分辨的颜色都可以用 (r, g, b) 三原色坐标表示, 并且它大致是线性的, 即颜色的混合可以表示为颜色坐标的加和. 这样, 任何一种颜色就对应于 $[0, 1] \times [0, 1] \times [0, 1]$ 这一立方体空间中的一个坐标. 此外, 我们还需要规定顶点处的基准颜色. 上面的所有规定构成了一个**色彩空间 (Color Space)**.

定义 1.11 色彩空间 色彩空间是一种用于定量描述颜色的数学模型, 它为颜色建立了一个坐标系统并规定了基准的颜色, 从而使得颜色可以被精确地表示.

常见的色彩空间有 RGB, CMY(K), HSV, HSL 等.

定义 1.12 RGB 色彩空间 RGB 颜色空间使用红 (Red), 绿 (Green), 蓝 (Blue) 三种颜色作为基准颜色, 通过调整这三种颜色的强度来表示各种颜色. 在计算机图形学中, RGB 颜色空间是最常用的色彩空间.

定义 1.13 HSV 与 HSL 色彩空间 **HSV 颜色空间** (Hue, Saturation, Value) 和 **HSL 颜色空间** (Hue, Saturation, Lightness) 是基于人类对颜色感知的色彩空间. 它们通过色调 (Hue), 饱和度 (Saturation), 亮度 (Lightness) 或明度 (Value) 来表示颜色, 更符合人类的直观感受.

上面两种色彩空间都采用柱坐标的方式表示颜色.

定义 1.14 CMYK 色彩空间 **CMYK 颜色空间** (Cyan, Magenta, Yellow, Key/Black) 主要用于印刷领域. 它使用青 (Cyan), 品红 (Magenta), 黄 (Yellow) 三种颜色作为基准颜色, 通过减法混合来表示各种颜色. 黑色 (Key/Black) 通道用于增强图像的对比度和深度.

1.2.2 色域

由于显示设备的不同, 其能够显示的颜色范围也不同. 我们可以用色域来描述显示设备能显示的颜色范围.

定义 1.15 色域 **色域 (Gamut)** 是指显示设备能够显示的颜色范围. 不同的显示设备有不同的色域, 例如 sRGB 色域, Adobe RGB 色域等.