

RGB 与 HSI 颜色模型的转换方法对比研究

刘华波

华中农业大学资源环境学院

liuhuabo@126.com

摘要: HSI 模型由 RGB 模型转换而来, 不同的转换思路的会形成各具特色的 HSI 模型。本文概述了二种模型间的几种主要的转换方法, 分析比较了各自的异同, 并进行了应用举例。

关键词: RGB-HSI 转换, 颜色模型, 对比研究

中图分类号: TP391.41

在进行数字图像处理和识别时, 颜色常常是一个重要的研究对象。RGB 和 HSI 模型是二种最常用的颜色模型。RGB 模型基于三基色原理, 面向硬件, 便于颜色的采集和显示。HSI 模型基于色调(Hue)-饱和度(Saturation)-亮度(Intensity)理论, 符合人类观察和感受颜色的视觉及心理学特点, 便于从主观出发对颜色进行操作。

1 相关概念

1905 年美国人孟塞尔(Albert H.Munsell)直接使用人眼对比实验法标定颜色, 创立了以其名字命名的色彩表示系统--Munsell Color System。该系统面向人类视觉感受, 把颜色的三种基本属性色相、明度、饱和度分离, 形成一个类纺锤体的三维色域空间。

孟塞尔系统和较晚出现的 Ostwald (1923 年, 德国) 和 PCCS (1964 年, 日本) 等颜色表示系统都符合二个基本原则, 一是颜色恒常性原则, 即将亮度和色度 (色调+饱和度) 独立表示; 二是色度二极渐弱原则, 即亮度适中时人眼对色彩的分辨力最强, 颜色的种类最多, 而亮度趋强或趋弱时, 分辨力会降低, 直至为零。

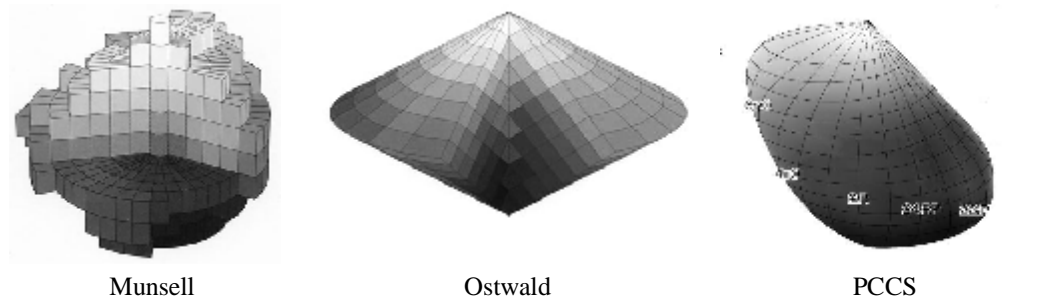


图 1 几种面向人类视觉的颜色表示系统

上述颜色表示系统的颜色值离散而复杂, 没有具体的描述公式, 不利于数学演算和数字化应用。HSI 模型就是为了满足计算机数字化颜色管理的需要而提出的对上述颜色模型的高度抽象模拟的数学模型。HSI 为英文 Hue, Saturation, Intensity 的缩写形式。

HSI 模型除了符合上述模型的二大基本特点, 还要求能够与现有模型互相转换。在图像采集和显示中, 最常用的是 RGB 模型。因此, 通过某种算法, 先将 RGB 色域空间映射到 HSI 空间, 在 HSI 空间进行处理后, 再转回至 RGB 空间, 是应用中常见的思路。

RGB 向 HSI 模型的转换是由一个基于笛卡尔直角坐标系的单位立方体向基于圆柱极坐标的双锥体的转换。基本要求是将 RGB 中的亮度因素分离, 将色度分解为色调和饱和度, 并用角向量表示色调(图 2)。

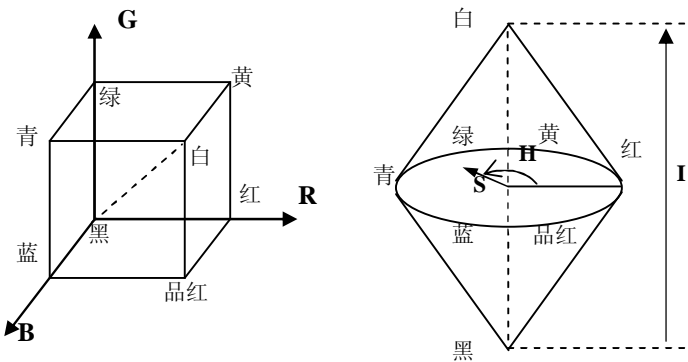


图 2 RGB (左) 与 HSI (右) 模型示意图

2 RGB 转换至 HSI 的几种常见方法

表 1 列出几种常用的 RGB-HSI 转换公式

表 1 几种算法的转换公式

算法	色调	饱和度	亮度
算法 1 几何推导法	$H = \begin{cases} q, & G \geq B \\ 2p - q, & G < B \end{cases}$ $\text{where } q = \cos^{-1} \left(\frac{(R-G) + (R-B)}{2\sqrt{(R-G)^2 + (R-B)(G-B)}} \right)$	$S = 1 - \frac{3 \min(R, G, B)}{R + G + B}$	$I = \frac{R + G + B}{3}$
算法 2 坐标变换法	$H = \begin{cases} q, & G \geq B \\ q + p, & G < B \end{cases}$ $\text{where } q = \frac{p}{2} - \tan^{-1} \left(\frac{2R - G - B}{\sqrt{3}(G - B)} \right)$	$S = \frac{2}{\sqrt{6}} \times \sqrt{(R-G)^2 + (R-B)(G-B)}$	$I = \frac{R + G + B}{\sqrt{3}}$
算法 3 分段定义法	$H = \begin{cases} \frac{p}{3} \times \frac{G - B}{Max - Min}, & \text{if } Max = R \\ \frac{p}{3} \times \frac{B - R}{Max - Min} + \frac{2p}{3}, & \text{if } Max = G \\ \frac{p}{3} \times \frac{R - G}{Max - Min} + \frac{4p}{3}, & \text{if } Max = B \end{cases}$ $H = H + 2p, \quad \text{if } H < 0$	$S = \begin{cases} \frac{Max - Min}{Max + Min}, & 0 < I \leq \frac{1}{2} \\ \frac{Max - Min}{2 - (Max + Min)}, & I > \frac{1}{2} \end{cases}$	$I = \frac{1}{2} (Max + Min)$
算法 4 Bajon 近似 算法	$H = \begin{cases} \frac{G - B}{3(R + G - 2B)}, & \text{if } Min = B \\ \frac{B - R}{3(G + B - 2R)} + \frac{1}{3}, & \text{if } Min = R \\ \frac{R - G}{3(R + B - 2G)} + \frac{2}{3}, & \text{if } Min = G \end{cases}$ $H = H * 2p$	同算法 1	同算法 1
算法 5 标准模型法	同算法 3	$S = Max - Min$	同算法 3

注：Max=max(R, G, B), Min=min(R, G, B)。公式中的 RGB 在计算前均归一化至[0, 1]区间。

几何推导法最为经典，可追溯到 30 多年前（Tenenbaum,1974）。基本思路是先分离出亮度信息，将三维空间降为二维。在二维平面内利用解析几何的向量点积公式求出 HSI 模型的色调分量值。

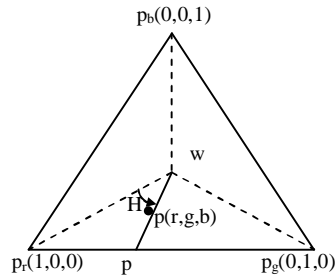


图 3 RGB-HSI 几何推导法示意图

如图 3, 在降维后的正三角形区域内任一点的坐标设为 $P=(r,g,b)$, 中心点(纯白色) W 和 P 的连线 WP 的延长线与三角形边长的交点 P' . 按图中所示, 向量 p_rw 与 pw 之间的夹角即为 HSI 中的色调 H . 根据向量点积公式 $p_rw \cdot pw = \|p_r - w\| \cdot \|p - w\| \cdot \cos H$, 即得 $H = \cos^{-1} \left(\frac{(p_r - w) \cdot (p - w)}{\|p_r - w\| \cdot \|p - w\|} \right)$. 将相关各点坐标代入化简后即可转换公式(Gonzalez,1992)。

坐标变换法的转换思路是基于 RGB 立方体沿对角线垂直竖立后与 Munsell 双锥体相似(图 4)。通过直角坐标系的旋转, 求出转换矩阵, 并与极坐标系转换, 得出转换公式(Kenneth,1996)。

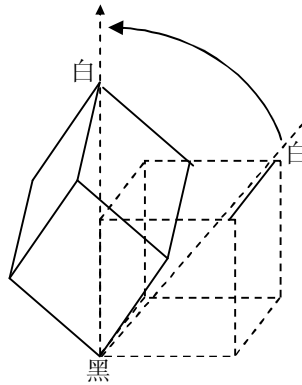


图 4 RGB 色立方的旋转

旋转后的空间转换关系为:

$$\begin{bmatrix} S \cdot \cos H \\ S \cdot \sin H \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad \text{公式 (1)}$$

根据上式得 $S = \sqrt{X^2 + Y^2}$, $H = \tan^{-1}(Y/X)$ 即可得转换公式(表 1)。本方法的 H 转换公式可以用多种反三角函数表示。如果以反余弦三角函数表示, 与方法 1 相同。

分段定义法是直接根据色度学定义得出转换公式。根据色度学的基本概念, 将三基色 RGB 的色调分别定为 0° , 120° , 240° 。RGB 三分量中某分量最大时, 该分量即为主分量, 色调值位于该分量附近(正负 60° 范围)。偏差幅度由另外二个分量的相对差异归一化后

决定 (Foley,1990)。此方法所得模型常称作 HSL 模型。

另外, 由于早期计算机性能运算性能较差, 为了节省时间, 人们提出过多种近似算法以加快转换效率。本文介绍的 Bajon 算法(Bajon,1986)是一种转换精度较高的方法。

其中, 算法 1 和算法 2 的色调 H 公式只是形式不同, 实则等价。

几套公式转换后的 H 值域为 $[0, 2\pi]$, 饱和度和亮度均为 $[0,1]$ 。算法 2 的取值范围比较特别, S 为 $[0, 2/\sqrt{6}]$, I 为 $[0, \sqrt{3}]$ 。

最后, 算法 5 所得转换模型的空间分布平均性最好, 值域标准, 适应性强。

HSI 各分量间相对独立, 在应用转换时, 可以将上述几套公式中的 HSI 公式交叉使用, 但也因此容易产生混淆。

3 三维空间分布与公式等价性研究

设集合 $C = \{x | x = a/9, a = 0, 1, 2, \dots, 9\}$;

$D = \{(r, g, b) | (r, g, b) = (x, y, z), x, y, z \in C\}$ 。集合 D 的所有元素构成一个均匀分布的 RGB 色立方, 共含元素 10^3 个。

设函数 $T(r, g, b)$ 为 (R,G,B) 值转换为 (H,S,I) 模型的映射。集合 $P = \{(h, s, i) | (h, s, i) = T(r, g, b), (r, g, b) \in D\}$ 。

将集合 D 分别使用四种算法 (不包括算法 4) 转换成集合 P 后在三维空间中表示出来, 如图 5。

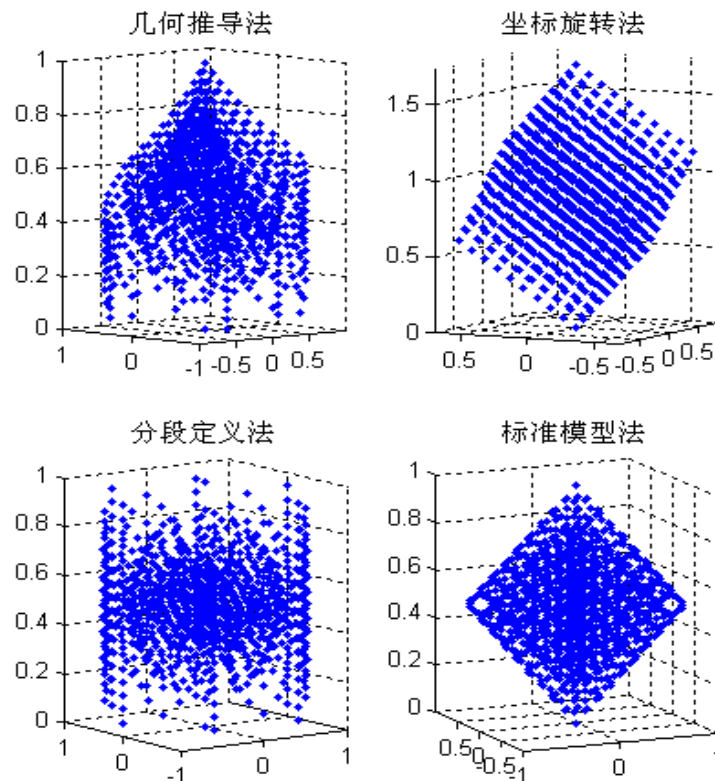


图 5 几种 RGB-HSI 转换算法的转换空间模型比较

几何推导法转换所得的 HSI 空间为上锥下柱体, 坐标变换法的转换结果为立方体旋转后形成的类棱锥体, 分段定义法的转换结果为分布密度内紧外松的圆柱体。三类空间结构有明显不同, 但都符合 HSI 模型的二大原则, 即亮度色度分离和两端色度渐弱原则, 因此都是可行的, 只是在转换值的分布上各具特点, 适用范围有所区别。

从空间结构分析, 饱和度 S 决定 HSI 模型水平截面上的由里向外的分布特征, 亮度 I 决定 HSI 模型垂直方向的分布特征。

将集合 D 用四种算法转换后, 得到的 1000 个 H 值分别用数组 h1,h2,h3,h4 表示。比较各数组间的差值 (表 3) 发现, 算法 1 和算法 2 基本等价, 算法 1, 算法 2 与算法 3 的色调转换结果比较接近, 算法 4 偏差较大。

表 3, 几种算法的 H 转换公式差异性比较

	$\max(x-y)$	$\text{mean}((x-y)/x)$
$x=h1, y=h2$	6.32×10^{-8}	0.045
$x=h1, y=h3$	1.95×10^{-2}	0.052
$x=h2, y=h3$	1.95×10^{-2}	0.042
$x=h1, y=h4$	1.91×10^{-1}	0.122
$x=h3, y=h4$	1.80×10^{-1}	0.073

从几种算法的 S 和 I 的转换公式可以看出, 三种算法有明显区别(图 6)。S 和 I 是决定三种算法的空间结构差异的主要原因。

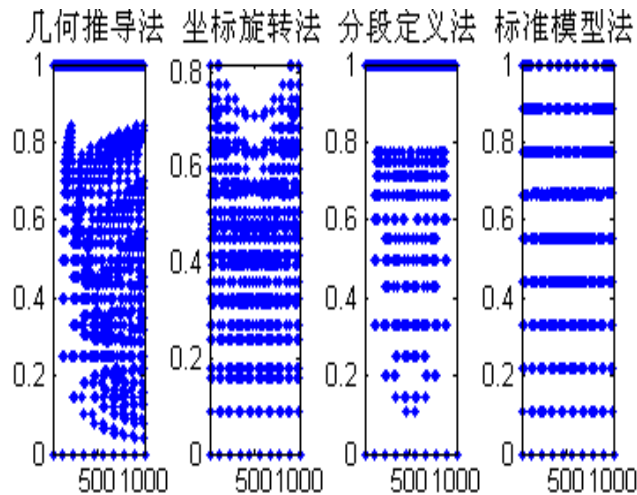


图 6 几种 RGB-HSI 转换算法的 S 值分布示意图

4 转换公式的映射能力比较

采用参考文献(Jian,2002)的方法测试各转换算法的颜色分辨力和分布均匀性, 比较各公式的转换特点。

全彩色立方的 RGB 三分量各分为 256 个级别, 因此可以表达的颜色总数共有 $256^3 = 16,777,216$ 种。

设 $E = \{x | x = (r, g, b), r, g, b \in [0, 255], r, g, b \in N\}$;

$Q = \{x | x = T(r, g, b), (r, g, b) \in E\}$ 。用 $|Q|$ 表示 256^3 种 RGB 颜色通过公式转换后可

以得到的不同值的个数, $|Q|$ 值越大, 说明转换公式的分辨力越高, 也可以说明该转换公式能更多地将颜色区分开来。

将集合 Q 进行排序, 组成新的集合 \bar{Q} 。 $\bar{Q} = \{q_n | q_n, q_{n+1} \in Q, q_n < q_{n+1}, n \in N\}$ 。

\bar{Q} 中相邻元素之差值组成新的集合 W 。 $W = \{x | x = q_{n+1} - q_n, q_n \in \bar{Q}, n \in N\}$

W 的标准差越小, 说明转换算法后的颜色值分布越均匀。

表 4 几种算法的饱和度(Saturation)映射能力测试

	$ Q $	W 标准差	W 平均值	W 最大值
几何推导法	39,583	4.08×10^{-5}	2.53×10^{-5}	0.0059
坐标变换法	11,519	9.90×10^{-5}	7.06×10^{-5}	0.0032
分段定义法	9,975	1.29×10^{-4}	1.00×10^{-4}	0.0078
标准模型法	256	0	0.0039	0.0039

表 5 几种算法的亮度(Intensity)映射能力测试

	$ Q $	W 标准差	W 平均值	W 最大值
几何推导法	766	3.95×10^{-17}	0.0013	0.0013
坐标变换法	766	7.53×10^{-17}	0.0023	0.0023
分段定义法	511	0	0.0020	0.0020
标准模型法	511	0	0.0020	0.0020

三种算法的 S 分量转换后的映射分布均匀性接近, 而算法 1 的 S 转换分辨力明显高出其他方法。几种算法的亮度 I 的转换能力接近。几种转换算法中, 只有标准模型法得到的模型在水平方向和垂直方向都完全平均分布, 因此其转换模型最接近于标准双圆锥体。

5 转换效率分析

将标准真彩色立方体的包含的 256^3 个取值点通过几种公式全部转换至 HSI 空间, 计算所需时间 (表 6)。测试程序由 TC2.0 编写, 以下各计算平台可通用执行。

表 6 各转换算法的执行时间对比(单位: 秒)

PC 机配置	几何推导法	坐标变换法	分段定义法	Bajon 近似算法	标准模型法
Intel Celeron 2.4G 内存 512M	580	468	335	306	226
AMD Athlon XP Processor 2800+ 内存:256M	193	168	144	138	108
AMD Athlon64 Dual Core 4000+ 内存:1G	4.5	5.3	2.1	2.0	2.0

结果表明, 随着计算机配置性能的提高, 各算法的转换效率大大提高, 但是转换效率间的差异有增大趋势。在最新的配置中, 各算法的运行速度差异可达 1 倍多。

6 应用测试

在烟叶的计算机视觉自动分级中，烟叶图像的颜色特征是极为重要的因素。采集到的 RGB 图像必须转换至 HSI 空间以模拟人工分级时的判断标准进行识别(图 7)。研究以一片烟叶为例，测试几种方法的转换效果。经过杂质去除，背景分割，形态学处理和标准白板校正后，逐点转换烟叶区域内的所有像素点，得到如下结果(图 8)。

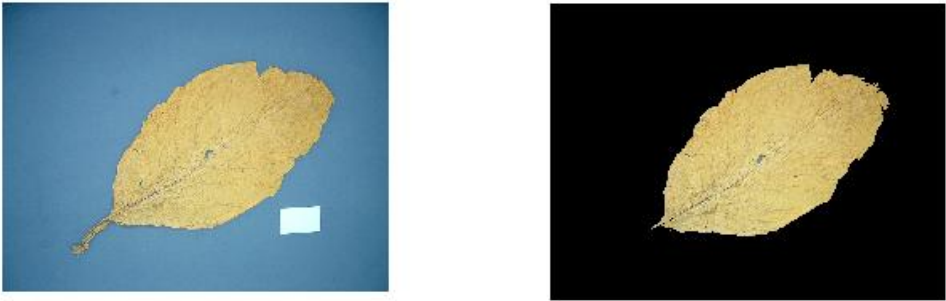


图 7 烟叶的机算机视觉分级系统样图

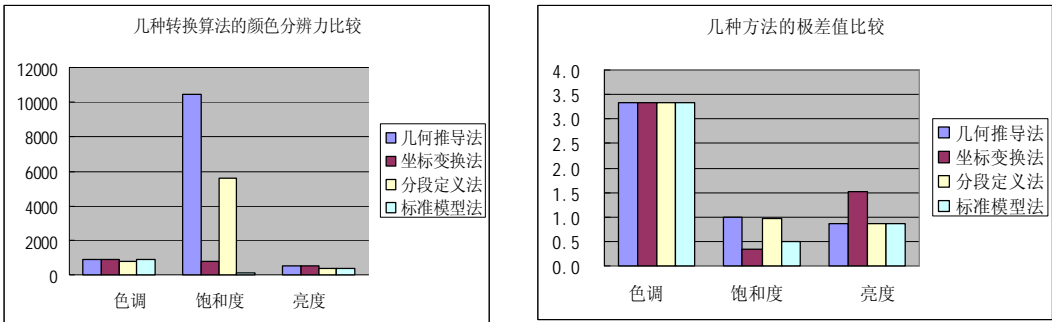


图 8 在烟叶自动识别中几种转换方法的比较

结果显示，几种方法的色调的转换结果大致相同，而饱和度和亮度的特征有明显不同。本研究中对颜色的细节识别要求很高，希望转换方法对颜色的分辨力尽可能大，因此选择算法 1 作为转换算法。

8. 结束语

RGB-HSI 的转换方法灵活，各具特点，应用中应该根据研究对象的特点，选择适当的转换算法（表 7）。

表 7 RGB-HSI 转换算法的应用选择

应用需求	分辨力高	对应关系准确	转换均匀性好	速度快	逆向还原准确
推荐算法	算法 1	算法 2	算法 2,5	算法 3,4,5	算法 1,2,3

参考文献

1. Tenenbaum, J.M., Garvey, T.D., Weyl, S., and Wolf, H.C., 1974, An Interactive Facility for Scene Analysis Research, Stanford Research Institute, Technical Note 87.
2. Kenneth.R.Castleman,Digital Image Processing. Prentice Hall Inc., New Jersey, 1996.
3. Gonzalez,R.C., and Woods,R.E., Digital Image Processing, 1st edition. Addison-Wesley, Reading.1992.
4. Bajon, J., Cattoen, M., and Liang, L., 1986, Identification of multicoloured objects using a vision module, Proc. of the 6th RoViSeC, Paris, 21-30.
5. Foley,J.D., van Dam, A., Feiner,S.K., and Hughes, J.F., 1990, computer graphics:principles and practice. Addison-Wesley, Reading.
6. Procedural Elements for Computer Graphics. David F. Rogers. CB/McGraw-Hill, 1998
7. Jian-Feng L, Kaun-Quan Wang,David Zhang. A new equation of saturation in rgb-hsi conversion for more rapidity of computing. Proceedings of the first international conference on machine learning and cybernetics,Beijing, 2002.

Comparative Studies on the conversion methods between RGB and HSI color models

Liu huabo

Resource and Environment College, Huazhong Agricultural University

Abstract

HSI color model was derived from the RGB color cube. Different conversion methods would lead to HSI model with characteristics. The study summarized several conversion methods, analyzed their differences and similarities, also gave some advice on the choice of a proper conversion method at applications.

Keywords: RGB-HSI conversion, color model, comparative study