

彩色图像中颜色不变性和 耀斑的分离 I

黄 玉 明

(航空航天部,北京控制工程研究所,北京 100080)

徐 光 佑

叶 培 建

(清华大学计算机系,北京 100084)

(中国空间技术研究院,北京 100081)

提 要

景物中物体表面的色品是与该物体形状无关的稳定特性,称为颜色不变性。但是,由于耀斑(highlight)和影调(shading)的存在,图像中对应物体表面点的色品却是变化的,不具有颜色不变性。正确理解图像颜色的基础是建立颜色反射的物理模型。本文叙述了根据 Klinker^[1]提出的双色反射模型(the dichromatic reflection model),在三维颜色直方图(3D color histogram)中利用 K-L 变换做平面拟合,分离面反射分量(interface reflection component)和体反射分量(body reflection component),从而计算光源和物体颜色色度坐标的方法,讨论了实际 CCD 摄像机的局限性,给出了实验结果。

关键词: 颜色反射模型、K-L 变换、色度坐标。

一、双色反射模型

当光线投射到非导体(dielectric material)如塑料上时,按照菲涅耳反射定律,物体表面将入射光的一部分直接反射出去,通常该部分反射光与入射光的色品相同;反射后的入射光剩余部分进入物体内部,被物体散射或在某些波段上被物体吸收,然后穿出物体,出射光的颜色由光源的颜色和物体的反射性质决定。物体表面的反射过程称为“(界)面反射”(interface reflection),“镜面反射”(specular reflection),“耀斑”(highlight),或“光泽”(gloss)。物体内部的反射过程称为“体反射”(body reflection),“漫反射”(diffuse reflection),或“体色”(matte color)。

双色反射模型认为,景物中一点的光谱辐射 $L(\lambda, i, e, g)$ 是一个面反射分量 $L_i(\lambda, i, e, g)$ 和一个体反射分量 $L_b(\lambda, i, e, g)$ 之和。其中 λ 为光的波长, i 为入射角, e 为出射角, g 为相位角。假设光照及物体反射的光谱性质与表面的朝向无关(即不考虑物体表面之间的相互反射),则每个反射分量又可分解为表示色品的光谱因子 $c(\lambda)$ 和表示几何因素的(决定颜色中的亮度分量)几何因子 $m(i, e, g)$ 之积,即

$$L(\lambda, i, e, g) = L_i(\lambda, i, e, g) + L_b(\lambda, i, e, g), \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} L_i(\lambda, i, e, g) &= m_i(i, e, g)c_i(\lambda), \\ L_b(\lambda, i, e, g) &= m_b(i, e, g)c_b(\lambda), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

彩色摄像机用三原色表示景物入射光的光谱。在成像过程中, 摄像机将投射到靶面像素位置 (x, y) 处的连续光谱通过三原色相加转换成在三原色空间中表示的颜色点 $\langle r, g, b \rangle$, 也就是说图像中 (x, y) 点的颜色 $c(x, y) = \langle r, g, b \rangle$, 相当于对各个波长上的光强按不同的加权求和; 而权值由相应的滤色片(红、绿、蓝)的透射率和摄像机的其它光敏特性决定。某点的彩色象像值 $c(x, y)$ 可表示成面反射分量 c_i 和体反射分量 c_b 的线性组合, 组合系数 $m_i(i, \theta, g)$ 和 $m_b(i, \theta, g)$ 由 (x, y) 在景物中的对应点的几何因素决定。即

$$c(x, y) = m_i(i, \theta, g)c_i(\lambda) + m_b(i, \theta, g)c_b(\lambda), \quad (3)$$

式中 $c_i(\lambda)$ 在整幅图像上为常数, 由单光源的色品决定; $c_b(\lambda)$ 在图像中的每个单色物体上为常数, 由景物中对应物体的色品决定。当把(3)式局限于图像上的每个单色物体时, 其中的 c_i, c_b 为常量, 而 m_i, m_b 为变量。按照双色反射模型, 根据彩色图像确定光源和物体色品的问题, 就归结为根据 $c(x, y)$, 由(3)式分解出面反射分量 c_i 和体反射分量 c_b 。

为利用双色反射模型对图像中物体的颜色分布进行描述和研究, 建立三维直方图, 其每一维均对应一个 RGB 原色。它的每个三维点不仅对应一种颜色(向量), 而且对应图像中具有该颜色的像素频数。三维直方图就是给每个三维点赋予一个频数的三维颜色空间。而面反射分量 c_i 和体反射分量 c_b 均对应于三维直方图的一个向量簇。如果 $c_i = \langle r_i, g_i, b_i \rangle$, 则 c_i 在三维直方图中对应的向量簇为 $kc_i = \langle kr_i, kg_i, kb_i \rangle$, k 是不为零的实数。前文中曾指出 c_i, c_b 均是颜色的色品, 即颜色的色度坐标。我们约定, 对于色品 $c_i = \langle r_i, g_i, b_i \rangle$, 有 $r_i^2 + g_i^2 + b_i^2 = 1$ (可参见第四节)。对于三维直方图中的任一个颜色点(向量) $\langle r, g, b \rangle$, 其色品为 $\langle nr, ng, nb \rangle$, $n = 1/\sqrt{r^2 + g^2 + b^2}$, 因而向量簇 kc_i 中的每个向量均具有相同的色品和不同的颜色(因为亮度不同), 同时该向量簇包含了三维直方图中所有同色品的向量。根据双色反射模型, 单色物体(色品 c_b) 在单光源(色品 c_i) 下形成图像的颜色分布均应位于由向量 c_i 和 c_b 决定的双色平面内。

二、K-L 变换与平面拟合

按照双色反射模型, 位于单光源(色品 c_i) 照明下的单色物体(色品 c_b) 在彩色摄像机中成像后, 物体上各处的彩色像素值集合 $\{c(x, y)\}$ 对应于三维直方图中的一个点集, 该点集应在由向量 c_i 和 c_b 所决定的平面上。如果有两个(或两个以上)不同色品的单色物体在同一光源下成像, 而且能求出各个物体像素颜色分布所决定的双色平面, 那么, 任两个双色平面的交线向量的色品就是光源的色品*。值得注意的是当光源与物体同色品时, 双色平面不存在; 当图像中两个物体同色品时, 双色平面重合。如果同一个物体在不同色品的光源下取两幅图像, 可类似地求出该物体的色品。

由于测量误差和噪声, 实际物体图像的颜色集合 $\{c(x, y)\}$ 在三维直方图中并不分布在理想的平面上, 而是有较大的散布。这给平面拟合带来困难, 本文采用 K-L 变换作预处理。K-L 变换也叫主元素变换, 在这里就是要求出颜色变化的最大方向和最小方向。而颜色变化的最小方向就是由 c_i, c_b 决定的双色平面的法线方向。然后取定一点为拟合平面上的点*得到拟合平面方程

* 由于 c_i, c_b 都是通过原点的向量, 它们所决定的平面当然也通过原点, 平面的交线也通过原点。

$$Ax + By + Cz + D = 0, \quad (4)$$

然后检查颜色点集绕拟合平面分布的情况,计算点集与拟合平面的平均距离和最大距离,决定是否进行 K-L 变换和变换的次数。在进行多次 K-L 变换时,给出距离阈值,只对与拟合平面距离小于距离阈值的点作新的 K-L 变换和平面拟合。按照双色反射模型 D 应为 0,但是由于彩色摄像机的光强-灰度的非线性关系和噪音, D 的绝对值往往很大(10 的数量级)。这也说明拟合平面与双色平面的误差较大。可以一方面使用多次 K-L 变换和平面拟合,尽量避免噪音颜色点参加拟合;另一方面通过实验总结出光强-灰度的非线性关系和噪音发生的规律**,恢复光强-灰度响应关系的线性性,并去除噪音,结果 D 的绝对值降到 5 以下。

三、实际摄像机模型

考虑到摄像机在实际成像过程中的限制,将双色反射模型与摄像机模型结合起来。下面谈谈 CCD 摄像机的特性是如何影响实际图像的像素值的。

颜色截断(color clipping):实际摄像机只有一个有限的动态范围来感受入射光的光谱强度,故分析只限于在一个颜色立方体中进行。如果在某个像素位置上入射光过强,摄像机就不能感受和表示,因而光的测量就在一个或多个颜色波段上被截断。

光晕(blooming):在 CCD 摄像机中,靶面某处所感受到的入射光过强,不但使该位置的感受元完全饱和,而且蓄积的电荷向邻近的像素扩散,使其像素值增加。称受影响的像素为光晕像素。

颜色均衡(color balancing):一般的 CCD 摄像机对红光比蓝光更敏感,并且未去除红外线对图像颜色的影响。可以采用浅蓝色的红外线截断玻璃过滤入射光,既可消除红外线的影响,又降低了对红光的敏感性。

γ -校正(Gamma correction):彩色像素值依赖于摄像机对入射光的反应。由于摄像机内部的 γ 校正和其它的一些变换(如颜色补偿),使得摄像机的输出和入射光的光强成非线性关系。这种非线性造成颜色空气中的弯曲,破坏了应用双色反射模型的线性基础。可以通过实验测定光强-灰度关系,对颜色象素值作了变换,恢复了线性关系。

颜色畸变(chromatic aberration):因为光学玻璃的折射系数是波长的函数,颜色畸变就出现在成像过程中。对于一个固定的焦距,聚焦最好的只能是一个波段的图像,其它两个波段的图像聚焦就差一些。颜色畸变对图像边缘的像素影响更大一些。该现象与镜头的质量有关。

四、实验结果及遇到的问题

按照色度学术语,某颜色的色度坐标(色品)指的是归一化(算术和归一)的三刺激值。若一点的三刺激值为 r, g, b , 则该点的色度坐标为 $R = r(r+g+b)^{-1}$, $G = g(r+g+b)^{-1}$, $B = b(r+g+b)^{-1}$ 。本文中使用的色度坐标的定义略有不同。这里的归一化是指几何空间中距离意义上的归一化(平方和归一)。若一点的三刺激值为 r, g, b , 则该点的色度坐标为

* 本文中取颜色集合的质心。

** 将另文发表。

$$R = r/\sqrt{r^2 + g^2 + b^2}, G = r/\sqrt{r^2 + g^2 + b^2}, B = b/\sqrt{r^2 + g^2 + b^2}, \quad (5)$$

一方面,新定义与K-L变换中的归一化相统一;另一方面,文献[2, 3]均采用这种定义方法,便于比较结果(显然本文的定义与标准定义之间的转换是容易的)。本实验中没有考虑颜色定标问题。采用的三原色和颜色空间均是IMAG图像系统原有的三原色和颜色空间。如果要对不同图像系统的颜色进行比较,可将这里的颜色坐标系转换到标准的CIE颜色坐标系(另文叙述)。

实验装置包括:PUNIX-TMC56R彩色CCD摄像机,IMAG彩色图像处理工作站即配有Data Translation公司的三块真彩色图像处理板DT2858、DT2869、DT2871和彩色图像监视器的SUN 386i工作站。实验室是密闭隔光的,用幻灯机产生白光光源,加下滤色片得到各种色光。利用中国计量科学院光学室提供的标准白板(A光源 10° 视场下的色度坐标为 $x=0.4525, y=0.4074$)测定白光及各种色光的色度坐标。

出于篇幅的考虑,给出三个实验结果。用到了白、黄、绿三种色光和三个物体:浅蓝色塑料茶杯,浅黄色塑料瓶,红塑料杯。事先测定了它们的色度坐标、白光 $\langle 0.59, 0.55, 0.60 \rangle$,黄光 $\langle 0.69, 0.68, 0.25 \rangle$,绿光 $\langle 0.14, 0.98, 0.14 \rangle$,蓝茶杯 $\langle 0.43, 0.53, 0.73 \rangle$,黄塑料瓶 $\langle 0.64, 0.61, 0.47 \rangle$,红塑料杯 $\langle 0.96, 0.19, 0.18 \rangle$ 。实验时,需要分割如图像中的物体区域,作为算法的输入。

实验一: 求光源的色品

输入: 蓝茶杯和黄塑料瓶在白光下的分割图像,如图1所示(请见彩色插页No. 1~3图)。

输出: 白光的色度坐标 $\langle 0.62, 0.53, 0.58 \rangle$ 。

实验二: 求光源的色品

输入: 蓝茶杯和黄塑料瓶在黄光下的分割图像,如图2所示(请见彩色插页No. 4~6图)。

输出: 黄光的色度坐标 $\langle 0.65, 0.73, 0.18 \rangle$ 。

实验三: 求物体的色品

输入: 红茶杯在黄光和白光下的分割图像,如图3所示(请见彩色插页No. 7~9图)。

输出: 红茶杯的色度坐标 $\langle 0.96, 0.20, 0.18 \rangle$ 。

在实验中发现,如果光源色品和物体色品差别较小(表现为光源色品向量 \mathbf{c}_l 和物体色品向量 \mathbf{c}_o 在三维直方图中的夹角较小),则由该物体分割图像形成的拟合平面不稳定,易受噪音的影响。这是因为虽然理论上两个不同的向量可以确定一个平面,但实际上这两个向量夹角越大($<90^\circ$)。它们决定的平面就越稳定,否则就越不稳定。所以在计算光源和物体的色品时,如果光源色品与物体色品差别较小,则算法得到的光源色或物体色就不准确。

参 考 文 献

- [1] G. J. Klinker et al.; *Internat. J. Computer Vision*, 1988, 2, No. 1, 7~12.
- [2] G. J. Klinker et al.; *Internat. J. Computer Vision*, 1990, 4, No. 1, 7~38.
- [3] G. J. Klinker et al.; *«DAPAR-Image Understanding Workshop»*, Los Angeles, CA, February, 1987, 614~618.

The separation of color invariance and highlight in color image (I)

HUANG YUMING

(*Beijing Institute of Control Engineering, Aerospace Ministry, Beijing 100080*)

XU GUANGYOU

(*Computer Science Department Qinhua University, Beijing 100084*)

YE PEIJIAN

(*Chinese Academy of Space Technology, Beijing 100081*)

(Received 27 August 1990; revised 4 March 1991)

Abstract

The chromaticity of an object surface in scene is a constant feature irrelevant to the object shape, which is called color invariance. But that of the corresponding object in image is variable because of the [existence of highlight and shading, no color constancy is observed. To construct a physical model of color reflection is a way to understand the image color correctly. This paper describes a method for computing illuminant and object chromaticity coordinate, which is based on the Dichromatic Reflection Model proposed by Klinker et al^[1]. First deals with plane fitting in 3D color histogram using K-L transform, then separates the interface reflection component from the body reflection component. Also the limitation of practical CCD cameras is discussed and the experimental results are presented. (Fig. 1~3: see color inset No. 1~9) .

Key words: color reflection model, K-L transform, chromaticity coordinate.