

# 光照色调颜色恒常性算法研究

蔡 珣 孟祥旭 向 辉

(山东大学计算机科学与技术学院人机交互与虚拟现实实验室, 济南 250061)

**摘 要** 提出了一种新的适合于实时处理视频图像颜色识别的光照色调颜色恒常性算法。该算法主要解决在视频颜色识别中,由于近点光源的发散作用和复杂背景影响下所造成的目标对象在图像局部各点上的颜色识别问题。在彩色感知的光学原理和数学模型基础上推导出了光照校正算法,并利用色调校正实现颜色恒常性。通过试验分析评估了各种识别算法,如光照校正、色调校正、光照色调校正、以及线性回归算法对颜色的校正效果,最后将测得的颜色差值和色调差值进行对比,证明了本算法对点光源散射作用引起的光照变化具有良好的校正作用,并证明了其算法理论推导的合理性。该算法的运算复杂度为 $O(n)$ ,因而适合于视频的实时处理。

**关键词** 视频 颜色恒常性 光照 强度 色调

**中图分类号**: TN911 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2004)08-0922-05

## The Study of an Illumination & Hue Color Constancy Algorithm

CAI Xun, MENG Xiang-xu, XIANG Hui

(The human-interaction & virtual-reality research department in School of Computer Science and Technology of Shandong University, Jinan 250061)

**Abstract** This paper presents a new color correction algorithm called Illumination & Hue Color Constancy. The algorithm mainly resolves the color constancy issue of which color features of the various spatial points are often influenced by the effects of the scattered lightness of the near light source with the complex background in video color recognition research. Based on the illumination principle and the mathematic model of color sense, this paper combines the illumination corrective algorithm with the hue corrective algorithm to achieve the color constancy. By constructing a simulation of the machine vision system, the paper evaluates the algorithm's color recognition ability, and also shows the errors values of RGB and hue to analyze its corrective ability. With the comparison of the experimental results for illumination corrective algorithm, hue corrective algorithm, illumination & hue corrective algorithm, and linear regression algorithm, the paper demonstrates that the algorithm has not only good corrective ability for the color influenced by the effect of the invariant illumination under scattering light, but also has accurate recognition ability for the color features. As a result, the paper presents that the theory of the hue & illumination algorithm is rational and corrective. Taking the advantage of the compute complexity which is  $O(n)$ , the hue & illumination technique is easy to achieve and might have extensive usefulness in real-time video recognition.

**Keywords** video, color constancy, illumination, brightness, hue

## 1 引 言

视觉识别在生产生活中的应用领域越来越广泛,如视频监控、基于内容的图像/视频检索,其中最重要的是解决颜色的识别问题。由于视觉识别主要

有3个影响因素,即光照、场景反射性能和成像系统的传感器性能,其直接影响的效果之一是颜色的光谱能量的变化,使得采集到的RGB 3个颜色通道的变化差异很大。因而,如何能消除光照等因素造成的影响,实现与人类一样的视觉自动补偿功能,即所谓的颜色恒常性是目前的一个研究方向。

在颜色恒常性问题中,由于点光源的发散作用,空间上各点所采集到的同一目标场景上的颜色值即使在同一颜色光照下也往往不同,因而如何克服这种影响因素是本文将要讨论的问题。目前大量文献对颜色恒常性问题的研究主要集中于不同颜色光照对图像的整体场景颜色的影响,而缺乏对同一颜色光照的近点光源造成的局部影响的研究,如彩色相关性法<sup>[1]</sup>、监督色板颜色校正法<sup>[2]</sup>、Bayesian 颜色恒常性算法<sup>[3]</sup>等。另外,这些算法多采用线性或非线性回归的方法,建立标准颜色和非标准颜色的线性或非线性转换矩阵,其转换矩阵的精确度需要大量的测量数据,因而计算也较复杂。而在很多实际情况下,采集到的图像往往是在某近点光源下拍摄的,如晚上室内灯光下或通过投影仪投影的图像,其目标场景受光照强度的影响很大,如何在这种条件下对物体进行识别是本文将要讨论的主要内容。

本研究针对近点光源引起的光照变化对场景局部特性的影响,在彩色感知的光学原理基础上推导出了一个光照强度校正算法,并利用 HSV 颜色空间提出了色调匹配算法,通过二者结合实现了光照色调颜色恒常性算法。最后通过一个机器视觉模拟系统,对某近点光源照射下的场景上各点的颜色值进行识别,并对试验结果进行详细分析,从而证明了其算法的有效性和合理性。

## 2 直接色调匹配法

在彩色空间中,色调、色饱和度、亮度是 3 个基本属性。其中,色调是彩色的最重要属性,是决定颜色本质的基本特征。在物体表面材料不变的情况下,投影光照强度的变化对物体表面色彩的色饱和度和光强影响很大,但对色调的影响较小,因而采用以色调、色饱和度、光强为特征的颜色空间即 HSV 颜色空间,对标准颜色进行识别。

由于成像系统的传感器一般为 RGB 3 色传感器,所以需将 RGB 颜色空间转化为 HSV 颜色空间,其转换算法如下<sup>[4]</sup>:

```
void RGB_To_HSV (double r, double g, double b, double h, double s, double v)
{
    double max=maximum(r,g,b);
    double min=minimum(r,g,b);
    v=max;
```

```
s=(max!=0.0)?((max-min)/max):0.0;
if(s==0.0)
    h=UNDEFIND;
else{
    double delta=max-min;
    if(r==max)
        h=(g-b)/delta;
    else if(g==max)
        h=2.0+(b-r)/delta;
    else if(b==max)
        h=4.0+(r-g)/delta;
    h*=60;
    if(h<0.0)
        h+=360;
}
```

假定平面上有若干点 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ,其每个点的 RGB 值经过转换后所对应的色调分别为 $\{H_1, H_2, \dots, H_n\}$ ,则当某标准点  $s$  的色调为  $H_s$  时,就可将满足下式的各点视为颜色相同。

$$\{x_i | |H_i - H_s| \leq \alpha, i=0, \dots, n\} \quad (1)$$

其中,  $\alpha$  为色调阈值。

## 3 光照强度校正算法

由于在近光源照射下,光源中心的色调变化较大,不同物体可能呈现相同的色调,因而为了提高识别精度,在光学辐照原理<sup>[5]</sup>的基础上对彩色感知数学模型推导出了光照强度校正的数学模型。

### 3.1 光照强度的彩色感知模型

假定在一个平坦的、无光泽的 Lambertian 平面<sup>[6]</sup>上进行近点光源的投影,并从投影法线方向进行采样,该视觉成像系统如图 1 所示。

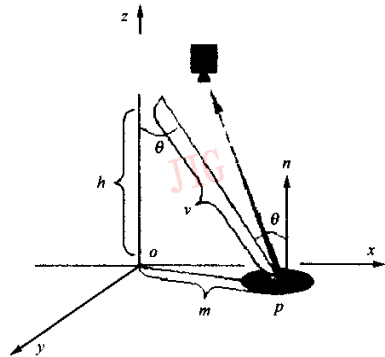


图 1 彩色感知系统的模型

则对于某波长为  $\lambda$  的彩色光照,在以投影方向为中心的欧几里得坐标系中,根据光学辐照原理和 Lambertian 余弦定律<sup>[6]</sup>,可推得某点  $p$  的反射光照强度为

$$L_p(\lambda) = \frac{E_o(\lambda)}{\pi} \cos\theta_p \quad (2)$$

其中,  $L_p(\lambda)$  为点  $p$  的反射光照强度,  $\theta_p$  为  $p$  点表面片的法线与光源方向矢量间的夹角,  $E_o(\lambda)$  为某波长的投影光的最大发光强度,即垂直于平面的法线方向的光强。该式表明某波长光源在表面片上照明的感觉亮度随着单位表面法线的人射角的变化而变化。

### 3.2 光照强度数学模型推导

在机器视觉中,由于成像系统的第  $k$  个颜色传感器采集到的某点  $p$  的颜色值可表示为<sup>[6]</sup>

$$\rho_{kp} = \int_{\lambda} E(\lambda) S_p(\lambda) R_k(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

其中,  $S_p(\lambda)$  是场景上某一点  $p$  对每一个波长的反射率;  $E(\lambda)$  是在每一个波长上入射光照光谱能量分布 (SPD);  $R_k(\lambda)$  是成像系统的第  $k$  个颜色传感器的光谱灵敏度,即对每个波长能吸收多少比例的投影光。上述 3 个因素作用的结果是  $\rho_{kp}$ ,即成像系统在像素点  $p$  处的第  $k$  个传感器的响应。

其离散形式为

$$\rho_{kp} = \sum_{i=1}^m E(\lambda_i) S_p(\lambda_i) R_k(\lambda_i) \Delta\lambda \quad (4)$$

由于  $E(\lambda_i) S_p(\lambda_i)$  决定了系统的反射光照,因而可以将其视为  $L_p(\lambda_i)$

利用式(2)将  $L_p(\lambda_i)$  代入,可推得

$$\begin{aligned} \rho_{kp} &= \sum_{i=1}^m \frac{E_o(\lambda_i)}{\pi} \cos\theta_p R_k(\lambda_i) \Delta\lambda \\ &= \frac{\cos\theta_p}{\pi} \sum_{i=1}^m E_o(\lambda_i) R_k(\lambda_i) \Delta\lambda = \frac{\cos\theta_p}{\pi} \rho_{ok} \end{aligned} \quad (5)$$

因此

$$\rho_{ok} = \rho_{kp} \frac{\pi}{\cos\theta_p} \quad (6)$$

其中,  $\rho_{ok} = \sum_{i=1}^m E_o(\lambda_i) R_k(\lambda_i) \Delta\lambda$ , 可视为该种颜色在投影光照下的最大光强。

### 3.3 $\cos\theta_p$ 的计算

根据图 1 所示,假定已知光源到投影平面的距离为  $h$ ,法向投影点为  $o$ ,则平面上某点  $p$  与法线方向的夹角  $\theta_p$  的余弦值为

$$\cos\theta_p = \frac{1}{\sqrt{\tan^2\theta_p + 1}} \quad (7)$$

其中,

$$\tan\theta_p = \frac{m}{h} \quad (8)$$

$m$  为点  $p$  与法向投影点的距离。

### 3.4 光照强度校正算法

光照强度算法步骤如下:

(1) 确定 Lambertian 平面上—标准参考点  $S$ , 其 3 个颜色传感器的 RGB 值分别为  $\{\rho_{rS}, \rho_{gS}, \rho_{bS}\}$ , 在投影图像中的位置为  $\{x_S, y_S\}$ 。

(2) 确定已知光源在平面上的法向量投影点为  $o$ ,采集场景的范围长  $long$ ,宽  $width$ ,高  $height$ 。

(3) 通过式(7)可计算  $\cos\theta_p$ ,即标准参考点与光源的连线和平面法向量的夹角余弦值。

(4) 根据式(6),可以得到其最大光强分量为  $\{\rho_{or}, \rho_{og}, \rho_{ob}\}$ 。

(5) 对于平面上其他各点的颜色值,根据式(5),得到其校正后的光照值。

通过上述步骤,可看出该算法的复杂度为  $O(n)$ 。

## 4 光照色调颜色恒常性算法

鉴于光照强度校正算法 RGB 颜色匹配虽然能有效实现光照但不能体现颜色本质的缺点,如果将光强补偿后的 RGB 转换到 HSV 空间中进行匹配,势必产生良好效果,因而在上述两种算法的基础上将光照色调相结合,提出了将光照校正后再结合色调转换的光照色调颜色恒常性算法。该算法步骤是先进行光照强度校正,并对校正后的颜色值进行色调的匹配,对满足式(1)的各点将视为目标颜色值。另外,经算法分析可得其算法复杂度仍然是  $O(n)$ 。

## 5 试验结果对比分析

为了验证光照色调颜色恒常性算法对颜色的校正,设计了一个机器视觉识别模拟系统。该系统是在普通日光灯光源的投影下,采用 10 MOONS 系列的 CCD 数字摄像机对地面方向进行拍摄,摄像角度为日光灯对地面的法线方向,并确定摄像机与地面的垂直高度及所拍区域的大小,最终的拍摄结果如图版 I 图 1(a)所示。该图显示了黄色花纹地板上有两张白色的复印纸,和一本深蓝色封皮的书,周围的白

色线条用于标示大致摄像范围,中间发亮的不规则区域为光照法线方向投影下的亮点,图像上还有少量拍摄时投影下的阴影。试验以地板为识别对象。

### 5.1 试验结果分析

首先将花纹地板区域的某一点作为参考颜色点,将摄像中最亮的区域作为光源法向投影点,采用直接色调匹配法、光照补偿匹配法、光照色调相关性算法进行识别,并和未校正直接识别法进行对比,其识别效果如图版 I 图 1(b)~(e)所示。

图版 I 图 1 中均用纯绿色标示出校正后所识别的像素点,通过分析可以看出:

(1) 光照校正后的颜色识别(图版 I 图 1(c))比直接颜色识别(图版 I 图 1(b))补偿了光照的影响,因而识别效果大大改善,且识别的部分比较集中,边缘较整齐。但由于 RGB 颜色分量对光照的敏感性,因而在摄像机投影的阴影区域和图像边缘部分仍然有识别不到的地方,因而识别范围不是很大。

(2) 色调匹配法(图版 I 图 1(d))有效弥补了 RGB 颜色匹配的缺陷,识别范围广,且能较好地减少影子造成的影响,但识别区域内部常有散乱点出现。

(3) 光照色调颜色恒常性算法(图版 I 图 1(e))有效克服了色调匹配和光照校正算法的缺陷,其识别效果边缘清晰,识别精度也大大提高了。

### 5.2 线性回归算法对比分析

采用线性回归算法进行颜色校正。首先将采集到的图像平均分为 36 块,分别对每一块又平均采样 4 个点进行线性回归,计算出每块的补偿系数,最后得到校正后的颜色值,试验效果见图版 I 图 1(f)。从图中可看出该算法的效果并不理想,其原因主要有以下两点:

(1) 线性回归算法由于其补偿系数将用于图像的整体,当需要识别图像的局部特性时,则要求图像的背景单一或根本就没有背景,此时目标物就是图像整体或大部分背景,此时的系数将适合于局部特性的补偿。而本文处理的图像,背景物较多,因而对图像的不同部分,采用统一的补偿系数是不适合的。

(2) 线性回归算法适于处理静态图像的整体效果,而对于视频图像由于图像内容不断变化,则要求算法不断求取其补偿系数,因而不适合的,而本文提出的算法其算法简单,复杂度只有  $O(n)$ ,所以更适用于实时处理。

### 5.3 RGB 和 HUE 校正前后对比分析

为了进一步评估算法的性能,仍以上述机器视觉系统为例,在图版 I 图 1(a)所示的图像上均匀采集 9 个点,其分布位置和排列顺序如图 2 所示。

1	4	7
2	5	8
3	6	9

图 2 采样点平面分布图

通过计算参考点校正前各采集点的颜色值  $|\Delta E'|$  和校正后各采集点的颜色差值  $|\Delta E|$ ,其中  $\Delta E = \sqrt{(\Delta R)^2 + (\Delta G)^2 + (\Delta B)^2}$ ,  $\Delta R$ 、 $\Delta G$ 、 $\Delta B$  为 3 个颜色通道的差值,并测出校正前各采集点的色调差值  $|\Delta H'|$  和校正后各采集点的色调差值  $|\Delta H|$ ,则试验测量结果如图 3 所示,其中横坐标为对应于图 2 采样点的序号,纵坐标为校正前后标准点和采样点的差值。

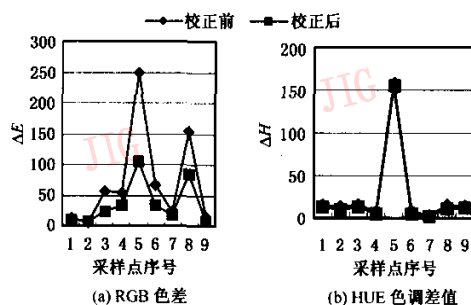


图 3 校正前后 RGB 色差和 HUE 色调差对比曲线图

从图 3 中可以看出,经过校正后的  $|\Delta E|$  和  $|\Delta H|$  都比未校正前有不同程度的减少,其中  $|\Delta E|$  变化最为明显,从而证明了光照补偿的作用。 $|\Delta H|$  差别不大,说明色调具有光照非敏感性的特点,因而适合于颜色的识别。

综上所述,采用光照校正后的色调匹配法,即光照色调非相关性颜色恒常性算法,既充分利用了光照的补偿作用,又利用了色调对光照非敏感性的特点,从而再次证明了其理论推导的合理性和实际应用中的有效性。

## 6 结 论

针对视频视觉识别中由于近点光源的散射作用和复杂背景下对空间上各点的颜色识别的影响,提

出了一种新的光照色调相关性颜色恒常性算法并详细阐述了其推导过程。该算法在光学基本原理和彩色感知的数学模型基础上推导出光照强度校正算法,并结合色调理论得到光照色调颜色恒常性算法。通过建立一个机器视觉识别模拟系统,从3种不同算法的识别效果图中证明了光照色调恒常性算法推导的合理性,并通过计算校正前后的颜色值和色调值更进一步证明了算法的有效性。通过分析常规线性回归校正算法在本文中的实用性,从而证明了本算法由于其复杂度为 $O(n)$ ,以及处理复杂背景图像的能力,因而在视频实时处理中更具有可行性。

### 参考文献

- 1 Finlayson Graham D, Hordley Steven D, Hubel Paul M, *et al.* Color by correlation: a simple, unifying framework for color constancy [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, 23(11):1209~1221.
- 2 刘关松,吕嘉雯,徐建国等. 监督颜色校正方法研究[J]. 计算机学报, 2003, 26(4):502~506.
- 3 Brainard D H, Freeman W T. Bayesian color constancy [J]. Optical Society of America, 1997, 14(7):1393~1411.
- 4 James D, Foley Andries Van Dam, Stern K Feiner, *et al.* Computer Graphics Principles and practice(影印版第二版)[M]. 北京:机械工业出版社, 2003:590~592.
- 5 高凤武,李继祥. 应用光学[M]. 北京:解放军出版社, 1986:132~156.
- 6 贾云得. 机器视觉[M]. 北京:科学出版社, 2000:141~142.
- 7 Barnard Kobus. Model Scene Illumination Color for Computer Vision and Image Reproduction; A Survey of Computational approaches [EB/OL]. <http://vision.cs.arizona.edu/kobus/research/projects/depth-exam/depth-exam/index.html>, 2004-04-25.



蔡 珣 1971年生。在读博士生、讲师。1993年于山东工业大学自动化系获学士学位,2001年于山东大学计算机学院获硕士学位。主要研究方向为图像/视频识别、人机交互技术。

E-mail:caixunzh@sdu.edu.cn



孟祥旭 1962年生。博士生导师、教授。1982和1985年于山东大学计算机学院获学士学位和硕士学位,1998年于中国科学院计算技术研究所获博士学位。主要研究领域为图形/图像处理、人机交互和虚拟现实。



向 辉 1970年生。博士、副教授。1993年于中国科技大学计算机系获学士学位,1996年于浙江大学计算机系获硕士学位,1999年于浙江大学计算机系获博士学位,1999~2000年曾于美国 Wisconsin Madison University 做博士后研究。研究领域为多媒体数据安全与多媒体水印、人机交互和虚拟现实。

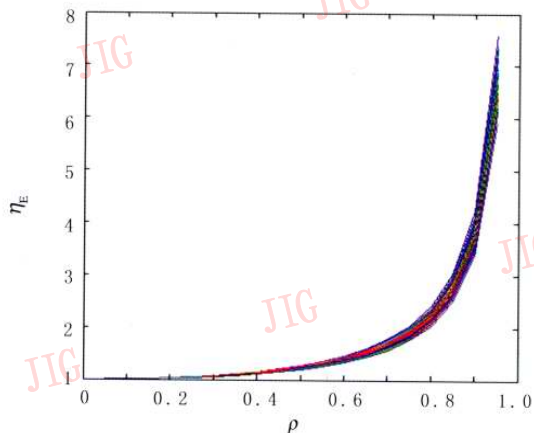


图1 56组候选变换基的 $\rho$ - $\eta_E$ 曲线

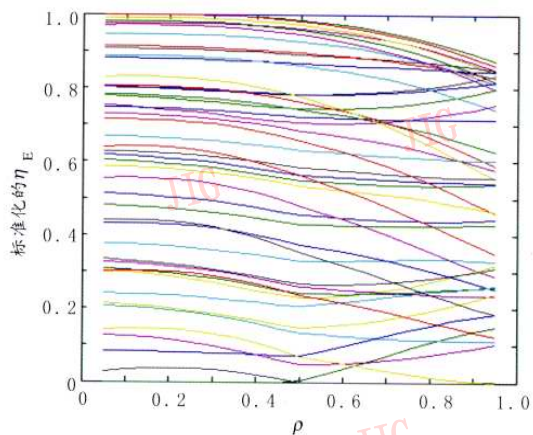


图2 56组候选变换基标准化后的 $\rho$ - $\eta_E$ 曲线

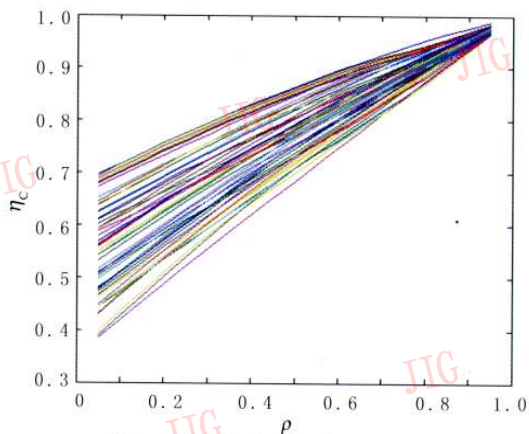


图3 56组候选变换基的 $\rho$ - $\eta_C$ 曲线

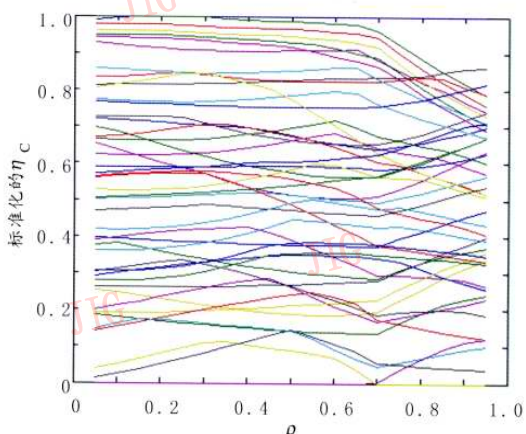


图4 56组候选变换基标准化后的 $\rho$ - $\eta_C$ 曲线

蔡 珣等：光照色调颜色恒常性算法研究



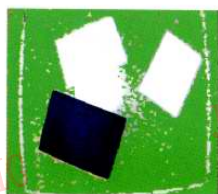
(a) 摄像采集的原图



(b) 直接RGB识别效果图



(c) 光照校正效果图



(d) 直接色调匹配效果图



(e) 光照色调校正效果图



(f) 线性回归颜色校正效果图

图1 各种识别算法效果图