

直接从 RGB 估计光谱的量子统计方法

李宏东 刘济林 叶秀清 顾伟康

(浙江大学信电系信息与智能系统研究所, 杭州 310027)

摘要 从光量子统计思想出发推导了一种估计光谱的新方法。对真实图象进行了估计实验,取得了良好的效果,表明方法的有效性。

关键词 RGB 彩色信号 光谱估计 彩色视觉 颜色恒常

0 引言

通常的彩色图象处理和彩色视觉处理都是基于三通道彩色信号来进行,比如 RGB 三刺激值, XYZ, HSI, Lab 等。然而很多实际处理问题的解决,本质上要求知道图象中一点的光谱组成。这类问题有很多,诸如,包括彩色视觉中的颜色恒常计算(Color Constancy)、虚拟现实绘制中的色彩反混淆(Anti-aliasing),彩色印刷和显示中的高保真再现等^[1~3],目前都是采用分通道方式处理。由于彩色信号是对应光谱成分的一种投影,一旦我们能够得到光谱成分的一个合理估计,那么这些目前难处理的问题将会变得容易。

生理学研究表明,人眼中有3种用于感知颜色的视锥体,峰值波长分别对应可见光谱的长波、中波和短波部分,因而得到R,G,B信号。人眼对材料颜色的辨识能力很强,表现在对外界环境光照变化有很强的适应性,这称为“颜色恒常”(Color Constancy)现象。这似乎表明人眼有能力从RGB信号中感知光谱并且分离出对应光源和材料表面的光谱成分。

单从RGB3个信号试图估计光谱值明显是一个不定(病态估计)问题,人类视觉系统要得到合理的解(但不一定是唯一解)必然要利用关于物理

世界的约束或假设。这种约束或假设可以视为人类视觉系统在长期进化过程中发现的规律。

本文提出一种利用光量子统计理论的光谱估计新方法,它基于如下一种假设,即人类视觉系统的RGB3种视锥的光谱敏感分布曲线的形状具有一种优良的特性,它使得从3个彩色信号值中能够最大程度的传递光谱分布信息,而且所估计的光谱形式为最可几分布。这种假设构成了一种物理约束,而这种约束正则化了上述的不定估计问题。

研究表明本文方法能够很好地应用到彩色图象分割和颜色恒常的处理。但是,值得指出的是,利用这种方法估计出的光谱未必就是对应原始图象中该点拍摄时的真实物理光谱,而仅仅是一种合理的中间级的估计。比如自然界广泛存在“同色异谱”(metamer)现象(系指尽管光谱组成很不相同,但是能给出同样的R,G,B三刺激值^[4]),因而可以认为本文算法估计出的是一种合理的“同色异谱”。然而即便如此,对很多的实际的彩色视觉问题,比如按材料的彩色分割和室内环境中视觉机器人操作等,我们相信本文提供了一种有力的处理方法。

1 以前的光谱估计算法

1.1 问题的描述

人眼有3种感知颜色的视锥,峰值波长分别对

应可见光波段的长波、中波和短波部分, 设其敏感度曲线为 $r(\lambda), g(\lambda), b(\lambda)$ 已知, (均可通过测量或查表获得), λ 是波长, 对整个可见光范围积分, 它们满足约束

$$\int_{\lambda} [r(\lambda) + g(\lambda) + b(\lambda)] d\lambda = 1 \quad (1)$$

则人眼在图象平面上感知到的 RGB 三刺激值彩色信号分别为

$$\begin{cases} R = \int_{\lambda} I(\lambda) \cdot \rho(\lambda) r(\lambda) d\lambda & (2) \\ G = \int_{\lambda} I(\lambda) \cdot \rho(\lambda) g(\lambda) d\lambda & (3) \\ B = \int_{\lambda} I(\lambda) \cdot \rho(\lambda) b(\lambda) d\lambda & (4) \end{cases}$$

其中, $I(\lambda)$ 为该点入射的外界光照光谱, $\rho(\lambda)$ 为该点对应的材料表面光谱反射率曲线, λ 取可见光波长范围 (如 400~710nm)。

记 $P(\lambda) = I(\lambda) \cdot \rho(\lambda)$ 为感知光谱, 它是光照光谱和材料光谱的乘积组合, 是我们需要估计出的光谱分布。

利用光学测量手段, 比如分光光度计, 可以实测场景中一点的真实光谱, 但是这种测量在图象处理中几乎无法实现。本文研究的主要目标是从一幅已经拍得的彩色图象中, 即直接从 RGB 三刺激值中恢复出 $P(\lambda)$ 。

记敏感度曲线为 $s(k)$, 三刺激值为 $x(k)$, 其中 $k = \{r, g, b\}$, 则式(2)~(4)的向量形式为

$$\mathbf{X} = \mathbf{S}\mathbf{P} \quad (5)$$

其中, $\mathbf{X} = [R, G, B]$, \mathbf{S}, \mathbf{P} 分别是 $3 \times N$ 和 $N \times 1$ 的传感器敏感曲线和待估的光谱分布向量。 N 一般取 (15~40) 间, \mathbf{X}, \mathbf{S} 已知, 而 \mathbf{P} 是未知量, 显见问题高度欠定。

1.2 以前的算法

Pratt^[1] 解决这个问题的方法是, 对一个固定光照和材料的场景, 对已知具有同一光谱组成的多个位置分别进行多次测量, 目的是利用最小二乘算法估计 \mathbf{P} 的伪逆解。此算法成功的运用在彩色扫描仪光谱特性估计中, 我们指出, 这种限定测量和观测条件的估计算法对本文目的意义不大。

Funt^[2], Glassner 等采用的有限维光谱 FDM 模型是基于早期 Cohen(1964), Judd(1964) 的实验结果。他们发现常见材料及自然光照的光谱特性曲线一般是非常平坦或光滑的。因而用某种基函数作低阶展开。Yullier^[5] 和 Maloney^[6] 更进一步利用

FDM 模型和平面蒙德里安(Mondriaan)色块世界的假设直接恢复出分离的光源光谱和材料光谱。

Ho^[3] 提出一种利用成象色散效应来恢复光谱成分的算法, 取得较好的效果, 但需对成象设备作高精度的校正。还有人利用数学上的凸集投影方法来估计光谱。

2 基于光量子统计的光谱估计

2.1 本文方法的基本思想

我们的目的是仅仅由单点的 RGB 3 个测量值估计出对应的合理的 N 维光谱向量 \mathbf{P} (这里取 10nm 采样间隔, 从 400nm~710nm, 所以 $N=32$) 可资利用的约束条件不足, 所以解有很多组, 问题不适应。要得到唯一解, 需引入其他的物理约束。

已知自然界中存在大量的“同色异谱”现象, 也即能满足约束的 \mathbf{P} 的解有多个。本文认为在所有这些谱中, 存在唯一光谱形式, 它出现的可能性(或概率)最大, 即选择 \mathbf{P} 使得,

$$\mathbf{P} = \text{Argmax} \{ \text{Prob}(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \dots, \mathbf{P}_N) \} \quad (6)$$

也即估计出的光谱分布 \mathbf{P} 为最可几分布形式。

2.2 光量子统计法光谱估计

光是由光量子(简称光子)组成的。在统计物理学中, 光子是一种称为“玻色子”(Bose)的粒子, 即单个光子本身是不可区分的, 但是具有一定的“态”。态反映的是光子的自由度, 如能级(即频率), 自旋等。由于有态的区别, 所以可以用大量光子的集体行为来刻划某束光的特性。例如, 光束的颜色反映的其实是大量光子的能级(频率)分布。所谓光谱分布曲线本质上是光子群的频率统计分布曲线。如果一束呈现红色, 说明其中的能级位于长波部分的光子数目占优势。

由于光谱是光子在不同能级上的随机分布, 我们希望从 RGB 所估计出的光谱形式以最大概率出现, 即对应分布为“最可几分布”, 或者用量子力学的术语, 使这种分布形式达到最大“简并度”。根据玻色—爱因斯坦统计理论^[7] 可用若干量子态来描述单个光子。为叙述方便, 我们把频率态称为光子的主态, 而其它态为从态。这样, 设第 i 个频率态中含有 P_i 个光子, 其中的每个光子还有 Z 个从态。于是, 这 P_i 个光子在 Z 个从态上的分布方式的数目为

$$W_i = \frac{(P_i + Z - 1)!}{P_i! \cdot (Z - 1)!} \quad (7)$$

由于在不同的频率上的分布方式相互独立,所以,对于 N 个频率态,总的分布方式数目应为各 W_i 的连乘,即

$$W = \prod_{i=1}^N W_i \quad (8)$$

采用对数概率分布形式。所谓求最可几分布,即要求满足

$$\max \{\ln W = \sum_{i=1}^N \ln \frac{(P_i + Z - 1)!}{P_i! \cdot (Z - 1)!}\} \quad (9)$$

利用斯特林近似公式并考虑如下两种情况,1) $P_i \gg Z$, 即次态数目较少,反映光线较强或相干度高; 2) $Z \gg P_i \gg 1$, 即每个频率态上的光子的次态自由度仍然很大,可理解为光强较弱,或相干性差。将上述不等式代入(9),经近似,分别可得

$$\ln W \propto \sum_{i=1}^N \ln P_i; \quad \ln W \propto - \sum_{i=1}^N P_i \ln P_i \quad (10)$$

此式把某种分布的出现几率与该分布曲线的具体形状联系起来。最大化上式中的前一项或后一项构成所要求的物理约束。二者分别是对光束情况作不同情况的假定下的近似,基于二者所得到的光谱形状上是类似的。实际应用时,在无其他先验前提下,可任意择一。本文中最大化前一项。

联立可得如下 Lagrange 能量函数, α, β, γ 为待定乘子, P_i 为待求的未知数,且满足 $P_i > 0$, (光子数目不为负),

$$\max L = \sum_{i=1}^N \ln P_i + \alpha \cdot (R - \sum_{i=1}^N r_i P_i)^2 + \beta \cdot (G - \sum_{i=1}^N g_i P_i)^2 + \gamma \cdot (B - \sum_{i=1}^N b_i P_i)^2 \quad (11)$$

通过最大化式(11)(利用常用的 Newton-Raphson 递推算法容易求解),就得到了一个对应给定 RGB 的最可几的光谱估计。

2.3 几点讨论

注意在式(11)中的两种约束的物理涵义:

1) 最大化 $\sum \ln P_i$ 相当于求一个分布最光滑的同色异谱。由于把光谱视为光子能级的随机跃迁,在没有其他约束条件下,认为进入观察者眼中的光谱分布最光滑是最合理的,这种结果也与光谱有限维 FDM 模型相一致。

2) 若选用最大化 $-\sum P_i \ln P_i$, 由于此式符合信息熵的形式,意味着生物视觉系统的光谱敏感曲线试图从三刺激值中传递尽量多的关于入射光谱

的信息。本文中,我们主要运用前面一种约束进行光谱估计实验。

3) 熟悉最大熵图象恢复算法^[8]的读者一定注意到 $\sum \ln P_i$ 和 $-\sum P_i \ln P_i$ 分别是 Burg 熵和 Frieden 熵的形式,而且处理思路也与本文相似。但是它们要解决的问题与本文是根本不同的。

3 真实图象实验及结果

3.1 实验彩色图象集

在3种不同的标准光源照射下拍摄多种彩色物体,得到实验图象集。(图版 I 图1~图6)场景中的物体不限于平面彩色图片,而是3D空间的真实物体,几何朝向效应和成像过程中的噪声均存在。如下是其中几幅图象,所采用的光源分别是 CIE-D65 标准白昼光(色温约6500K), CIE-B 标准光(色温约4900K)和一种色温为4300K 的标准光源^[4]。

3.2 真实图象实验结果

本小节利用我们估计出的最可几光谱来进行按材料特性的图象分割实验。所依据的基本原理是 Rubin 提出的“光谱交叉判据”^[9]。简单的说,该判据认为同种材料处于不同光照环境中,所得到的反射光的光谱曲线不会交叉。如果两条光谱发生交叉则认为来自不同材料。Rubin 的这个判据自从提出以来已被大量的文献引用,然而其作用仅限于理论上的分析和讨论,原因之一是没有合适的估计光谱的方法。下面的实验结果表明本文提出的光谱估计方法可用于基于材料的图象分割。

对图1,2,3(见图版 I)中的6个圆环分别在3种不同的光照下成像,再加上圆环本身有遮挡,因此同一个圆环上的点所产生的颜色和光谱曲线不尽相同,但是应当满足不交叉的判据;相反,不同圆环的光谱一般存在交叉。通过人工选择若干采样点,记录其 RGB 值,采用公式(11),其中的光谱敏感度曲线采用 CIE-1931 标准观察者曲线(严格来说,应当采用拍摄图象时采用的摄像机的实测敏感曲线,但是利用 CIE-1931 标准观察者光谱敏感曲线也能近似说明问题)。我们就可分别估计出对应的光谱曲线,部分实验结果如下(以下图中纵坐标数值只有相对意义)。

- (1)不同材料的谱线交叉,图7。
- (2)一材料在不同光照下的谱线升降,图8。
- (3)按材料对不同区域进行分类,图9。

合并同种材料区域,对图1中的圆环—D65图象,得到如图9所示的分割结果,可以看出,较好的对应了不同材料区域。

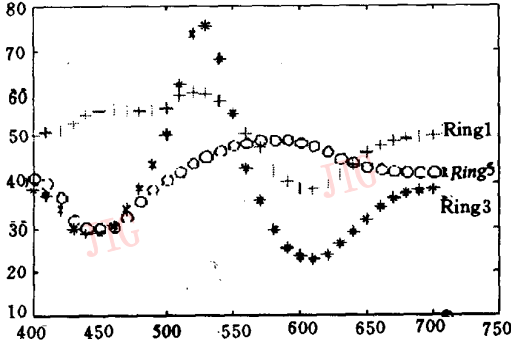


图7

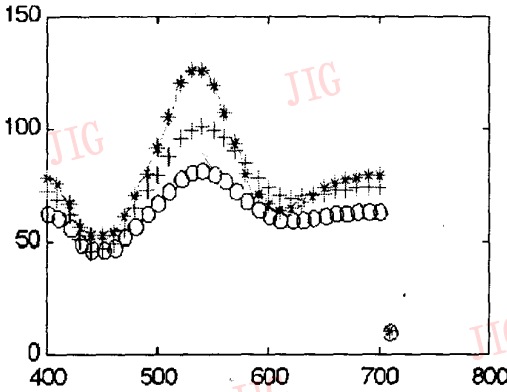


图8 圆环4在不同光照下的估计光谱

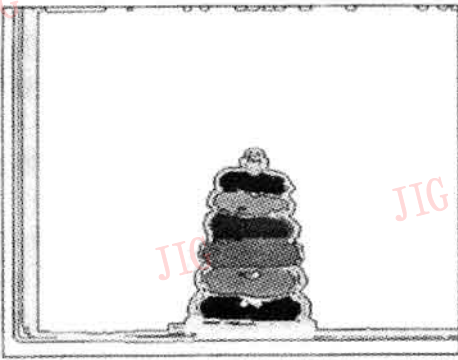


图9 D65下圆环按材料分割

4 结论

RGB 3个彩色信号值中包含远比它们自身(3个数值)更多的信息量。人眼的奥妙的颜色恒常功能表

明人具有一种从 RGB 中提取更多的有用信息的能力。常规的彩色机器视觉系统仅仅把颜色信息作为三通道信号(或三维向量)来分别处理。本文根据统计光学理论,认为光谱曲线实质上是光量子的随机分布,而光谱估计的任务是通过在满足 RGB 值的众多同色异谱中找到那个最大可能的分布形式。据我们所知,基于类似思想的从 RGB 图象中估计光谱的算法在国际上尚未见报道。

利用上述思想,本文成功的从 RGB 数值中估计出对应点的一种最可几的同色异谱,并应用到真实图象的按材料分割算法中,取得很好的效果。由于能估计出几乎连续的光谱分布,我们为很多图象处理和图形学中的彩色处理问题提出了新的解决方案。当然,如何更有效的应用本文算法(比如缩减计算量)将是以后研究工作的重点之一。另外,本文估计出的这种(中间级的)同色异谱与真实世界的物理光谱有何种关系,以及生物视觉系统是否利用类似的思想来处理光谱信息是两个值得研究的未解课题。

致谢 本文作者非常感谢加拿大 Simon Fraser 大学的 B. V. Funt 博士, L. Martin 和 G. Finlayson 先生提供的测试图象和有益的启发。

参考文献

- 1 Pratt W K, Mancill C E. Spectral estimation techniques for the spectral calibration of a color image scanner. *App. Opt.*, 1976, 5 (1): 73.
- 2 Drew M S, Funt B V. Natural metamers. *CVGIP: IU*, 1992, 56 (2): 139~151.
- 3 Ho J, Funt B V. Color from black to white. *ICCV2*, 1998, pp28.
- 4 束越新. 颜色光学基础理论. 济南: 山东科学技术出版社, 1981
- 5 Rubin J, Richard W. Color vision and image intensities: When are changes material?. *Bio. Cyber*, 1982, 45: 215~226.
- 6 Maloney L T. Evaluation of linear models of surface spectral reflectance with small number of parameters. *JOSA A3*, 1986: 1673~1683.
- 7 戚康男等. 统计光学导论. 天津: 南开大学出版社, 1987.
- 8 Fieden B R. *Probabilitie. Statistical Optics and Data Testing.* Springer-Verlag, 1983.
- 9 Yuille A. A method for computing spectral reflectance. *Bio. Cyb*, 1987, 56: 195~201.



李宏东 1993年毕业于南京理工大学电子系,获学士学位。1996年毕业于浙江大学模式识别专业,获硕士学位。1996—免试攻读浙江大学智能与信息研究所博士。研究方向为图象识别,计算机视觉。



刘济林 教授,博士生导师,浙江大学智能与信息研究所,研究方向为图象处理,并行处理,计算机视觉。



叶秀清 教授,浙江大学智能与信息研究所,研究方向为图象处理,智能机器人,计算机视觉。

顾伟康 教授,博士生导师,浙江大学副校长,智能与信息研究所。研究方向为模式识别,视觉智能机器人。

Color Spectrum Estimation from RGB Triplet by Using Photon Statistics

Li Hongdong, Ye Xiuqing, Gu Weikang, Liu Jilin

(Department of Information and Electronics, Zhejiang University, Hanzhou 310027)

Abstract The RGB triplet of a pixel in a color image contains more information than itself. This paper proposes a novel approach for color spectrum estimation directly from the corresponding RGB signals. (more specific, the resultant spectrum is a metamer of the given RGB). It stems from the idea of optical quantum statistics which regards a spectrum as the random distribution of many of the photons. After deriving a maximum probably equation, we transform the estimating problem to an optimization problem. Experiments on real images show the practicable of the proposed novel method. We believe that it provides many new tools for image processing and computer graphics that involve color information.

Keywords Color vision, Color spectrum estimation, RGB triplet, Color constancy.

康柏鼎力支持“政府上网工程”

备受公众瞩目的“政府上网工程”启动大会1999年1月22日在北京隆重举行,会议同时开通了北京和31个省、自治区、直辖市电视电话会议会场。国家领导人、有关部门负责人、中国电信以及支持这项工程的康柏等IT厂商出席了这次会议。这次会议标志着“政府上网工程”已开始全面实施。

“政府上网工程”是由中国电信总局、国家经济贸易委员会经济信息中心和40多个部委的信息主管部门策划、发动、统一规划部署,各省、自治区、直辖市电信管理局作为主要支持落实单位,旨在推动各级政府部门为社会的公众信息资源汇集和应用上网,实现信息资源共享,这对全面推进中国的国民经济信息化具有重要意义。

康柏大中国区总裁俞新昌博士在会上代表IT厂商和信息服务商宣读了《政府上网工程厂商支持书》。俞博士表示,“政府上网是中国信息产业发展的一件大事。作为此次政府上网工程的指定赞助商,也作为本此大会的厂商代表,我们深感荣幸,也感到要承担的责任重大”。为全力支持“政府上网工程”,俞博士代表各厂商做出了郑重承诺:“配合各级政府做好各项技术支持服务工作;协助制定解决方案,加强技术交流;发挥各自在专业领域的优势,提供优质产品与服务;在提供优秀产品的同时,提供一批赞助;提供咨询、培训等服务”。

(下转123页)

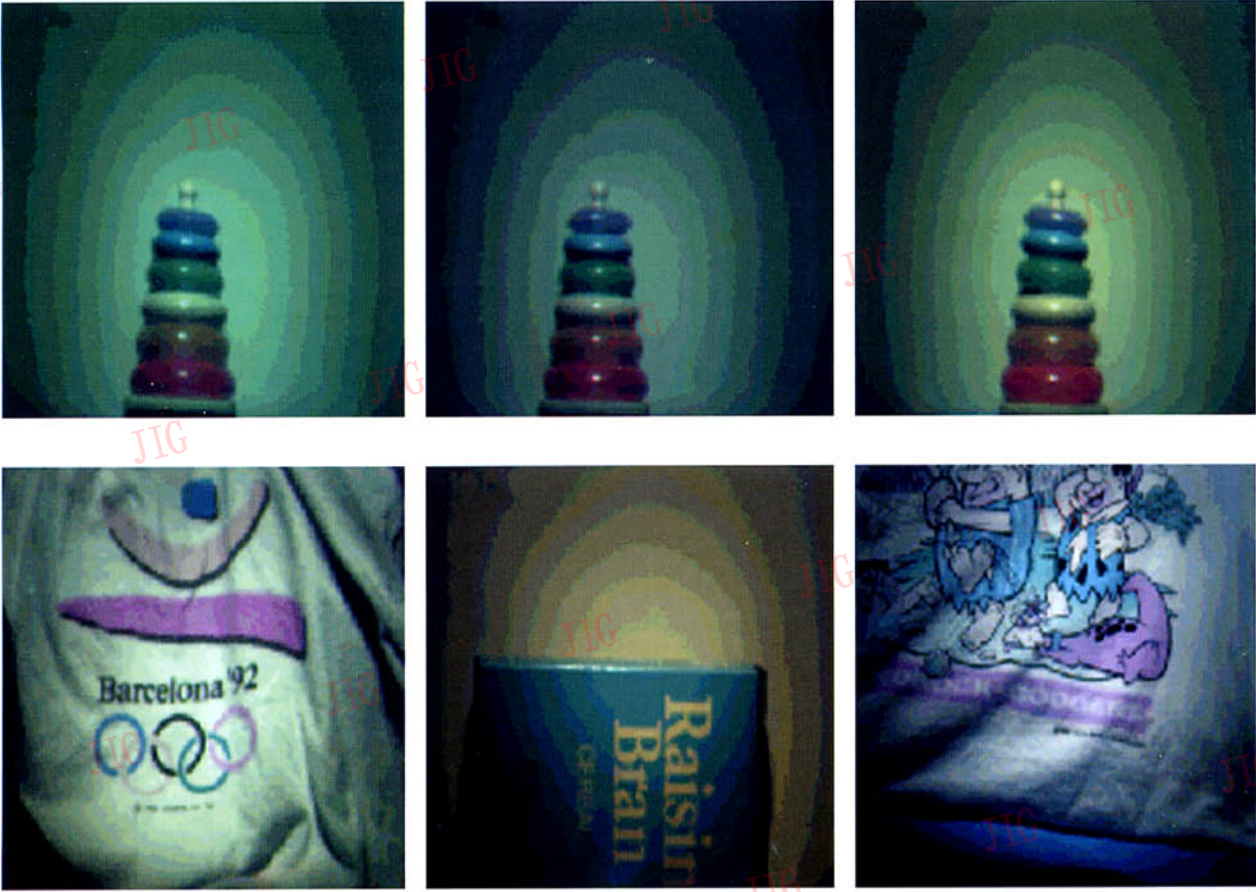


图1~6 部分实验图象（上层：圆环在三种不同光源下；下层：其他物体的图象）

刘庆生等论文：TM图象的形态分析

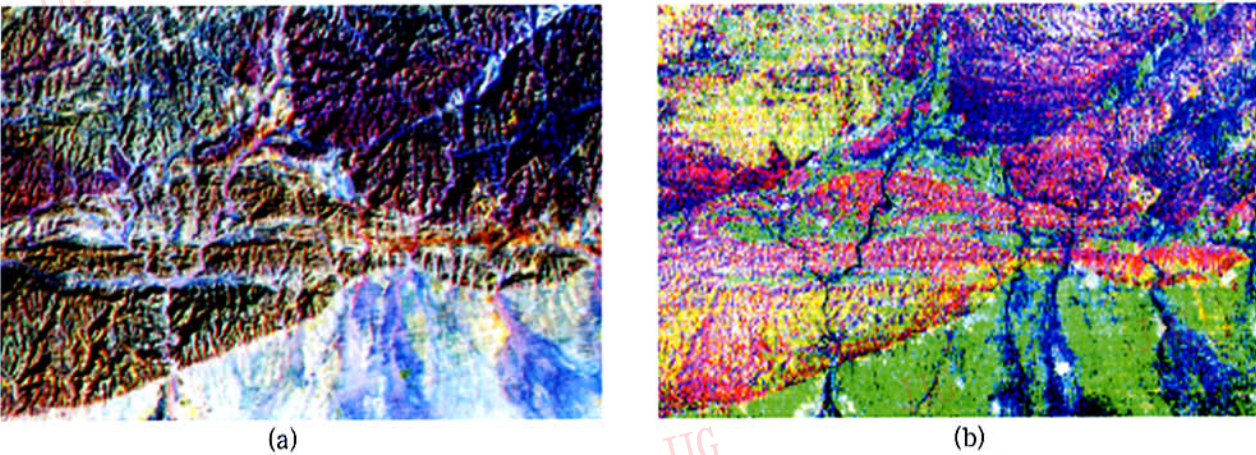


图3 (a) 原始1、4、7假彩色图象； (b) 对应分析变换后3、4、5成分合成图象

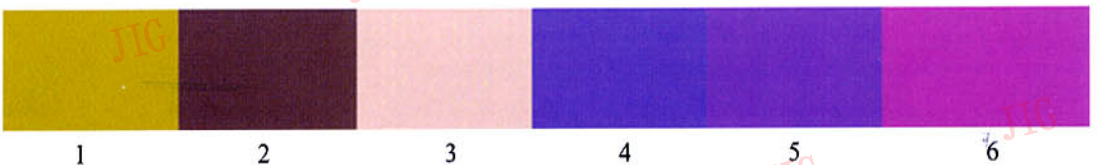


图4 原始六波段在变换后三成分空间的彩色值（依次为1~6）