

文章编号: 0258-7025(2009)04-0923-05

基于自由空间中光信息传输模型改善图像质量

江兴方^{1,2,3} 陆佳丽¹ 沈为民² 陶纯堪³

(¹江苏工业学院数理学院, 江苏 常州 213164; ²苏州大学现代光学研究所, 江苏 苏州 215006)

³南京理工大学光电学院, 江苏 南京 210094

摘要 在云雾天气条件下,造成图像质量的下降,其本质就是场景与观察点之间大气对光的散射。针对不良天气条件下拍摄的图像,又没有精确的天气条件和景物的深度信息,为了对一幅退化图像去除不良天气的影响实现图像复原的目的,分析了大气散射机理,引入了衰减模型和大气光模型以及光在粒子各个方向上的散射分布函数,推导了大气光对图像亮度影响的表示式。基于衰减模型和大气光模型,考虑景物的深度,采取先将原图像取反色,然后采用改进型多尺度 Retinex 算法增强暗区域图像,再取反色可以获得去除云噪声的图像,为了使景物信息最小限度地丢失,采用了图像信息熵判据,结果表明对于彩色遥感图像运用这一改进型多尺度 Retinex 算法去除云噪声是有效的。对于一幅带有厚云的彩色遥感图像在实施去除云噪声过程中,发现以亮度平均值附近 1.5 ± 0.1 倍标准差截取后进行拉伸,得到的图像信息熵为最大,去除云噪声综合效果最好。

关键词 图像处理; 改进型多尺度 Retinex; 衰减模型; 大气光模型; 去云雾; 信息熵

中图分类号 O438 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093604.0923

Improvement of Image Quality Based on the Models of Atmospheric Scattering in Free Space

Jiang Xingfang^{1,2,3} Lu Jiali¹ Shen Weimin² Tao Chunkan³

¹ School of Mathematics and Physics, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou, Jiangsu 213164, China

² Modern Optics Institute of Soochow University, Soochow, Jiangsu 215006, China

³ School of Electronic Engineering & Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

Abstract The image quality was degraded because of imaging in cloud and fog. The essence was atmospheric scattering for light between scene with observation point. The restoration method was projected for the images imaged under bad weather. First, the mechanism of atmospheric scattering was analyzed. Second, the attenuation model, airlight model and phase distribution function in directions of atmospheric scattering were introduced. Third, the formula of atmospheric light intensity was derived. Based on the models of attenuation and airlight and the pathlength was considered, the advanced multi-scale Retinex algorithm (AMSR) was applied for removing cloud in color remote sensing images. The AMSR method included three steps. The first one was to obtain the complementary image. The second one was that the complementary image was enhanced. The third one was to the complementary image from the enhanced image. Because of the scene information was lost following with removing cloud, the criterion of information entropy was applied to judge the quality of enhanced images. The results show that the AMSR was suitable for removing cloud in color remote sensing images. The best image was stretched in the range of $k = 1.5 \pm 0.1$ times standard deviation near the mean brightness and the information entropy was largest.

Key words image processing; advanced multi-scale Retinex; attenuation model; airlight model; removing cloud and fog; information entropy

收稿日期: 2008-08-26; 收到修改稿日期: 2008-10-28

基金项目: 江苏省现代光学技术重点实验室开放课题(KJS0730)资助项目; 江苏工业学院科技基金(ZMF08020003)资助课题。

作者简介: 江兴方(1963-),男,博士,副教授,主要从事光学工程和多媒体物理教育方面的研究。

E-mail: xfjiang@jpu.edu.cn

1 引 言

在有云噪声的天气条件下,遥感图像在成像过程中记录了云噪声。图像复原可看成是图像退化的逆过程,就是将图像退化的过程加以分析估算,在建立退化的数学模型之后,补偿退化过程造成图像信息的失真,从而获得未经干扰退化的原始图像或者对原始图像进行最优估计。

图像质量的改善方法有基于直方图的图像改善方法^[1~6]、基于邻域的图像改善方法^[7]、基于变换的图像改善方法^[8]等,本文尝试基于大气散射研究彩色遥感图像增强方法,实施去云。就本质而言,在不良天气条件下,图像退化造成的图像质量下降是由于场景到观察点之间大气对光的多次散射,造成了图像的对比度下降和图像色彩的失真。

从成像的角度来看,不良天气条件与空间粒子对光的散射、吸收和发射等因素直接有关,云水滴粒子的大小为 $1\sim 10\ \mu\text{m}$,在薄雾、云和雨粒子中处于中等尺度^[9],下面从大气散射机理开始分析。

2 大气散射机理

当一束波长为 λ 的光沿 x 轴方向入射到某单位体积的物体上时,在与 x 轴方向成 θ 角的观察者所观察到的辐射强度可用角度散射系数 $\beta(\theta, \lambda)$ 和辐射度 $E(\lambda)$ 的乘积来表示:

$$I(\theta, \lambda) = \beta(\theta, \lambda)E(\lambda), \quad (1)$$

式中 θ 称为散射角, $\beta(\theta, \lambda)$ 对整个球面的积分后可用 $\beta(\lambda)$ 表示, $\beta(\lambda)$ 表示给定波长在各方向上的总的散射系数,则总的散射通量为

$$\varphi(\lambda) = \beta(\lambda)E(\lambda). \quad (2)$$

物质对光的散射是大气光学和遥感图像研究中的主要课题,在大气散射模型中,衰减模型(Attenuation model)和大气光模型(Airlight model)是两个典型的模型^[9]。如图1所示,对于大气光模型,在几公里范围内,天气条件不受空间改变而改变,可以看成各向同性问题来处理。

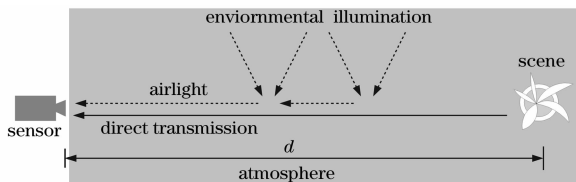


图1 大气散射模型

Fig. 1 Model of atmosphere scattering

2.1 衰减模型

衰减模型描述了光强随着场景到观察者距离增

加而衰减的一种计算方法。场景点的散射是随着场景点与观察者的距离增加而增加的。考虑到垂直通过单位面积的光束在通过介质中厚度为 dx 时,辐射度 $E(x, \lambda)$ 的变化率表示为

$$\frac{dE(x, \lambda)}{E(x, \lambda)} = -\beta(\lambda)dx. \quad (3)$$

设 $x=0$ 处时辐射度为 $E_0(\lambda)$,则 $x=d$ 处辐射度表示为

$$E(d, \lambda) = E_0(\lambda)\exp[-\beta(\lambda)d]. \quad (4)$$

如图2所示,考虑天空对 P 点所张的立体角为 Ω ,取面积微元的极角为 $\theta \sim \theta + d\theta$,方位角为 $\varphi \sim \varphi + d\varphi$,则微元的面积为 $dS = R\sin\theta d\varphi R d\theta$,相对应的立体角

$$d\omega = \frac{dS}{R^2} = \sin\theta d\varphi d\theta. \quad (5)$$

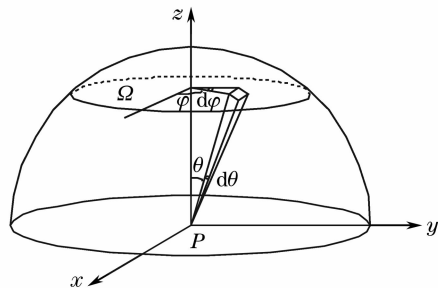


图2 球坐标系

Fig. 2 Spherical coordination system

记方向辐射度

$$L(\theta, \varphi) = L_\infty(\lambda)(1 + 2\cos\theta)d\omega. \quad (6)$$

来表示 P 点在立体角 Ω 上的总的辐射度

$$E(\lambda) = \iint_{\Omega} L_\infty(\lambda)(1 + 2\cos\theta)\cos\theta\sin\theta d\theta d\varphi, \quad (7)$$

因此,对于 P 点的辐射度可表示为

$$L_0(\lambda) = \iint_{\Omega} L_\infty(\lambda)f(\theta)R(\theta, \varphi)d\theta d\varphi, \quad (8)$$

式中 $f(\theta) = (1 + 2\cos\theta)\cos\theta\sin\theta$, R 是对 P 点的双向反射率分布函数,记 σ 为垂直于观察方向单位面积上的投影,则 P 点处的辐射强度表示为

$$I_0(\lambda) = \sigma L_0(\lambda). \quad (9)$$

因为 $L_\infty(\lambda)$ 与极角 θ 和方位角 φ 无关,在 P 点的反射表示为

$$r = \sigma \iint_{\Omega} f(\theta)R(\theta, \varphi)d\theta d\varphi, \quad (10)$$

因此在 P 点处的辐射强度可精确地写成

$$I_0(\lambda) = rL_\infty(\lambda), \quad (11)$$

(4)式表示为

$$E(d, \lambda) = gL_o(\lambda)\exp[-\beta(\lambda)d], \quad (12)$$

即

$$E(d, \lambda) = g \frac{I_o(\lambda)\exp[-\beta(\lambda)d]}{d^2}. \quad (13)$$

导致大气散射的原因是光通量的部分从入射光束中移去,没有散射的光通量,称为直接传输,光传输到观察者处的辐射度可表示为

$$E_{dt}(d, \lambda) = g \frac{L_\infty(\lambda)r(\lambda)\exp[-\beta(\lambda)d]}{d^2}, \quad (14)$$

式中 d 是从观察点到场景的深度, λ 是波长, $\beta(\lambda)$ 称为大气的散射系数,它代表各个方向上大气的单位体积对散射光的能力, $\beta(\lambda)d$ 称为场景点的光学深度, E_∞ 是水平方向上的亮度, r 是描述反射性质的一个函数。

2.2 大气光模型

对于观察者来说,通过反射环境中的照明光作为光源,我们考虑目标物对观察者所张的立体角为 $d\omega$, 选择了一个锥台元来计算,体积元 dV 距离观察者距离为 x , 目标物与观察者之距离为 d , 体积元 $dV = dSdx$, 利用几何关系

$$\frac{4\pi x^2}{4\pi} = \frac{dS}{d\omega}, \quad (15)$$

则 $dS = x^2 d\omega$. 观察者方向上散射的强度 $dI(x, \lambda) = dV k \beta(\lambda) = d\omega x^2 dx k \beta(\lambda)$, 则

$$\beta(\lambda) dx = \frac{dI(x, \lambda)}{k d\omega x^2} = dE(x, \lambda) \exp[\beta(\lambda)x], \quad (16)$$

得到

$$E(d, \lambda) = k \{1 - \exp[-\beta(\lambda)x]\} = E_\infty(\lambda) \{1 - \exp[-\beta(\lambda)x]\}. \quad (17)$$

如图 1 中的虚线箭头,考虑环境照明,目标物到观察者的路径长度 d , 因此,由辐射度导致的大气光亮度表示为

$$E_a(d, \lambda) = E_\infty(\lambda) [1 - \exp[\beta(\lambda)d]], \quad (18)$$

这样总的辐射度由直接传播的光衰减部分和大气光散射两部分之和:

$$E(d, \lambda) = E_{dt}(d, \lambda) + E_a(d, \lambda) = g \frac{L_\infty(\lambda)r(\lambda)\exp[-\beta(\lambda)d]}{d^2} + E_\infty(\lambda) \{1 - \exp[\beta(\lambda)d]\}. \quad (19)$$

3 改进型多尺度 Retinex 算法

在 20 世纪 50 年代中期,彩色影片刚一问世, Edwin. H. Land 重复 Maxwell 在 1861 年 5 月 17 日英国皇家学会的周五晚上演讲报告的实验——三原色投影实验,偶然发现红、白二色出现在屏幕上,

从经 E. Land^[10] 对二色现象进行了深入的研究。1961 年 3 月 28 日, E. Land 在伦敦皇家学会周五晚上的演讲中,宣讲了红和白投影实验。1963 年 12 月 30 日在俄亥俄州第一次描述了 Retinex(由 retina 与 cortex 合成)思想:基于图像的形成主要由两部分构成,入射光和反射函数,入射光 m 直接决定了一幅图像中像素能达到的动态范围,反射函数 r 决定了图像的内在性质。1986 年,在与 Living-Stone, Hubel, Zeki 等生理家、心理学家合作研究后, Land 归纳出第 $l(l=1, 2, 3)$ 个颜色通道光强度为 I_l 是照明因子 m_l 和反射因子 r_l 的乘积,对于图像第 i 行第 j 列亮度值有

$$I_l(i, j) = m_l(i, j)r_l(i, j). \quad (20)$$

Retinex 理论经过了 John. J. McCann, Jonathon Frankle, Daniel J. Jobson, Zia-ur Rahman, Gienn A. Woodnell 等^[11~15] 的改进和完善,成为一种颜色恒常知觉的计算理论。(25)式取 \ln 后乘法变成加法:

$$\ln I_l(i, j) = \ln m_l(i, j) + \ln r_l(i, j), \quad (21)$$

记 $\ln r_l(i, j) = R_l(i, j)$, 则

$$R_l(i, j) = \ln I_l(i, j) - \ln m_l(i, j), \quad (22)$$

进一步将 $m_l(i, j)$ 写成包围函数与相应通道光强的卷积形式:

$$R_l(i, j) = \ln I_l(i, j) - \ln [F_k(i, j) * I_l(i, j)], \quad l = 1, 2, 3 \quad (23)$$

式中 $I_l(i, j)$ 是输入图像的每个像素的亮度值,取值范围是 $[0, 255]$, 数值越小则该处越暗,数值为 255 表示最亮; $F_k(i, j)$ 表示中心/包围函数,即权重函数,也称卷积核采用高斯型函数描述; $*$ 表示卷积; \ln 表示以自然对数,即以 $e = 2.718$ 为底的对数。多尺度 Retinex 算法的基本形式是

$$R_l(i, j) = \sum_{k=1}^K W_k \{ \ln I_l(i, j) - \ln [F_k(i, j) * I_l(i, j)] \}, \quad l = 1, 2, 3 \quad (24)$$

式中 $l = 1$ 表示红色, $l = 2$ 表示绿色, $l = 3$ 表示蓝色; W_k 是相应于 F_k 的权重, K 是包围函数或尺度的数目, F_k 由

$$F_k(i, j) = A \exp \left\{ -\frac{i^2 + j^2}{2\sigma_k^2} \right\} \quad (25)$$

给出,其中 σ_k 是尺度为 k 高斯包围的标准偏差, σ_k 的大小控制着包围的范围; A 是归一化常数

$$A = \frac{1}{\sum_j \sum_i F_k(i, j)}. \quad (26)$$

作者^[16]研究了改进型多尺度 Retinex,考虑信息冗余,

在采用多尺度 Retinex 算法图像增强时采用了图像亮度附近 k 倍标准差进行截取后再拉伸。又针对 Retinex 对于曝光不足的图像有着特别的优势,对于曝光不足区域获得层次分明的结果,提出了改进型多尺度 Retinex 算法,即先将原始图像取反色,再采用多尺度 Retinex 算法进行图像增强,再将图像取反色,这样在云噪声的区域,层次分开,对比度增加,显现云区信息。

4 实验结果

基于大气光散射模型,考虑景物深度对成像的影响,增强后的图像采用信息熵进行分析判断。信息熵定义^[17]为

$$\text{entropy} = - \sum_{i=0}^{255} p_i \ln p_i, \quad (27)$$

式中 p_i 表示亮度值为 i 的所有像素占总像素的比例。由于彩色图像通过改进型多尺度 Retinex 算法增强后,彩色发生变化,采用 Brovery 变换后保持原图像的彩色。高原原始图像某个像素红、绿、蓝三色亮度值分别为 $I_{1R}(i, j), I_{1G}(i, j), I_{1B}(i, j)$, 增强后的图像相应的像素红、绿、蓝亮度值为 $I_{2R}(i, j), I_{2G}(i, j), I_{2B}(i, j)$, 则 Brovery 变换为

$$I_{3k}(i, j) = I_{1k}(i, j) \times \frac{I_{2k}(i, j) + I_{2k}(i, j) + I_{2k}(i, j)}{I_{1k}(i, j) + I_{1k}(i, j) + I_{1k}(i, j)}, \quad (28)$$

$k = 1, 2, 3$ 分别表示红、绿、蓝。

原始彩色图像如图 3(a) 所示,在图 3(a) 的下半部分由于厚云的存在,分辨不出云区域中的信息。从整个图像来说,很清晰;从有云噪声的区域来说,可以看出云有厚有薄,边缘处较薄。

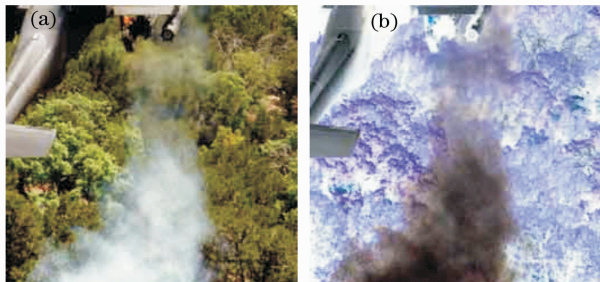


图 3 带厚云的彩色遥感图像。(a)原始图像, (b)取反色后的图像

Fig. 3 Color remote sensing image with thick cloud

(a) Original image; (b) complementary image

实验方案首先将原始图像取补色,得到的图像如图 3(b) 所示,云噪声区域显示灰黑色,在原始图中飞机两侧处是黑的,在图 3(b) 中呈现出白色。

然后采用多尺度 Retinex 算法进行图像增强,在增强过程中,截取方法采用亮度平均值附近 k 倍标准差, $k \in [1, 5]$, 步长为 0.1, 然后进行拉伸,得到了 41 幅图像,利用 (27) 式计算它们的信息熵,可以发现随着 k 值的增加,信息熵先增加后减少,呈现极大值,如图 4(a) 所示。随着 k 值的增加,云除去得越来越多,但景物信息也丢失得越来越多,色彩失真得越来越严重,最大信息熵图像如图 4(b) 所示,因此采用 Brovery 变换,使得图像中每一个像素红绿蓝的比例与原始图像保持不变,经过 Brovery 变换后的图像其信息熵随着 k 的增加先增加后减少,呈现极大值如图 4(c) 所示, Brovery 变换后的最大信息熵图像如图 4(d) 所示。

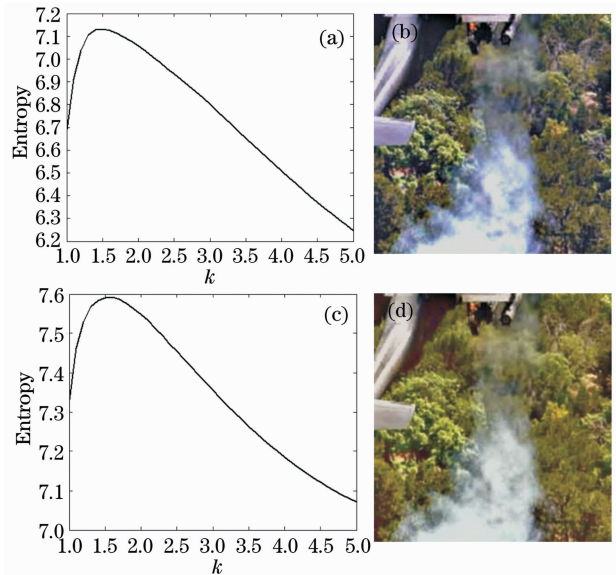


图 4 最大信息熵及其相应图像。(a)信息熵与 k 的关系; (b)最大信息熵图像; (c) Brovery 变换后的信息熵与 k 的关系; (d) Brovery 变换后的最大信息熵图像

Fig. 4 Maxium entropy and its image. (a) Curve of entropy with k ; (b) image with maximum entropy; (c) Brovery transformed curve of entropy with k ; (d) Brovery transformed image with maximum entropy

5 结 论

基于衰减模型和大气光模型,考虑景物深度,采用改进型多尺度 Retinex 算法可以获得去除云噪声的图像,第一步将原始图像取反色,第二步采用多尺度 Retinex 算法进行图像增强,突出暗区域的信息,显示出层次感。采用图像信息熵判据,结果表明改进型多尺度 Retinex 算法去除部分彩色遥感图像中的云噪声是有效的,而且采用 Brovery 变换后,恢复

原图像的色彩。具体的实验证明了在使用多尺度 Retinex 算法的过程中,以亮度平均值附近 1.5 ± 0.1 倍标准差进行截取后进行拉伸,得到的图像信息熵为最大,在去除部分云噪声的同时,保持原图像色彩,去除尘噪声的综合效果最佳。

参 考 文 献

- Zhang Jingjing, Fang Yonghua. Novel image fusion algorithm for multi-band polarimetric image based on visible light[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1067~1072
张晶晶, 方勇华. 基于可见光的多波段偏振图像融合新算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1067~1072
- Guo Liang, Xing Mengdao, Liang Yi *et al.*. Algorithm for airborne spotlight synthetic aperture imaging Ladar data processing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1183~1190
郭亮, 邢孟道, 梁毅等. 一种机载合成孔径成像激光雷达聚束模式成像算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1183~1190
- Zhang Xuguo, Jiang Yuesong, Lu Xiaomei. Adjustment of optical elements and error analysis for laser remote sensing polarizatio imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1191~1196
张绪国, 江月松, 路小梅. 激光遥感偏振成像系统光学元件调整及误差分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1191~1196
- Sun Yingzi, Wang Dongguang, Zhang Hongqi *et al.*. Method and precision analysis for measuring retardation of infrared waveplate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 685~688
孙英姿, 王东光, 张洪起等. 红外波片相位延迟的测试方法及精度分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 685~688
- Lu Xiaomei, Jiang Yuesong, Rao Wenhui. The polarization analysis of the telescope used for the lidar polarization active imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1771~1774
路小梅, 江月松, 饶文辉. 激光雷达偏振成像遥感的望远镜系统偏振分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1771~1774
- Jiang Xinfang, Tao Chunkan, Shi Dufang. Improving the quality of image using the maxium entropy method [J]. *J. Jiangsu Polytechnic University*, 2005, **17**(1): 44~47
江兴方, 陶纯堪, 是度芳. 用最大熵方法改善图像质量[J]. *江苏工业学院学报*, 2005, **17**(1): 44~47
- Xie Huamei, He Qi'ao, Zhong Ning *et al.*. The improved homomorphic filter algorithm for removing cloud of remote sensing image based on the second exploiture of ERDAS tool[J]. *J. Beijing Normal University (Natural Science)*, 2005, **41**(2): 150~153
谢华美, 何启翱, 郑宁等. 基于 ERDAS 二次开发的遥感图像同态滤波薄云去除算法的改进[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2005, **41**(2): 150~153
- Xue Qin, Zou Daowen, Lu Ke *et al.*. A method of wavelet image enhancement based on modulus square processing[J]. *J. Jiangxi Normal University (Natural Science)*, 2005, **29**(6): 492~495
薛琴, 邹道文, 吕珂等. 基于模平方处理的小波图像增强方法[J]. *江西师范大学学报(自然科学版)*, 2005, **29**(6): 492~495
- Srinivasa G. Narasimhan, Shree K. Nayar. Vision and the atmosphere[J]. *International J. Computer Vision*, 2002, **48**(3): 233~254
- J. J. McCann. Capturing a black cat in shade; the past and present of Retinex color appearance models[C]. *SPIE*, 2002, **4662**: 331~340
- Zia-ur Rahman, Daniel J. Jobson, Gienn A. Woodell. Retinex processing for automatic image Engancement[J]. *J. Electronic Imaging*, 2004, **13**(1): 100~110
- Zia-ur Rahman, Daniel J. Jobson, Gienn A. Woodell *et al.*. Impact of multi-scale Retinex computation on performance of segmentation algorithms[C]. *SPIE*, 2004, **5438**: 171~182
- Ted J. Cooper, Farhan A. Baqai. Analysis and extensions of the Frankle-McCaan Retinex algorithm[J]. *J. Electronic Imaging*, 2004, **13**(1): 85~92
- Nathan Moroney, Ingeborg Tastl. Comparison of Retinex and iCAM for scene rendering[J]. *J. Electronic Imaging*, 2004, **13**(1): 139~145
- Daniel J. Jobson, Zia-ur Rahman, Glenn A. Woodell. The statistics of visual representation[C]. *SPIE*, 2002, **4736**: 25~35
- Jiang Xingfang, Tao Chunkan. Physical idea of the Retinex theory in color image enhancement and the influence of image quality in different intercepted region of image intensity [J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(1): 127~129
江兴方, 陶纯堪. Retinex 彩色图像增强理论的物理思考及其截断区间对图像质量的影响[J]. *光学技术*, 2007, **33**(1): 127~129
- Tao Chunkan, Tao Chunkuang. The Theory of Optical Information[M]. Beijing: Science Press, 2004. 20
陶纯堪, 陶纯匡. *光学信息论*[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 20