

基于视觉特性的真实影像再现技术进展及展望

倪国强, 肖蔓君, 胡宏清, 陈思颖, 黄光华

(北京理工大学 信息科学技术学院光电工程系, 北京 100081)

摘要 视觉特性研究的成果, 融入到真实影像再现技术, 可提供更适于人类观察的高质量图像, 有利于机器视觉的研究。首先简单总结当前主要的视觉特性研究成果, 包括视觉空间对抗、光谱对抗、视觉适应、视觉皮层初级处理等。综述了基于视觉特性的真实影像再现技术的研究动态和新进展, 并根据算法的侧重点不同, 分析了以保持颜色恒定性为主要目标的 Retinex 系列算法、各种动态范围压缩算法等。其中也涉及到已开展的部分工作, 从原理分析、实验效果对比等角度, 对研究成果与国外优秀算法做出评价。介绍了国外在软/硬件平台实现上的最新研究成果。简述进一步开展的工作及研究方向, 并就其发展方向做出展望。

关键词 图像处理; 真实影像再现; 视觉感知; 颜色恒定性; 明度; 动态范围压缩

中图分类号 TP 751 **文献标识码** A

New Progress and Prospect of Realistic Image Rendition Based on Visual Characteristics

NI Guo-qiang, XIAO Man-jun, HU Hong-qing, CHEN Si-ying, HUANG Guang-hua

(Department of Optical Engineering, School of Information Science and Technology,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract Visual characteristics have been successfully applied to the study of realistic image rendition, which may provide higher quality images for human observation and machine vision. At first, the latest main researches on visual characteristics are briefly summarized, including visual spatial opponent, spectral opponent, visual adaptation, and visual cortex primary processing and so on. The development of realistic image rendition techniques based on visual characteristics is summarized in this paper. Since various algorithms have different emphases, the Retinex family methods primarily focusing on keeping color constancy and some other methods aiming at getting high dynamic range compression are analyzed in detail. Our study on this field is also mentioned and compared with some excellent algorithms according to theory structure and experiment results. Related representative software and hardware realization techniques are introduced, and our next research direction and the prospect on this field are given.

Key words image processing; realistic image rendition; visual perception; color constancy; lightness; dynamic range compress

1 引 言

真实影像再现的目标是真实地再现人类对外界场景的感知, 即为机器视觉提供符合视觉特性的理想图像, 使图像信息的表达逼近人眼的习惯, 对进一步开展其他的图像处理工作十分必要。因此真实影

像再现技术成为图像处理领域最为活跃的分支之一, 被广泛应用于军事、遥感、医学、民用等各个领域, 为之提供生动合理的信息资源。

一方面人眼是公认的完美的视觉系统, 成像设备的不断发展始终无法与人眼的优异特性相媲美; 另一方面成像设备与显示系统的发展不平衡, 导致

收稿日期: 2007-01-16; 收到修改稿日期: 2007-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(60377038)资助项目。

作者简介: 倪国强(1946—), 男, 江苏无锡人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向有光电成像器件/技术/系统/应用、图像处理及高速实现、自由空间光通信技术。E-mail: nigq@bita.org.cn

新型成像设备获取的高质量图像无法在常规显示设备上正常显示。这两方面都会导致成像系统获得的影像与人类置身于真实场景中的感知存在一定程度的差别。这一问题引起了国内外学者的广泛关注,特别是从20世纪60,70年代开始,真实影像再现技术与视觉特性研究、计算机视觉等结合起来,取得了突出进展。

本文从人类视觉特性研究的成果出发,综述了多年来基于视觉特性的真实影像再现技术的研究动态和新进展,并对其未来发展方向提出展望。

2 真实影像再现技术所涉及的内容

生理视觉研究结果表明,人眼视觉系统能够在环境光照度变化超过10个对数单位的动态范围内,产生对场景颜色以及细节的正确感知;基于视觉特性的真实影像再现研究,正是希望通过研究视觉形成过程,如光的传播特性、人眼结构及人脑心理感知等复杂的生理视觉、心理视觉形成机制,模拟出能够很好地逼近视觉系统的影像再现算法。

真实影像再现通常涉及到颜色恒定性、明度恒定性、动态范围压缩等问题,当前影像再现技术的研究也正是围绕着这几个方面开展工作的。

颜色恒定性是指在照明发生变化的条件下,人们对物体表色的知觉趋于稳定的心理倾向。同一表面在不同的照明下会产生不同的反射谱,人眼的颜色机制确实能分辨这种由照明变化导致的表面反射谱变化,从而对该表面表色的认知在一定的范围内保持恒定。虽然视觉系统的这种能力并不十分完美,在某些极端情况下,对颜色的判断会出现错误,但是到目前为止,任何现有的人造成像系统都还不能完全逼近视觉系统的这种功能。

明度是表面颜色感知的一个属性,它表示了物体表面相对明暗的特性。人类视觉系统能够自适应外界环境光亮度变化,而获得较高对比度的图像信息,这种现象被称为明度恒定性。

动态范围压缩问题的产生,源于成像设备与显示系统动态范围的差异。高动态范围的传感器发展迅速,要捕获具有高动态范围的图像数据比过去相对容易得多,但显示设备的发展尚未跟上这一步,而打印设备的动态范围则更低。

这些问题必然需要同视觉联系起来,利用生理、心理物理学指导图像处理 and 机器视觉研究,对于强化彩色图像信息具有重要意义。

3 相关的视觉特性基础

按照视觉形成过程,外界环境和人类视觉系统本身都对视觉感知的最终结果起着至关重要的作用,对这两方面的深入探索是研究真实影像再现技术的基础。建立合理的光照模型、表面反射率数据库,能有效地反映外界环境影响,但对不同表面、不同光照条件试图做到面面俱到则有相当的难度;而以视觉特性为基础的真实影像再现研究,既可以剔除环境光的影响,又具有原理普适性。

目前,科学研究者对初级视觉形成有了更为深刻的认识,高级视觉信息处理的研究还在进一步开展。其中,与真实影像再现有关的视觉特性研究成果主要有:

1) 光感受器对外界环境的感知:视杆对光强极其敏感,能在低照度条件下提供暗视觉;视锥光谱敏感度高,有红、绿、蓝三群视锥相互作用,可察觉精细的色调、对比度和颜色的差别。

2) 光感受器的适应机制:视锥和视杆在很大的光照范围内均能对光做出反应,从而保证在不同的背景光照水平下真实地反映场景信息。

3) 光感受器、双极细胞和水平细胞与明度恒定性有关。

4) 受域(receptive field)的概念:受域是视觉感知的基本单位。在神经元受域内,光照变化会引起神经元放电频率增加或减小,而区域外则对放电无影响。以神经节细胞为例,它具有同心圆结构的“ON通道”和“OFF通道”,对不同的光照刺激产生相应的兴奋态或抑制态。这种空间对抗结构指出视觉刺激的对比信号和边界检测是视觉感知的核心。

5) 视锥的光谱对抗性:视锥细胞除了表现出空间对抗性之外,还具有光谱对抗性。红敏、绿敏、蓝敏视锥分别主要吸收长、中和短波范围的光。红-绿和黄-蓝神经元是颜色对抗细胞的两个例子,当一束单色刺激扫掠整个可见光光谱范围时,在某个特定波长,细胞的响应将从受激态突变成抑制态。

6) 视觉通道与视皮层的信号处理:视网膜神经节细胞的输入通过特定的视觉通道传入视皮层,进一步对视觉信号加以分析处理。视皮层神经元也具有受域,由线条和边缘组成,对有一定朝向的条形有反应,形成对刺激的更细致要求。视皮层的功能特性相当复杂,目前的研究也不过是窥其一斑,对更复杂的细节探测、颜色、运动特征分析还知之甚少。

同时,一系列针对视觉特性的心理实验研究进

一步表明,颜色对比、明暗对比有助于视觉感知的恒定性。

也就是说,一个理想的模拟生理视觉的成像系统应该同时兼顾精确度和灵活性。对于不同场景的图像,需要考虑栩栩如生的颜色输出、高动态范围压缩以及对表面反射率足够精确的确定。对此,研究人员提出了不同的颜色恒定性模型、色调再现算法,试图从不同角度解决这一问题。

4 基于视觉特性的真实影像再现技术的研究现状和新进展

目前,基于视觉特性的真实影像再现领域较为成熟的技术包括以颜色恒定性为初衷的 Retinex 系列算法和各种色调映射算法。

Retinex 算法^[1]是将视觉特性运用到真实影像再现领域的突出代表,与传统的灰度世界法(Gray World Methods)、色域映射法(Gamut Mapping Methods)以及神经网络法(Neural Net Methods)等相比较,更成功地揭示了人类颜色视觉系统的许多基本属性,理论简单明了,在工程实际中得到了成功的应用,成为当前影像再现技术中影响力最大的理论。

相较于 Retinex 系列算法强调以颜色恒定性为出发点,真实影像再现的另一分支是最早由 J. Tumblin 等^[2]针对动态范围压缩提出的,可称为色调映射(Tone Mapping)算法。该类算法种类较多,理论依据各异,尚没有某一算法足以形成特定的体系,发展较为分散。它们在压缩动态范围的同时,试图保留原始图像的观感质量,如亮度、可见度、对比度等特性,其色彩信息的调整能有效地增强细节,但不一定具备颜色恒定性。

事实上,真实影像再现算法不便简单分类。这里仅从初始研究目的角度作分别阐述,其实际效果可能会有交叉。虽然 Retinex 的初衷是用于解释颜色恒定性,但实际上它也具备了高动态范围压缩的性能,因此在真实影像再现技术的发展,特别是实际应用中占据了重要的位置。很多文献也将 Retinex 算法归为色调映射算法(包括在 Retinex 算法基础上以动态范围压缩为直接目的的算法^[3])。

4.1 Retinex 系列算法

从物理光学中可以知道,在正常情况下,抵达视网膜细胞或者其他成像器件像元的颜色信号是场景中某点的表面反射率和环境入射光强度的乘

积^[4,5],即

$$I(x, y) = R(x, y)L(x, y), \quad (1)$$

式中 $R(x, y)$ 为某颜色通道的像素 (x, y) 处的表面反射率, $L(x, y)$ 为相应像素位置的入射光强度, $I(x, y)$ 为图像像素值。

Retinex 理论通常的做法是将图像 I 分解成两个独立的部分:由场景内物体表面反射率决定的反射率图像 R ,由环境光照决定的照度图像 L 。分离照度图像 L ,就有可能有效地剔除光照的影响,以保持图像的颜色恒定性,同时有利于增强图像细节,特别是恢复由于光照的空间变化(如室内、室外光照差异等)造成的丢失信息。大多数 Retinex 算法的首要步骤,都是将图像像素转化到对数域。对(1)式做对数运算,得到

$$i = r + l, \quad (2)$$

式中 $i = \log I, r = \log R, l = \log L$ 。

这样由乘法简化为加法运算,无疑大大提高了运算能力,且符合心理视觉特性^[6]。由于视觉系统感光细胞具有天然的自动增益控制能力,能迅速调节与外界光照水平相适应的工作状态;通过对输入强度取对数进行建模,能粗略反映这一特性^[7]。算法结构框图如图 1 所示。不同算法的区别集中在光照图像 L 的计算(即图 1 的阴影部分,图中带“'”符号表示重构后的相应图像)。

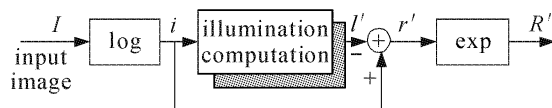


图 1 Retinex 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of Retinex algorithms

按照“光照计算”步骤中应用的视觉基础不同或者侧重点不同,可以将 Retinex 系列的发展历程分为四个阶段。

第一阶段:以随机路径为基础的明度计算。

1971 年, E. H. Land 等^[1]将颜色恒定性以及明度计算简化为工程可操作的计算模型。他们强调^[6,8,9],视觉神经系统对色彩的感知主要取决于物体反射率以及周围物体反射率的对比,即使空间照度在发生相当大程度改变的情况下,视觉系统也能做出正确判断。若干年后, A. Hurlbert^[10]证明了 Retinex 算法与其他明度算法具有相同的数学假设,归纳为明度计算三假设,即:

1) 外界景物图像是由不同的色块组成的,在每个颜色通道内每个色块的反射率具有单一值,即景

物 Mondrian 化(荷兰画家 Mondrian 以抽象几何图案风格的绘画著称)。

2) 照度在整个视场空间域内变化缓慢而且平滑,并且在视场内任何一点都独立于观察者的位置。

3) 视场中图像在每个颜色通道内的平均反射率相等,即“灰度世界”假设。

第二阶段:中心-环绕模型的应用。

用随机路径计算明度,原理简单,但如何选取合理的路径成为一个困扰。随后,E. H. Land 与其他研究者^[11~13]合作,将神经生理学的中心-环绕受域的概念引入到明度计算,提出了中心-环绕 Retinex (Center-Surround Retinex, 简称 CSR)^[14],以常规窗口卷积代替随机路径的简化,符合人类视觉系统的受域特性。此后,以 Retinex 为基础的算法研究及其改进得到了普遍重视^[15~17]。

A. Moore 等^[18]利用超大规模集成电路,根据中心-环绕 Retinex 原理,采用硬件实现了一个颜色恒定性系统,利用阻尼网络在超大规模集成电路中实现了 Retinex 算法,并且针对违反“灰度世界”假设的图像,设计了一种“Edginess”算子来克服 Retinex 的缺陷,以恢复由此导致的颜色失真。

Brian Fund 等对 Retinex 早期算法进行了系统研究^[15,19~21],并加以拓展,如基于泊松方程的改进

算法^[19]、基于多分辨金字塔的非线性滤波方法^[15]等。文献[15]较全面地分析了 Retinex 有关参数(尤其是迭代次数、空间距离等)的影响。

第三阶段:多尺度中心-环绕模型的提出。

D. J. Jobson 等^[22,23]在 1997 年将中心-环绕 Retinex 应用于真实影像再现,通过对比仿真,发现高斯函数适合模拟人眼的低通滤波特性,确定了 Retinex 在图像处理上的正确表现形式,表示为

$$O_i(x, y) = \log I_i(x, y) - \log [F(x, y) * I_i(x, y)], \quad (3)$$

式中 $I_i(x, y)$ 表示颜色通道的图像信息, $F(x, y)$ 为环绕函数, $*$ 表示卷积运算, $O_i(x, y)$ 即中心-环绕 Retinex 输出。这种单尺度中心-环绕 Retinex 又称 SSR (Single-Scale Retinex), 在较小的尺度下,单尺度 Retinex 能够实现高动态范围压缩,而在较大的尺度下能实现色调再现,但两者无法兼得。于是 Zia-ur Rahman 等进一步将 Retinex 做多尺度扩展^[24~26] (Mutiscale Retinex, 即 MSR)

$$O_i(x, y) = \sum_{k=1}^K W_k \{ \log I_i(x, y) - \log [F_k(x, y) * I_i(x, y)] \}, \quad (4)$$

其原理见图 2^[27]。

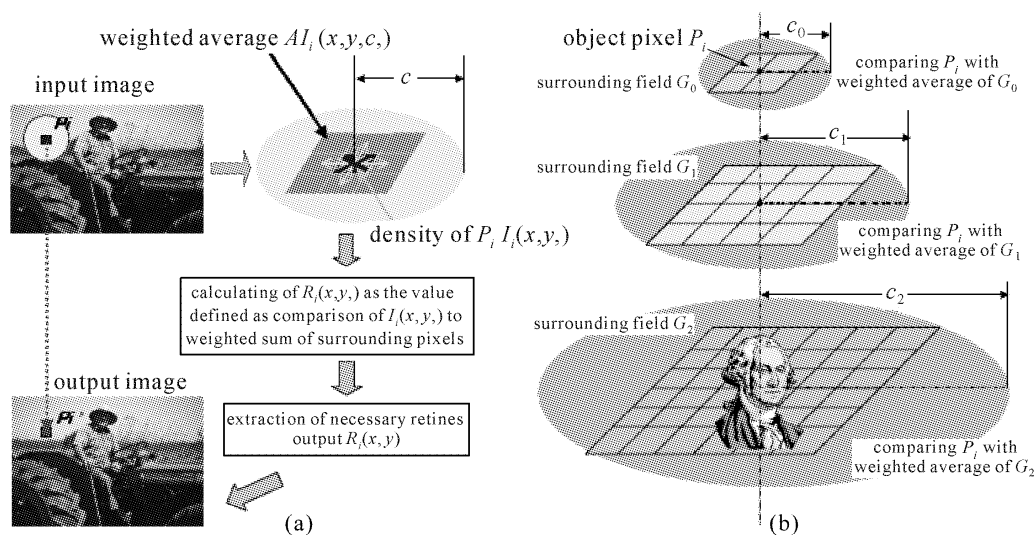


图 2 单尺度 Retinex 和多尺度 Retinex 原理示意图

(a) 单尺度 Retinex 原理示意图; (b) 由单尺度 Retinex 扩展到多尺度 Retinex 的原理示意图

Fig. 2 Diagram of SSR and MSR method

(a) diagram of SSR method; (b) diagram of expansion into MSR method

同时,为克服由灰度假设带来的病态结果,引入颜色复原函数 (Color Restoration Function, 简称 CRF), 获得极好效果

$$O_i(x, y) = \alpha_i(x, y) \times$$

$$\sum_{k=1}^K W_k \{ \log I_i(x, y) - \log [F_k(x, y) * I_i(x, y)] \}, \quad (5)$$

$$\alpha_i(x, y) = f [I_i(x, y) / \sum_{n=1}^N I_n(x, y)], \quad (6)$$

式中 F_k 表示第 k 尺度下的环绕函数, W_k 为对应于 F_k 的权重, $\alpha_i(x, y)$ 为颜色复原因子, i, n 均表示色彩通道, f 为某种颜色复原函数。

但颜色复原函数凭经验确定, 从目前看, 尚缺乏生理学理论的支持。

图 3 显示了单尺度 Retinex 和多尺度 Retinex 处理的效果^[25]。其中图 3(a) 为原始图像, 图 3(b)~(d) 分别为小、中、大尺度下单尺度 Retinex 处理的效果。从图中可以看出, 在较小尺度下单尺度 Retinex 相当于高通滤波, 但丢失了大量色彩信息; 大尺度下单尺度 Retinex 在损失动态范围的基础上, 能有效地保持色彩信息。图 3(e) 采用多尺度 Retinex 处理, 取得了很好的折衷效果。

本课题组从 S. Grossberg 等的侧向并联中心-环绕受域神经网络 (Center-Surround Shunting Neural Networks, CSSNN) 动力学方程^[28~31] 出发, 得到原始图像的双对抗神经元输出, 并对其进行多尺度扩展, 综合考虑神经元的输出显示、整流函数的作用、颜色复原函数等多种因素, 获得了令人满意的效果 (如图 4(b)), 称为 CRMSONN (Color Restored Multi-Scale Opponent Neural Networks)^[32]。

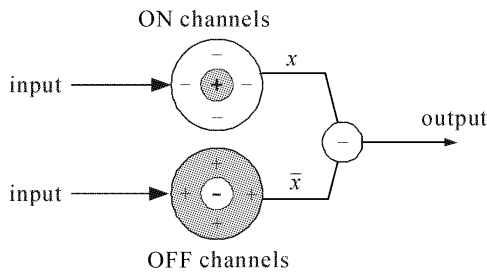


图 5 双对抗神经网络示意图

Fig. 5 Diagram of dual-opponent neural networks

通过模拟同心圆结构的 ON/OFF 通道 (见图 5, “+”表示对输入刺激的兴奋响应, “-”表示其抑制响应; ON, OFF 通道分别意味着 ON-center OFF-surround 以及 OFF-center ON-surround), 视觉系统的空间对抗特性可从神经动力学方程的角度得到说明。根据 S. Grossberg 等^[28~31] 对 ON, OFF 对抗系统细胞响应的描述, 有:

ON 对抗系统细胞响应 $O_{i,ON}(x, y)$

$$\frac{d}{dt}O_{i,ON}(x, y) = -A[O_{i,ON}(x, y) - D_{ON}] + [E - O_{i,ON}(x, y)]C_i(x, y) - [F + O_{i,ON}(x, y)]S_i(x, y), \quad (7)$$

OFF 对抗系统细胞响应 $O_{i,OFF}(x, y)$

$$\frac{d}{dt}O_{i,OFF}(x, y) = -A[O_{i,OFF}(x, y) - D_{OFF}] + [E - O_{i,OFF}(x, y)]S_i(x, y) - [F + O_{i,OFF}(x, y)]C_i(x, y), \quad (8)$$

式中 $O_{i,ON}(x, y)$, $O_{i,OFF}(x, y)$ 分别表示第 i 通道的 ON, OFF 对抗系统输出, A 为衰减系数, D_{ON} , D_{OFF} 表示细胞基底活性, E, F 为极化常数, $C_i(x, y)$, $S_i(x, y)$ 分别表示受域的兴奋中心、侧向抑制环绕区域, 以不同空间常数的高斯窗口 $F_C(x, y)$, $F_S(x, y)$ 卷积体现

$$C_i(x, y) = F_C(x, y) * I_i(x, y), \quad (9)$$

$$S_i(x, y) = F_S(x, y) * I_i(x, y), \quad (10)$$

可以推出

$$O_i(x, y) = O_{i,ON}(x, y) - O_{i,OFF}(x, y) = \frac{K[C_i(x, y) - S_i(x, y)] + P}{A + C_i(x, y) + S_i(x, y)}, \quad (11)$$

式中 $K = E + F$ 为系统增益系数, $P = A(D_{ON} - D_{OFF})$ 为神经网络的基底活性, $O_i(x, y)$ 即双对抗神经元输出。

式 (11) 的分子是带有直流偏差的 DOG (Difference of Gaussian), 用于探测景物亮度差异, 符合受域的对比度感知属性; 其分母是 SOG (Sum of Gaussian), 随着亮度增加而增加, 提供了对输入图像动态范围的一种非线性压缩变换。

该算法将中心-环绕对抗受域的动力学原理, 引入到真实影像再现领域, 并在此基础上, 类似于 D. J. Jobson 等进行多尺度扩展、颜色复原等操作^[32]。从该动力学方程的求解结果来看, 它与 D. J. Jobson 等的方法有异曲同工之处, 但由于涉及到的参量增多, 根据经验选择参量的结果是导致该算法应用于不同场景再现时, 效果有所差别。文献^[32] 对不同参数下的实验结果进行了详尽的分析, 但没有给出确切的选择依据。对视觉适应过程中, 就外加刺激对神经动力学方程某些参数的影响作详细讨论, 有可能寻找模型的改进方向。

第四阶段: 从实际生产应用出发的 Retinex 改进手段。

近年来 Retinex 算法的进一步发展, 主要是针对原有算法的不足加以改进, 包括色彩及其饱和度调整、噪声控制等方面。

2003 年, Tatsumi Watanabe 等^[27] 基于提升数码相机在暗背景区域的成像品质和处理速度, 提出了改进的线性多尺度 Retinex 算法 (Modified Linear Multi-Scale Retinex, 即 ML-MSR) 和加速

ML-多尺度 Retinex 算法,能有效地压缩动态范围,增强暗背景区域图像的可见性,同时保持很好的色彩平衡和饱和度(见图 6)。

同年,Ron Kimmel 等^[33]也提出了一种收敛性好的多分辨方法,并从数学上证明其收敛性。实验显示该算法鲁棒性好,参数变化对其影响不大。若使之分别作用于 RGB,HSV 空间,对于富含光谱信息的光源图像,RGB 空间处理效果较好;反之,则宜于选择 HSV 空间。文献还进一步设计了 Retinex-Gamma 校正反馈系统,利用 Gamma 校正手段重构 Retinex 运算结果,能有效控制 Retinex 图像的全局亮度。

Hau Ngo 等^[34]针对黑暗环境下人脸识别的特殊要求,对多尺度 Retinex 加以改进,得到了具有亮度依赖性的非线性图像增强技术(Luma-Dependent Nonlinear Enhancement,即 LDNE)。该技术的特点是引入图像亮度的计算,一方面通过亮度与不同尺度高斯窗口的卷积,有效地抑制了传统多尺度 Retinex 对噪声的增强,简化了传统多尺度 Retinex 的运算形式,有效地节省了时间;另一方面运用亮度控制技术自动探测亮度均匀区域,避免不必要的亮度衰落。

2005 年中国台湾徐道义等^[35, 36]的论文中,考虑到人眼构造和双目视觉的观测条件,结合特殊方向式的非同圆高斯函数对多尺度 Retinex 进行改进。该思路颇有新意,将人眼视角范围的因素纳入考虑,且用非等轴高斯窗口来体现,但对其实际改进效果和时间复杂性方面仍有待探讨。

可见,Retinex 算法是近年来研究较为全面的一种真实影像再现算法,既符合视觉系统的特点,原理简单清晰;又针对实际应用的需要,融入了色彩调节、噪声控制等因素,以获得更好的视觉效果。从实验效果看,Retinex 的颜色恒定性的确表现优异。但值得一提的是,Retinex 计算(特别是多尺度 Retinex)可能涉及到较大空间常数,这就导致了其计算复杂性高,耗时多,不利于实时处理场合。

4.2 动态范围压缩算法

文献[37~39]综述了动态范围压缩技术的发展情况,基于视觉特性的相关算法一般建立在视觉适应、增益控制等基础上,不同机制的效果有所差别,体现在算法复杂度与速度、压缩效果、失真情况(如“光晕(halo)”、“白化(graying)”)等方面。

Tumblin, Rushmeier^[35]基于超阈值亮度测量原理,建立了亮度、亮度适应与明度之间的关系。

James A. Ferwerda 等^[40]综合考虑了亮、暗视觉适应对于阈值、色貌、锐度及敏感性随时间变化的影响。G. Ward Larson 等^[41]根据视网膜中央凹的局部视觉适应建立模型,能有效地避免“光晕”和其他失真。

S. M. Courtney 等^[42]为灵长类生物的视觉系统建立了一套多级神经网络。H. Spitzer 等^[43]根据视觉适应机制建立的模型也获得成功。S. N. Pattanaik 等^[44]从空间视觉和视觉适应机制出发,建立了一套多分辨的计算模型,包括空间视觉的阈值、空间视觉的适应、空间视觉的超阈值以及适应等,并且在多分辨框架的基础上,有机地结合了这些视觉特性,从而在真实影像再现处理上得到很好的结果。但该模型过于复杂,影响了其实际应用。

最近较为突出的研究成果还包括:模拟光感受器的亮度适应机制,Erik Reinhard 等^[45]设计的算法速度快,包含若干独立参数,可分别控制对比度、全局亮度、色彩适应等;Li 等^[46]基于同一原理,设计了局部增益控制方法,以一维信号为例解释了其增益控制的构造原理;Patrick Ledda 等^[47, 48]在一系列生理学实验的基础上,结合视觉适应的时间依赖性和视觉锐度因素综合建立模型。

本课题组提出了一种改进的视锥适应模型^[49],以模拟色素漂白与神经反馈对视锥适应的相互作用关系,使得在外界光发生局部或全局变化时仍能保持较高的对比度敏感性。文献[50]综合考虑了视网膜视锥通道信息处理过程的若干影响因素,并给出一种视锥转换函数,但其图像处理效果未必最佳。经实验发现,反映神经反馈的半饱和常数的取值对图像处理质量有较大影响,因此课题组采用了改进方法,保持半饱和常数与色素半漂白常数之间的比例关系不变,同时调节半饱和常数的大小,使之随输入强度自适应变化,表示为

$$V_r(I) = V_{\max} \frac{I^n}{I^n + \left(\frac{k_r}{k_b} I_a + k_r \cdot c \right)^n}, \quad (12)$$

式中 V_r 为感光细胞电位, V_{\max} 为感光细胞最大电位, I 为输入刺激强度, n 为响应曲线陡峭度, k_r 为半饱和常数, k_b 为色素半漂白常数, c 为系数, I_a 为背景强度。

该方法能有效突出图像亮区和暗区的细节,动态范围压缩性能较好,且在很大程度上减弱“光晕”、“白化”等效应,实时性较好(见图 4(c))^[49]。图 4 显示了本课题组在真实影像再现算法上的成果。

此外,本课题组在基于不同视觉特性的真实影像再现方法上,都开展了一定的研究工作,并正在进一步深化过程中,如基于视觉阈值特性、基于皮层变换、基于其他典型神经动力学方程,以及一些典型生理学实验结论为基础的方法研究已初见成效。有关研究情况,将另文介绍。

4.3 基于视觉特性的真实影像再现技术的实用化进程

实用化是科学研究深入发展的推动力。国外基于视觉特性的真实影像再现技术已经在软件、硬件平台实现上踏出成功的一步,而国内仍然处于空白。

软件方面,TruView 公司与 NASA Langley Research Center's Visual Information Processing Group 合作的专利产品 PhotoFlair 就是一款基于 Retinex 技术的图像增强软件,能够有效地解决曝光不足引起的图像信息丢失。除了提供基本的图像操作(如剪裁、缩放等)以外,PhotoFlair 运用 TruView 公司专利技术——多尺度 Retinex 技术,在图像动态范围压缩、颜色恒定性、色调再现与锐化等方面取得了优异的成果。它不仅具备“风景(Scenic)”和“人物(Portrait)”两种 Retinex 处理模式,能自动或手动设置参数,同时也集成了可能影响 Retinex 处理效果的其他辅助功能,包括色阶调整(Levels)、曲线调整(Curves)、去斑(Despeckle)、检测边缘(Detect Edges)、Gamma 校正(Gamma Correction)、灰度化(Grayscale)、直方图均衡化(Histogram Equalization)、负片(Negative)、模糊(Blur)、锐化(Sharpen)、色调调节(Variations)。

而硬件方面,NASA 在数字信号处理(DSP)上实现多尺度 Retinex 算法,并运用到机场 X 射线安全检查^[51]。

目前真实影像再现的硬件开发主要集中在三个方向上:专用集成电路(Application Specific Integrated Circuit, ASIC)、图像处理器(Graphic Processing Unit, GPU)、现场可编程逻辑门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)。

基于专用集成电路的真实影像还原技术在消费视频领域已经开始获得实际应用。Pixelworks 和 Genesis 公司都推出了各自特色的自适应颜色和对比度增强技术 ACE(Adaptive Color/Contrast Enhancement)和 ACM(Active Color Management)。

图像处理器的最大优势来自于其并行和流水处理能力,在解决高动态范围成像压缩算法方面已获

得初步进展^[52]。

而现场可编程逻辑门阵列在仿真、实时配置、反复擦写方面具有突出优势,正逐渐成为算法验证的绝佳平台。L. Fanucci 等最新的研究^[53]表明,基于 Virtex-II 平台的改良 Retinex 真实影像再现算法在静态小面阵图像上取得了一定的突破。前文所述的亮度依赖性的非线性图像增强技术在 Altera 的 EP20K200C 现场可编程逻辑门阵列上得到验证^[32],硬件结构上主要采用快速傅里叶变换和逆变换以及流水线结构提升处理速度,对于 $320 \text{ pixel} \times 240 \text{ pixel}$ 的图像能达到 21 frame/s 以上,其结构框图见图 7^[32]。

基于现场可编程逻辑门阵列的互联网协议(IP)化技术实现真实影像再现是课题组当前的研究目标。

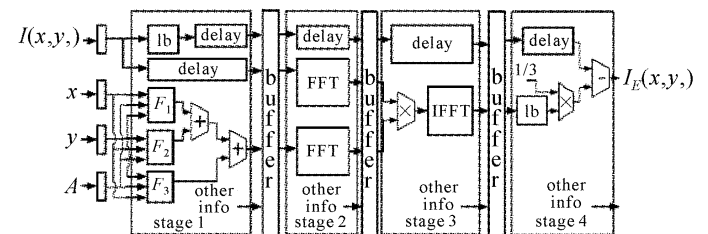


图 7 流水线型 LDNE 算法的硬件结构框图

Fig. 7 Block diagram of a pipelined LDNE based image enhancement architecture

5 展望

总结以上研究,可以看出未来需要跟踪生理视觉相关组织解剖学研究的成果及新的数学模型、心理视觉研究动态等,进一步开展基于视觉特性的相应软/硬件开发。

未来的发展可从以下几个方面着手:

1) 进一步深入研究、分析人类视觉系统的特性。

对于人类视觉系统,所感兴趣的主要是参与视觉形成的各种视觉系统结构和视觉特性,包括视觉通道、受域和空间视觉对抗、光谱对抗、视觉适应等特性,以及更高级的视觉信息处理机制。

如何选择适用于图像处理的视觉特性模型,是目前研究的一个瓶颈。一则需要全面了解视觉系统的理论,为图像处理寻找可接纳、可应用的模型;二则即便找到可能的研究方向,由于生物视觉系统的复杂性、现有相关知识体系本身的不完善,在实际操作中还需要简化、反复实验等,可行性验证费时费力。

2) 研究优秀的基于视觉特性的真实影像再现算法,探索其生理学本质。

Retinex 一词来自于视网膜(Retina)和大脑皮层(Cortex)两词的组合。这是由于 E. H. Land 最初无法确定颜色恒定性计算发生在视觉处理过程中的具体环节,于是创立了此概念。而后来的算法改进中,颜色复原函数等的提出尚缺乏严格的神经生理学理论支持。再加上国外对技术细节严格保密,有必要进一步深入研究其参量选择是否存在视觉理论依据。

3) 进一步研究普适性的真实影像再现算法。

当前的研究一般都对环境光照有一定的约束条件,通常规定场景内光照均匀,符合“灰度世界”假设。这与实际情况有所差别,特别是针对光照空间变化大的场景,对特殊的反射表面(如镜面、水面等)的明度计算。Kobus Barnard 等^[54]对此进行研究,取得一定的成果。

4) 真实影像再现算法运行的自动化、实时化。

人类视觉系统并不是十全十美的:当外界光强减弱时,视觉锐度将逐渐减小;当外界光强增强时,对比度敏感性将逐渐降低;视觉适应、尤其是暗适应,是个较“漫长”的时间过程。如果严格以此为依据,将无法得到实时处理的模型。因此,如果过分拘泥于视觉现象的生理学或心理物理学背景,可能会导致算法过于复杂,实用性不高。如何选取合理的视觉特性理论、模型,既能保证视觉系统优越性充分发挥,自适应各种环境光照的变化,又能很好地提高算法效率,是一个很大的挑战。

真实影像再现算法应用于视频处理应是课题组今后研究的重点之一。

5) 深入研究有效的真实影像再现评价方法。

由于视觉感知量化评估方法仍然缺乏,对于复杂图像的评判只能在主观心理评价框架内进行,因此依据生理、心理物理学进行量化评估,也需要建立在对视觉系统深入研究的基础上。

文献[33]总结了较为常用的评价指标,如均方误差(MSE)、信噪比(SNR)、峰值信噪比(PSNR),并试图通过 CIELab 色域空间比对再现前后的色相偏移、亮度对比、色度对比等信息。

运用色度学相关理论评价真实影像再现效果,是有效途径之一。

6) 开展真实影像再现技术的软/硬件开发。

结合当前消费市场对于影像增强技术的需求,以及整个中国技术市场的发展氛围,真实影像再现

技术的软/硬件开发都应以互联网协议化研究为主要对象。

6 结 论

本文是在文献[55,56]陈述的基础上,重点阐述了基于视觉特性的真实影像再现技术的新的研究动态和若干新进展,其中包括应用视觉空间对抗、颜色对抗、视觉适应等视觉系统理论构造符合人类视觉感知的真实影像再现算法的发展现状、优势比较和前景展望,介绍了国外在软/硬件平台实现上的研究成果。文中也概括了本课题组在该领域的部分研究成果,并提出了今后的工作方向。

参 考 文 献

- 1 E. H. Land, J. J. McCann. Lightness and retinex theory [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1971, **61**(1):1~11
- 2 J. Tumblin, H. Rushmeier. Tone reproduction for realistic images [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1993, **13**(6):42~48
- 3 Laurence Meylan, Sabine Süsstrunk. High dynamic range image rendering with a retinex-based adaptive filter [J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2006, **15**(9):2820~2830
- 4 D. H. Brainard, B. A. Wandell. Analysis of the retinex theory of color vision [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1986, **3**(10):1651~1661
- 5 L. T. Maloney. Evaluation of linear models of surface spectral reflectance with small numbers of parameters [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1986, **3**(10):1673~1683
- 6 E. H. Land. The retinex theory of color vision [J]. *Sci. Am.*, 1977, **237**(6):108~128
- 7 Yuanzhen Li, Lavanya Sharan, Edward H. Adelson. Compressing and companding high dynamic range images with subband architectures [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, **24**(3):836~844
- 8 E. H. Land. Recent advances in retinex theory and some implications for cortical computations; color vision and the natural image [C]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 1983, **80**:5163~5169
- 9 J. J. McCann, S. P. McKee, T. H. Taylor. Quantitative studies in retinex theory [J]. *Vision Research*, 1976, **16**:445~458
- 10 A. Hurlbert. Formal connection between lightness algorithms [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1986, **3**(10):1684~1693
- 11 M. S. Livingstone, D. H. Hubel. Anatomy and physiology of a color system in the primate visual cortex [J]. *J. Neurosci.*, 1984, **4**(1):309~356
- 12 S. M. Zeki. Color coding in the cerebral cortex; the reaction of cells in the monkey visual cortex to wavelengths and colors [J]. *J. Neurosci.*, 1983, **9**(4):741~765
- 13 S. M. Zeki. The representation of colors in the cerebral cortex [J]. *Nature*, 1980, **284**(5755):412~418
- 14 E. H. Land. An alternative technique for the computation of the designator in the retinex theory of color vision [C]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 1986, **83**:3078~3080
- 15 Brian Funt, Florian Ciurea, John McCann. Retinex in Matlab [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, **13**(1):48~57
- 16 J. J. McCann. Capturing a black cat in shade: the past and present of retinex color appearance models [C]. *SPIE*, 2002, **4662**:331~340
- 17 Robert Sobol. Improving the retinex algorithm for rendering wide dynamic range photographs [C]. *SPIE*, 2002, **4662**:341~348

- 18 A. Moore, J. Allman, R. M. Goodman. A real-time neural system for color constancy [J]. *IEEE Trans. Neural Networks*, 1991, **2**(2):237~247
- 19 B. V. Funt, M. S. Drew, M. Brockington. Recovering shading from color images [C]. *Proc. European Conference on Computer Vision (ECCV'92)*, 1992. 124~132
- 20 Brian Funt, Florian Ciurea, John McCann. Tuning retinex parameters [C]. *SPIE*, 2002, **4662**:358~366
- 21 Graham D. Finlayson, Steven D. Hordley. Color constancy at a pixel [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2001, **18**(2):253~264
- 22 D. J. Jobson, Z. Rahman, G. A. Woodell. Properties and performance of a center/surround retinex [J]. *IEEE Trans. on Image Processing: Special Issue on Color Processing*, 1997, **6**(3):451~462
- 23 D. J. Jobson, Z. Rahman, G. A. Woodell. A multi-scale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes [J]. *IEEE Trans. on Image Processing: Special Issue on Color Processing*, 1997, **6**(7):965~976
- 24 Zia-ur Rahman, Daniel J. Jobson, Glenn A. Woodell. Retinex processing for automatic image enhancement [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, **13**(1):100~110
- 25 Zia-ur Rahman, Daniel J. Jobson, Glenn A. Woodell *et al.*. Image enhancement, image quality, and noise [C]. *SPIE*, 2005, **5907**:59070N-1~59070N-15
- 26 Zia-ur Rahman, Daniel J. Jobson, Glenn A. Woodell. Multi-scale retinex for color image enhancement [C]. *Proc. IEEE Intl. Conf. Image Process*, 1996, (3):1003~1006
- 27 Tatsumi Watanabe, Yasuhiro Kuwahara, Akio Kojima *et al.*. Improvement of color quality with modified linear multi-scale retinex [C]. *SPIE*, 2003, **5008**:59~69
- 28 S. Grossberg, E. Mingolla, J. Williamson. Synthetic aperture radar processing by a multiple scale neural system for boundary and surface representation [J]. *Neural Networks*, 1995, **8**(7/8):1005~1028
- 29 E. Mingolla, W. Ross, S. Grossberg. A neural network for enhancing boundaries and surfaces in synthetic aperture radar images [J]. *Neural Networks*, 1999, **12**(3):499~511
- 30 S. Grossberg, E. Mingolla. Visual brain and visual perception: how does the cortex do perceptual grouping [J]. *Trends in Neuroscience*, 1997, **20**(3):106~111
- 31 S. Grossberg, R. D. S. Raizada. Contrast-sensitive perceptual grouping and object-based attention in the laminar circuits of primary visual cortex [J]. *Vision Research*, 2000, **40**(10):1413~1432
- 32 Tian Pu, Jie Zhang, Guoqiang Ni. Color image enhancement using a multiple-scale opponent neural network [J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(10):2369~2380
- 33 Ron Kimmel, Michael Elad, Doron Shaked *et al.*. A variational framework for retinex [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2003, **52**(1):7~23
- 34 Hau Ngo, Li Tao, Vijayan Asari. Design of an Efficient Architecture for Real-time Image Enhancement Based on a Luma-Dependent Nonlinear Approach [C]. *Proc. of the International Conference on Information Technology: Coding and Computing (ITCC'04)*, 2004, **1**:656~660
- 35 Xu Daoyi, Li Yunru. Color image enhancement using hybrid retinex algorithm [D]. *Master's Thesis of Shih Hsin University*, 2005, **7**:38~54
徐道义,李昀儒. 改良式 Retinex 的色彩影像强化研究[D]. 世新大学硕士论文, 2005, **7**:38~54
- 36 Xu Daoyi, Li Yunru, Xu Daoren. An innovative color enhancement utilizing human visualized system [J]. *Journal of CAGST*, 2005. 23~35
徐道义,李昀儒,徐道仁. 以人眼具区域性弹性调整特性的彩色影像的显像方法之探讨[J]. 中华印刷科技年报, 2005. 23~35
- 37 Jeffrey M. DiCarlo, Brian A. Wandell. Rendering high dynamic range images [C]. *SPIE*, 2000, **3965**:392~401
- 38 Patrick Ledda. Development of a Perceptual Tone Mapping Operator [OL]. University of Bristol, <http://aris-ist.intranet.gr/documents/Tone%20Mapping%20and%20High%20Dinamic%20Range%20Imaging.pdf>
- 39 S. Battiato, A. Castorina, M. Mancuso. High dynamic range imaging for digital still camera: an overview [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2003, **12**(3):459~469
- 40 James A. Ferwerda, Sumanta N. Pattanaik, Peter Shirley *et al.*. A model of visual adaptation for realistic image synthesis [J]. *Computer Graphics*, SIGGRAPH 1996. 249~258
- 41 G. Ward Larson, H. Rushmeier, C. Piatko. A visibility matching tone reproduction operator for high dynamic range scenes [J]. *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, 1997, **3**(4):291~306
- 42 S. M. Courtney, L. H. Finkel, G. Buchsbaum. A multistage neural network for color constancy and color induction [J]. *IEEE Trans. on Neural Networks*, 1995, **6**(4):972~985
- 43 H. Spitzer, S. Semo. A Biological Color Constancy Model and Its Application for Real Images [C]. *International Conf. Color in Graphics and Image Processing-CGIP*, 2000. 27~32
- 44 S. N. Pattanaik, J. Ferwerda, M. D. Fairchild *et al.*. A multiscale model of adaptation and spatial vision for realistic image display [J]. *Computer Graphics*, SIGGRAPH 1998. 287~298
- 45 Erik Reinhard, Kate Devlin. Dynamic range reduction inspired by photoreceptor physiology [J]. *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, 2005, **11**(1):13~24
- 46 Yuanzhen Li, Lavanya Sharan, Edward H. Adelson. Compressing and companding high dynamic range images with subband architectures [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, **24**(3):836~844
- 47 Patrick Ledda, Luis Paulo Santos, Alan Chalmers. A local model of eye adaptation for high dynamic range images [C]. *Proc. of the 3rd International Conference on Computer Graphics, Virtual Reality, Visualisation and Interaction in Africa*, 2004. 151~160
- 48 Patrick Ledda, Alan Chalmers, Helge Seetzen. HDR displays: a validation against reality [C]. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2004, **3**:2777~2782
- 49 Huang Guanghua, Ni Guoqiang. A realistic image rendition method based on the cone adaption model [J]. *Journal of Image and Graphics* (to be published)
黄光华,倪国强. 一种基于视锥适应模型的真实影像再现方法[J]. 中国图象图形学报(待发表)
- 50 Samir Shah, Martin D. Levine. Visual information processing in primate cone pathways—part I: a model [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1996, **26**(2):259~274
- 51 Glenn Woodell, Zia-ur Rahman, Daniel J. Jobson *et al.*. Enhanced images for checked and carry-on baggage and cargo screening [C]. *SPIE*, 2004, **5403**:582~589
- 52 Peeng Tao, Hu Yaohua, Li Zaiming. High dynamic range compression on programmable graphics hardware [J]. *Microcomputer Development*, 2005, **15**(9):154~157
彭 韬,胡耀华,李在铭. 在可编程图形硬件上实现图像高动态范围压缩[J]. 微机发展, 2005, **15**(9):154~157
- 53 L. Fanucci, M. Cassiano, S. Saponara *et al.*. ASIP design and synthesis for non linear filtering in image processing [C]. *Proceedings of Design, Automation and Test in Europe*, 2006, **2**:1~6
- 54 Kobus Barnard, Graham Finlayson, Brian Funt. Colour constancy for scenes with varying illumination [C]. *ECCV'96 Fourth European Conference on Computer Vision*, 1996, **2**:3~15
- 55 Ni Guoqiang, Dai Wen, Li Yongliang *et al.*. A visual/IR color image fusion based on rattlesnake bionodal cell neurodynamics: advances and prospects [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2004, **24**(2):95~100
倪国强,戴 文,李勇量等. 基于响尾蛇双模式细胞机理的可见光红外图像彩色融合技术的优势和前景展望 [J]. 北京理工大学学报, 2004, **24**(2):95~100
- 56 Ni Guoqiang. Image fusion technology and its new development [J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(11):817~821
倪国强. 基于视觉神经动力学的图像融合与处理技术若干新进展[J]. 激光与红外, 2005, **35**(11):817~821

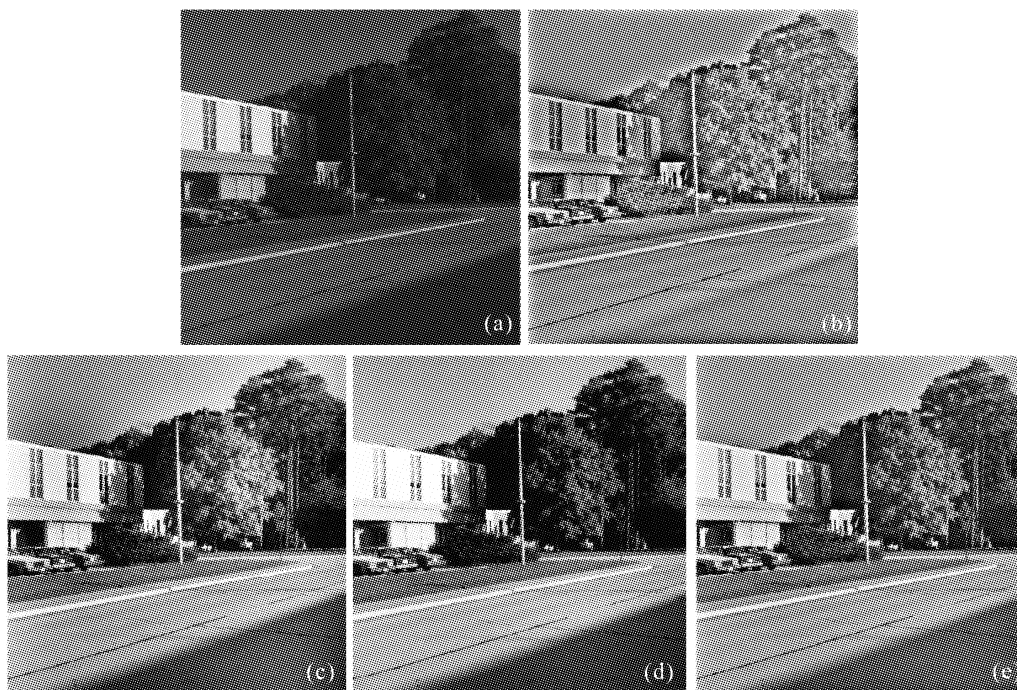


图 3 单尺度 Retinex 与多尺度 Retinex 效果展示

(a) 原始图像;空间常数为(b) 15 pixel;(c) 80 pixel;(d) 250 pixel;(e) 多尺度 Retinex 处理结果

Fig. 3 Results comparison of SSR and MSR

(a) original image; (b) 15 pixel; (c) 80 pixel; (d) 250 pixel; (e) result of MSR

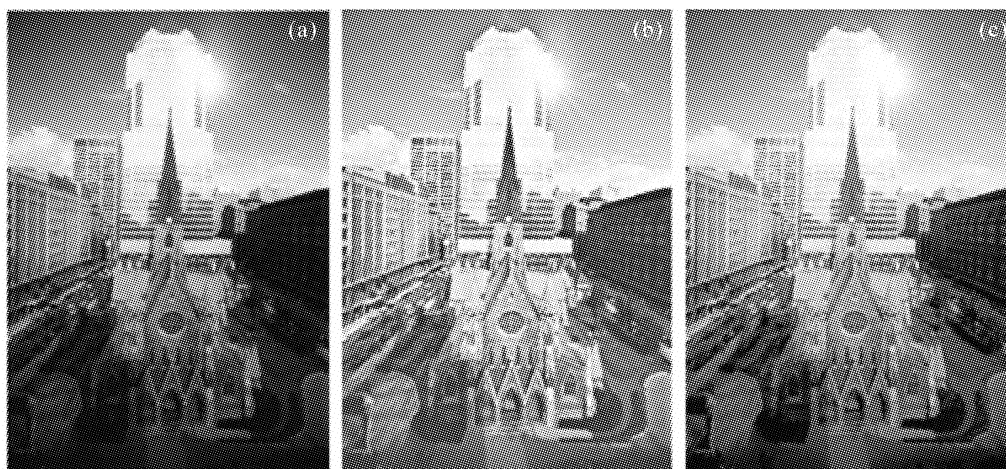


图 4 本课题组算法效果比较

(a) 原始图像;(b) 课题组算法 1 的效果;(c) 课题组算法 2 的效果

Fig. 4 Results of our methods

(a) original image; (b) result of our method 1; (c) result of our method 2



图 6 两种真实影像再现算法效果比较

(a) 原图;(b) Jobson 等多尺度 Retinex 处理效果;(c) 改进的线性多尺度 Retinex 处理效果

Fig. 6 Results of two methods

(a) original image; (b) result of Jobson's method; (c) result of ML-MSR method