

基于自适应多尺度 Retinex 的光学相干层析 图像衰减补偿算法

王龙志¹ 姚晓天^{1,2} 孟卓^{1,2} 刘铁根¹ 李志宏¹ 石博雅¹ 苏亚¹ 张荣香¹ 刘文辉¹

(¹ 天津大学精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术科学教育部重点实验室 光偏振研究中心, 天津 300072)

² 苏州光环科技有限公司, 江苏 苏州 215123

摘要 随着成像深度的增加,光衰减会造成光学相干层析技术(OCT)对深层组织成像的局部图像对比度下降,不利于观察组织内部结构特征变化。提出了一种基于自适应多尺度 Retinex 算法实现对 OCT 信号衰减的有效补偿。采用大尺度 Retinex 算法增强图像与其他尺度 Retinex 算法增强图像之间差值的绝对值均值作为调整参数,实现每个尺度在多尺度 Retinex 算法中权重的自适应调节。采用人体指尖 OCT 图像和前臂内侧皮肤 OCT 图像对算法进行了验证,结果表明:自适应多尺度 Retinex 算法实现了对 OCT 原始图像中衰减的有效补偿,同时增强了组织内部细节信息的局部对比度;增强图像的可视化对比度测度(VCM)相对于原始图像平均增加了 5740。该算法对于提高组织内部信息可视化具有积极的意义。

关键词 医用光学;光学相干层析;多尺度 Retinex 算法;衰减补偿

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1204001

An Optical Coherence Tomography Attenuation Compensation Algorithm Based on Adaptive Multi-Scale Retinex

Wang Longzhi¹ Yao Xiaotian^{1,2} Meng Zhuo^{1,2} Liu Tiegeng¹ Li Zhihong¹ Shi Boya¹
Su Ya¹ Zhang Rongxiang¹ Liu Wenhui¹

¹ Optical Polarization Research Center, Key Laboratory of Opto-Electronics Information and
Technical Science, Ministry of Education, College of Precision Instrument and Opto-Electronics
Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

² Suzhou Optoring Technology, Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215123, China

Abstract With imaging depth increasing, the local contrast in the optical coherence tomography (OCT) image of object decreases, which makes it difficult to observe the internal features of object. An adaptive multi-scale Retinex (AMSR) algorithm is proposed for OCT attenuation compensation. It automatically adjust the weights of Retinex enhanced images with different scales according to the mean values of absolute differences between Retinex enhanced image with large scale and Retinex enhanced images with other small scales. This method is verified by a human fingertip OCT image and skin OCT image that AMSR can effectively compensate the light attenuation in the original OCT image, and enhance the local contrast of structure details within object. Furthermore, comparing with the original OCT image, the visual contrast measure (VCM) of the AMSR enhanced image increases 5740. This method is useful to improve the visualization of structures inside object.

Key words medical optics; optical coherence tomography; multi-scale Retinex algorithm; attenuation compensation

OCIS codes 100.2980; 100.2000; 110.4500; 170.4500

收稿日期: 2013-06-14; **收到修改稿日期**: 2013-08-02

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327806)、国家自然科学基金(61201081)、国际科技合作专项(2009DFB10080, 2010DFB13180)、中国博士后基金项目(20100470782)、苏州市医疗器械与新医药科技计划项目(ZXY2012026)、江苏省基础研究计划(BK20130374)

作者简介: 王龙志(1983—),男,博士研究生,主要从事光学相干层析技术方面的研究。E-mail: longzhi_wang@sina.com

导师简介: 姚晓天(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤相干层析技术、光纤陀螺光纤环检测技术及光纤偏振传感技术等方面的研究。E-mail: steveyao888@yahoo.com

1 引言

光学相干层析(OCT)技术是一种基于低相干干涉技术和迈克耳孙干涉仪结构的光学成像技术,能够实现对被测物内部结构成像,现在已经应用在生物组织检查^[1-2]以及非生物组织内部结构成像^[3]等领域。对于被测物,特别是强衰减被测物深层结构成像,光必须先穿透被测物的上层,因此光到达深层位置时光强会有一定程度的衰减。光的衰减会限制OCT技术的成像深度,造成被测物OCT图像整体色感不一致,且在深层位置的局部对比度严重下降,从而掩盖了被测物深层结构信息,不利于OCT观察被测物的内部结构信息。研究者试图通过衰减补偿的方法来弥补这个缺陷。Thrane等^[4]提取多层组织的光学参数并对OCT信号进行衰减补偿。Hojjatoleslami等^[5]提出一种用于皮肤的OCT图像补偿算法,包含噪声去除、皮肤层检测和强度补偿三部分,对人体皮肤OCT图像的补偿效果非常明显。但是这两种算法的主要针对的是具有多层结构的生物组织,并通过提取每层的光学参数构建补偿算法的参数,限制了补偿算法在很多非层状结构衰减补偿的应用。Chang等^[6]提出通过A-Scan信号获取其对应的补偿函数用于OCT图像的衰减补偿,在洋葱和生物组织的实验中有不错的表现,但是这种算法需要对每个A-Scan信号进行单独处理,相对来说比较耗时。

针对上述问题,本文提出了一种基于自适应多尺度Retinex算法用于OCT衰减补偿。首先分析了OCT信号的成像过程,并将成像过程与图像光照补偿进行比较,描述了用于图像光照补偿的单尺度Retinex算法和多尺度Retinex算法,然后提出使用大尺度Retinex算法增强图像与其他尺度Retinex算法增强图像之间差值的绝对值均值作为调整参数,实现多尺度Retinex算法中权重的自适应调节,最后通过人体手指指尖OCT图像与其他图像增强算法进行了对比。

2 OCT信号分析

从OCT图像的成像过程来看,假设OCT对深度位置 z 进行成像,光必须先穿透被测物深度位置 z 上层组织,然后在深度位置 z 发生后向散射使得光再返回到OCT系统中。因此对于不同的深度位置,到达该位置的光强不同,且随着探测深度的增加,光强会随之衰减。对于归一化的OCT强度来

说,假设光经过被测物深度位置 z 上层的衰减为 $A_1(z)$,光在被测物深度位置 z 的后向散射为 $B(z)$,后向散射光经过被测物深度位置 z 上层的衰减为 $A_2(z)$,那么可以将OCT系统在探测深度位置 z 的信号强度 $S(z)$ 表示为

$$S(z) = A_1(z) \cdot B(z) \cdot A_2(z). \quad (1)$$

假设光进入被测物深度位置 z 上层的路径与光反向从被测物深度位置 z 上层返回的路径是相同的,即 $A(z) = A_1(z) = A_2(z)$,那么上式可以简化为

$$S(z) = [A(z)]^2 \cdot B(z). \quad (2)$$

可以看出,信号强度 $S(z)$ 分成两部分,一部分是探测光实际到达被测物深度位置 z 的光强衰减部分,即 $[A(z)]^2$,另一部分是在被测物深度位置 z 上的后向散射部分,即 $B(z)$ 。 $[A(z)]^2$ 受到衰减的影响会随着成像深度增加而减小,而 $B(z)$ 与被测物的实际结构相关,因此主要反映了被测物的内部结构信息。对OCT图像进行衰减补偿主要目的是对第一部分进行补偿,使在被测物不同深度位置上的照射光强是相同的,从而得到被测物内部的结构信息。

OCT信号的衰减补偿问题与图像光照补偿理论有非常多的相似之处,因此可以将OCT衰减补偿问题看作为图像中的光照补偿问题来考虑,下面将对光照补偿理论进行描述。

3 Retinex算法原理

Retinex算法最早由美国物理学家Land^[7]提出;Jobson等^[8-9]提出了采用中心环绕的思想来估算图像入射分量的单尺度Retinex算法(SSR)和多尺度Retinex算法(MSR),并成功运用于光照不均匀图像补偿等;王彦臣等^[10-11]也使用MSR进行X光图像强度补偿增强方面的研究,并取得了优良的性能。

Retinex算法的原理是将原始图像信号 $s(x, y)$ 看作由反射光分量 $r(x, y)$ 和入射光分量 $l(x, y)$ 两部分乘积构成,可以表示为

$$s(x, y) = r(x, y) \cdot l(x, y), \quad (3)$$

其中入射分量反映了图像周围环境的亮度,与被测物本身的特征无关;反射分量反映了被测物反射光的能力,体现了被测物的特征信息。基于此理论,如果能够通过某种方法估算图像信号中入射分量,那么就可以通过降低入射光分量对反射分量的影响,达到图像光照补偿的目的,从而很好地复原被测物的实际特征信息。

单尺度中心环绕 Retinex 算法表示为

$$R(x, y) = \log\{[s(x, y)]/[s(x, y) * F(x, y)]\}, \quad (4)$$

式中 $R(x, y)$ 为亮度补偿后的图像, $F(x, y)$ 是环境函数, $*$ 代表卷积运算, \log 为自然对数。 $s(x, y) * F(x, y)$ 表示通过亮度函数与原始图像的卷积运算估计图像信号中的入射分量部分。研究者采用了多种环境函数, Land 等^[7] 选择了 $F(x, y) = 1/r^2$, Moore 等^[12] 采用指数函数 $F(x, y) = \exp(-r/c)$, Hurlbert 等采用高斯函数作为环境函数, 即

$$F(x, y) = N \exp[-(x+y)^2/\sigma^2], \quad (5)$$

式中 σ 为高斯函数的标准偏差, N 为归一化参数, 并满足条件: $\iint F(x, y) dx dy = 1$ 。选择最常用的高斯函数作为 Retinex 算法的环境函数。

对于单尺度 Retinex 算法来说, 标准偏差 σ 的取值, 影响着图像光照补偿的效果。当标准偏差选取较小的值时, 对应小尺度 Retinex 算法, 参与 Retinex 运算的像素值主要集中在局部区域, 因此可以很好地突出图像中的细节部分, 并且图像的动态范围被压缩; 反之, 当标准偏差选取较大的值时, 对应大尺度 Retinex 算法, 参与 Retinex 运算的像素值区域扩大, 因此增强图像的色感一致性较好, 但是由于参与运算的区域增大也造成了图像中细节的模糊, 且在强边缘位置易出现光晕效果。当标准偏差 σ 选择在 50~100 范围内时, 图像能够在动态范围压缩和色感一致性之间寻找到一个最佳标准偏差值, 从而达到较好的增强效果, 但是无法保证两个方面同时到达最好的效果, 一种非常好的方案是采用多尺度的 Retinex 算法。

4 自适应多尺度 Retinex 算法

4.1 多尺度 Retinex 算法

多尺度 Retinex 算法是一种可兼顾图像动态范围压缩和图像色感一致性的图像光照补偿方法。该算法可描述为

$$R(x, y) = \sum_{i=1}^k \omega_i R_i(x, y), \quad (6)$$

式中 k 为选择的尺度个数, i 为第 i 个尺度, $R_i(x, y)$ 为第 i 个尺度下光照补偿图像结果, ω_i 为第 i 个尺度下光照补偿图像的权重。 $R_i(x, y)$ 可以表示为 $R_i(x, y) = \log\{[s(x, y)]/[s(x, y) * F_i(x, y)]\}$, 其中 $F_i(x, y)$ 为第 i 个尺度对应的环境函数, 通过选择不同的标准偏差 σ_i 调整环境函数的尺度。 Jang 等^[13]

在实验中发现, 当标准偏差 σ 取值在 50 以下时, 图像中的局部对比度很大; 当取值大于 100 时, 整个图像的局部对比度变化趋于稳定。实验表明对于大多数图像而言, 通常选取大、中、小三个尺度(选用 15、80 和 250), 在后面的算法中即是采用这三个尺度。

对于多尺度 Retinex 算法来说, 当尺度确定后, 每个尺度的权重 ω_i 的选择对于最终的图像光照补偿效果是至关重要。通常情况下选择每个尺度的权重是相同的, 但是由于不同图像包含内部信息的区别, 这种方式肯定不是最好的解决方式。通过人机交互调整每个尺度权重 ω_i 可以获得相对理想的效果, 但是需要通过多次实验, 这需要操作者熟悉算法, 同时调整过程需要浪费很多的时间, 并且得到的结果也不是最好的结果。因此有必要根据图像内部信息的特点研究一种方法实现对每个尺度权重进行自动的调整从而达到理想的光照补偿效果。

4.2 自适应多尺度 Retinex 算法

针对上述问题, 提出了一种自适应的调整每个尺度权重的方法, 从而使得多尺度 Retinex 算法效果到达最优(AMSR)。对于大尺度 SSR 来说, 整个图像的色感一致性好, 但细节模糊, 而对于小尺度 SSR 来说, 图像中的细节突出且动态范围被压缩。对于 OCT 图像来说, 由于衰减的存在, 被测物表层的灰度值一般较大, 深层次的灰度值较小, 整个图像的色感一致性差。因此, 可以将大尺度 Retinex 衰减补偿图像作为基底图像调整整个图像的色感一致性, 并确定一个固定的权重。然后, 比较其他小尺度衰减补偿图像与大尺度衰减补偿图像之间差值的绝对值均值, 通过该值调整该小尺度衰减图像在 AMSR 算法中的权重。对于一个小尺度衰减图像来说, 如果该绝对值均值非常大, 说明该小尺度衰减补偿图像相对于大尺度衰减图像来说含有丰富的细节信息, 那么为了突出该小尺度衰减补偿图像中的细节信息, 增大该小尺度衰减补偿图像在 AMSR 算法中的权重。

AMSR 算法的流程图如图 1 所示, 具体的算法步骤如下:

- 1) 选择 15、80、250 三个尺度对原始图像进行 SSR 衰减补偿得到 R_{15} 、 R_{80} 、 R_{250} 三个图像;
- 2) 设置 R_{250} 的权值 ω_{250} 为 1/3, 这个权值可以根据情况进行一定程度的修改;
- 3) 计算 R_{250} 与 R_{80} 、 R_{15} 差值的绝对值均值作为调整参数计算这两个图像的权值:

$$\omega_{80} = \frac{\text{abs}[\text{mean}(R_{80})]}{\text{abs}[\text{mean}(R_{80})] + \text{abs}[\text{mean}(R_{15})]}(1 - \omega_{250}), \quad (7)$$

$$\omega_{15} = \frac{\text{abs}[\text{mean}(R_{15})]}{\text{abs}[\text{mean}(R_{80})] + \text{abs}[\text{mean}(R_{15})]}(1 - \omega_{250}), \quad (8)$$

式中 ω_{15} 和 ω_{80} 分别为 R_{15} 和 R_{80} 图像对应的权重值, $\text{abs}(\cdot)$ 为绝对值运算, $\text{mean}(\cdot)$ 为均值运算;

4) 根据(6)式加权得到最终的衰减补偿图像。

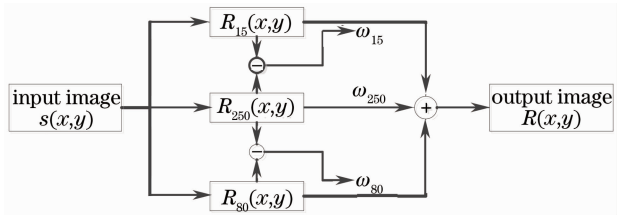


图 1 AMSR 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of AMSR algorithm

5 实验分析

采用扫频 OCT 系统采集数据,光源中心波长为 1325 nm,光谱宽度为 100 nm,系统横向分辨率为 25 μm ,纵向分辨率为 12 μm (空气中)。

为了验证该算法的有效性,采集人体手指指尖部位的 OCT 图像和人体前臂内侧皮肤的 OCT 图像进行实验,实验原理图如图 2 所示。将直方图均衡化(HE)算法增强图像和 MSR 算法增强图像进行对比实验。

图 3 为 HE 算法、MSR 算法和 AMSR 算法对于手指指尖 OCT 原始图像的增强效果对比图。HE 算法对整体图像区域都有明显的增强效果,但是可以看到在深度较大位置的平均灰度值比表层区

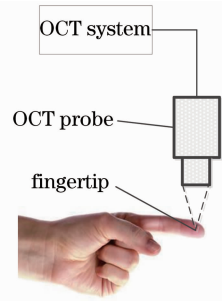


图 2 OCT 实验原理图

Fig. 2 Schematic diagram of OCT experiment

域的平均灰度值低,不能够实现对 OCT 光强衰减的有效补偿,如图 3(b)中矩形 1 所示。MSR 算法和 AMSR 算法对于 OCT 图像来说都有很好的衰减补偿效果,同时局部区域的对比度相对于原始 OCT 图像来说也有明显的提高,更加有利于观察组织内部结构的细节信息,如图 3(c)、(d)中矩形 1 所示。但是,MSR 算法在强边缘部位有很强光晕效果,造成在其附近的特征变得无法辨认,而 AMSR 算法通过调整不同尺度之间的权重则可以很好地解决这个问题,如图 3(c)、(d)中区域 2 中的汗腺。在皮肤组织 OCT 图像的实验中,AMSR 算法同样具有很好的效果,如图 4 所示。可以看出 AMSR 算法使皮肤组织 OCT 图像中深层组织结构信息被有效增强,同时内部细微结构特征的局部对比度也有了明显的提高,如图 4 中区域 1 所示;另外,MSR 算法中的光晕效果造成的灰度值过饱和也同样得到了有效的抑制,如图 4 中区域 2 所示。综上所述,AMSR 算法能够有效地补偿 OCT 成像过程中光强衰减对图像质量的影响,消除了 MSR 算法中光晕效果对图像细节特征的影响;同时明显地增强了局部细节特征,更加有利于观察被测物内部的结构信息。

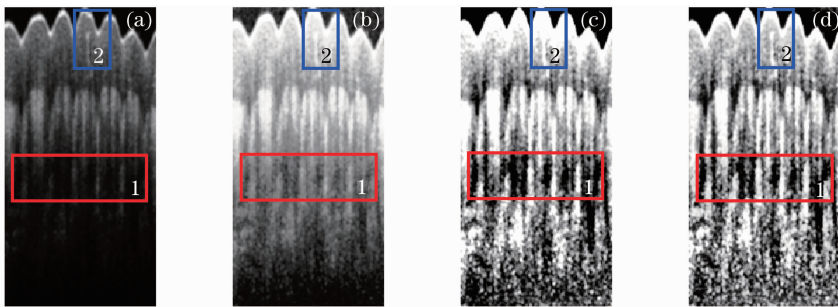


图 3 不同算法对人体手指指尖部位 OCT 图像的增强效果对比,图像大小为 400 pixel \times 152 pixel(实际约为 1256 μm \times 3800 μm)。 (a) 指尖原始 OCT 图像; (b) 直方图均衡化图像; (c) MSR 增强效果图; (d) AMSR 增强效果图

Fig. 3 Comparison of enhanced OCT images of fingertip based on different algorithms, and each image size is 400 pixel \times 152 pixel(about 1256 μm \times 3800 μm). (a) Original OCT image of fingertip; (b) HE image; (c) enhanced image by MSR; (d) enhanced image by AMSR

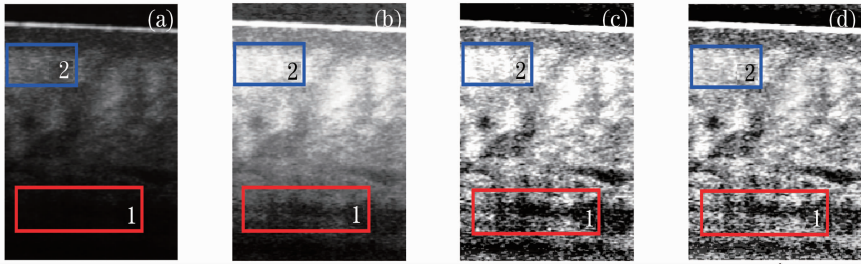


图 4 不同算法对人体皮肤 OCT 图像的增强效果对比,图像大小为 240 pixel×190 pixel(实际约为 1005 μm×4000 μm)。

(a) 皮肤原始 OCT 图像; (b) 直方图均衡化图像; (c) MSR 增强效果图; (d) AMSR 增强效果图

Fig. 4 Comparison of enhanced OCT images of human skin based on different algorithms, and each image size is 400 pixel×190 pixel (about 1005μm×4000μm). (a) Original OCT image of skin; (b) HE image; (c) enhanced image by MSR; (d) enhanced image by AMSR

为了客观、定量地比较几种图像增强算法的效果,采用可视化对比度测度(VCM)作为客观标准来衡量图像的局部对比度^[10]。可视化对比度测度通过计算局部区域均值和方差的乘积获得,可以表示为

$$f_{VCM} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i s_i, \quad (9)$$

式中 i 是局部区域的序号, N 是局部区域的个数, m_i 和 s_i 分别是第 i 个局部区域的均值和方差。可视化对比度测度由于针对局部特征进行测量,因此其值越大说明图像局部的对比度越好,衰减补偿效果也就越好。选择 9×9 图像块作为局部区域,局部区域的选择通过 9×9 图像块在图像中以滑动的方式实现。对于手指指尖 OCT 图像,参与 VCM 计算的局部区域的个数为 45600 个。计算每个局部区域的均值和方差并累加除以局部区域个数得到该图像的 VCM 值。各种增强算法的可视化对比度测度 VCM 结果如表 1 所示。可以看出,几种算法增强图像的 VCM 相对于原始图像的 VCM 都有明显的提高,但是 AMSR 算法相对于其他算法来说增加得最多,VCM 平均增加了 5740; AMSR 算法与 MSR 算法相比也有了明显的提高,VCM 也平均提高了 762。从定量分析来看, AMSR 算法在提高 OCT 图像的局部对比度方面有非常好的效果,同时具有更好的衰减补偿效果。

表 1 不同算法增强图像的 VCM 值

Table 1 VCM values of enhanced images based on different algorithms

| Source image | HE | MSR | AMSR |
|--------------|-----|------|------|
| Fingertip | 789 | 2569 | 6932 |
| Skin | 554 | 2350 | 5891 |

6 结 论

针对 OCT 技术在被测物成像过程中的衰减问题,提出一种自适应 Retinex 算法实现 OCT 图像的有效衰减补偿。该算法采用大尺度 Retinex 算法增强图像与其他尺度 Retinex 算法增强图像之间差值的绝对值均值作为调整参数,实现每个尺度在多尺度 Retinex 算法中权重的自适应调节。从人体手指指尖 OCT 图像和手臂内侧皮肤 OCT 图像的增强效果来看得到了比较满意的效果,为后期的 OCT 诊断应用和进一步的图像分析奠定了良好的基础。

参 考 文 献

- Xi Peng, Liu Yujia, Yao Zhirong, *et al.*. Optical imaging techniques in skin imaging diagnosis[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(2): 0302001.
席 鹏, 刘宇嘉, 姚志荣, 等. 用于皮肤影像诊断的光学成像方法[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0302001.
- Nan Nan, Bu Peng, Guo Xin, *et al.*. Three-dimensional full-range complex Fourier domain optical coherence tomography system for *vivo* imaging of human skin[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0704002.
南 楠, 步 鹏, 郭 昕, 等. 三维全深度复频域光学相干层析成像系统及其对人体皮肤的在体成像[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0704002.
- Xu Peng, He Hong, Ding Zhihua. Research in subsurface morphologies of jades with optical coherence tomography[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0508004.
许 鹏, 何 红, 丁志华. 光学相干层析应用于玉石亚表面结构的研究[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0508004.
- L Thrane, M H Frosz, T M Jørgensen, *et al.*. Extraction of optical scattering parameters and attenuation compensation in optical coherence tomography images of multilayered tissue structures[J]. Opt Lett, 2004, 29(14): 1641-1643.
- A Hojjatoleslami, M R N Avanaki. OCT skin image enhancement through attenuation compensation[J]. Appl Opt, 2012, 51(21): 4927-4935.
- S D Chang, C Flueraru, Y X Mao, *et al.*. Attenuation compensation for optical coherence tomography imaging [J]. Optics Communications, 2009, 282(23): 4503-4507.
- E H Land. An alternative technique for the computation of the designator in the retinex theory of color vision[C]. Proc Natl

- Acad Sci, 1986, 83(10): 3078—3080.
- 8 D J Jobson, Z U Rahman, G A Woodell. Properties and performance of a center/surround retinex[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(3): 451—462.
- 9 Z U Rahman, D J Jobson, G A Woodell. Multi-scale retinex for color image enhancement[C]. International Conference on Image Processing, 1996, 3: 1003—1006.
- 10 Wang Yanchen, Li Shujie, Huang Lianqing. Enhancement of radiography based multiscale Retinex[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(1): 70—76.
王彦臣, 李树杰, 黄廉卿. 基于多尺度 Retinex 的数字 X 光图像增强方法研究[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(1): 70—76.
- 11 Cheng Yaoyu, Wang Yu. The application of enhanced technology of radiographic image based on Retinex[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(10): 1053—1055.
程耀瑜, 王 宇. 基于 Retinex 可变框架的 X 射线图像增强方法研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(10): 1053—1055.
- 12 A Moore, J Allman, R M Goodman. A real-time neural system for color constancy[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1991, 2(2): 237—247.
- 13 I S Jang, T H Lee, H G Ha, *et al.*. Adaptive color enhancement based on multi-scaled Retinex using local contrast of the input image[C]. 2010 International Symposium on Optomechatronic Technologies, 2010. 1—6.

栏目编辑: 韩 峰