

文章编号 1004-924X(2019)10-2241-10

融合 Retinex 框架对电子内镜图像的增强

陈晓冬^{1*}, 席佳祺¹, 汪 毅¹, 蔡怀宇¹, 孙 刚²

(1. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072;
2. 中国人民解放军总医院, 北京 100000)

摘要:针对目前图像增强算法对于电子内镜图像光照不均匀、低照度区域边缘细节不明显以及高噪声等问题的局限性,设计了一种用于电子内镜图像的融合低噪声、均衡光照和细节增强的 Retinex 框架,并根据此框架设计了增强算法。算法首先利用基于位置信息与相邻频率的滤波器得到低噪光照值;为了有效区分噪声与细节信息,设计了一种基于最大后验概率估计(Maximum A Posteriori estimation, MAP)的反射率估计方法,引入光照因子控制概率权重,对于低照度区域反射率平滑项施加约束,并通过最大化其后验概率以应对低照度区域的高噪声问题;为均衡光照、应对人体内黏膜和消化液的散射和吸收导致的图像退化,基于暗通道先验(Dark Channel Prior, DCP)算法设计了反向均衡化模型以得到均衡光照值;为应对低照度区域细节信息不明显问题,利用对比度限制自适应直方图均衡化得到细节增强结果。通过使用均衡光照值补偿增强后的反射率,实现噪声抑制、光照均衡、细节增强提高之间的有效融合。实验结果表明,本算法较于近期的同类算法 NIEIE(Non-uniform Illumination Endoscopic Imaging Enhancement),能够在保持信息熵与峰值信噪比的基础上,增强度提升 23.94%,对于电子内镜图像具有良好的适用性。

关键词:图像增强;光照均衡;噪声滤除;细节增强;内镜图像

中图分类号:TP394.1 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20192710.2241

Enhancement of electronic endoscope image by fusing retinex frame

CHEN Xiao-dong^{1*}, XI Jia-qi¹, WANG Yi¹, CAI Huai-yu¹, SUN Gang²

(1. Key Laboratory of Photoelectric Information, Ministry of Education,
School of Precision Instruments and Optoelectronic Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Chinese PLA General Hospital, Beijing 100000, China)

* Corresponding author, E-mail: xdchen@tju.edu.cn

Abstract: In view of the limitation of current enhancement algorithms for the problems of nonuniform illumination, unobvious edge details, and image noise in electronic endoscope images, a Retinex-based framework for combining low noise, balanced illumination, and detail enhancement of electronic endoscope images was proposed, and an enhancement algorithm was designed according to this framework. The algorithm used an illumination filter to obtain the illumination estimation, with the noise removed. To effectively distinguish noise from detailed information to obtain a more accurate reflectance, first, a reflectance estimation method was designed based on Maximum A Posterior

收稿日期:2019-03-07;修订日期:2019-05-07.

基金项目:“十三五”支撑计划资助项目(No. 2018YFC0116202);“十三五”支撑计划资助项目(No. 2017YFC0109702);
“十三五”支撑计划资助项目(No. 2017YFC0109901)

estimation (MAP). The illumination factor was designed according to the illumination estimation to control the probability weight. The smoothness term of reflectance in a low illumination area was subjected to a strong constraint, and the posterior probability was maximized to cope with noise interference caused by nonuniform illumination. Second, a reverse equalization model was designed according to the Dark Channel Prior (DCP) algorithm to deal with local image degradation caused by nonuniform illumination and by the scattering and absorption of mucosa and digestive juice in the human body. As reflectance containing detailed information pays more attention to contrast, the contrast enhancement result was derived by using contrast-limited adaptive histogram equalization to deal with unobvious edge details. The final enhanced image was obtained by compensating the adjusted illumination back to the reflectance. Through this synthesis, the enhanced image represented a compromise between noise filtering, detail enhancement, and local contrast enhancement. The experimental results show that, compared with the average enhancement degree of the algorithm of Non-uniform Illumination Endoscopic Imaging Enhancement (NIEIE), that of the algorithm proposed in this paper increase by 23.94% by maintaining the information entropy and peak signal-to-noise ratio. Therefore, the proposed algorithm has good applicability for electronic endoscope images.

Key words: image enhancement; illumination equalization; noise removal; detail enhancement; endoscopic images

1 引 言

近年来,医学图像处理倍受关注。由于电子内镜的探测环境为人体呼吸道、消化道、腹腔等管腔状组织内部,腔体具有一定的深度,且人体组织器官存在相互遮挡的情况,而内镜光源有限,因此电子内镜图像中腔体深处与被遮挡处的组织表面无法获得良好的照明,表现为部分图像亮度偏低,整体图像的光照不均匀现象。而图像传感器对光强的感应呈线性分布,感光元件上大部分的电荷单元被用于记录高光区域信息,用于记录低照度区域信息的电荷单元较少,在图像上呈现为低照度区域边缘细节不明显以及高噪声等问题,影响视觉效果和检测诊断率。因此,电子内镜图像亮度均衡、低照度区域边缘细节增强与噪声抑制成为急需处理的问题。目前基于非锐化掩模的算法^[1-2]、基于直方图均衡的算法^[3-5]和基于 Retinex 的算法^[6-10]等增强算法已经被广泛应用于先进成像设备的图像后处理步骤中,以抑制光照不均匀现象对图像的影响。

基于非锐化掩模的算法将原始图像分解成低频和高频分量,分别通过低频和高频处理来增强细节和对比度。但其要求用户调整每个图像的参数,不利于大量图像的集中处理。基于直方图均衡化的算法通过根据原始图像分布函数重新排列

图像的灰度级而获得均衡光照。但其对于灰度级的重新分配并未区分背景与边缘信息,将导致部分边缘信息与背景混叠,因此其针对低照度区域的边缘细节增强能力较弱。Retinex 理论认为到达人眼的光强可被描述为反射率和照明分量的乘积,反射率分量与物体颜色与边缘信息具有很强的相关性,而照明分量决定图像的整体亮度。基于 Retinex 的算法通过处理照明分量抑制非均匀光照的影响,保持反射率分量以保护细节信息,能够同时保持图像边缘信息与自然性,对于电子内镜图像的低照度区域边缘细节不明显问题具有一定的适用性。

基于 Retinex 算法的核心是为了解决两大问题:第一,如何准确分离光照分量和包含细节信息的反射率分量;第二,如何分别处理两者以得到更好的增强效果。经典单尺度 Retinex (Single Scale Retinex, SSR) 和多尺度 Retinex (Multi Scale Retinex, MSR) 算法^[11-12]使用局部高斯滤波器来分离反射和光照,SSR 与 MSR 以及此后一系列利用中心环绕式进行光照估计的改进算法^[13-14]易在边缘附近出现晕圈伪影,导致图像自然度受到严重影响。针对这一问题,Wang^[15]等提出的自然度保持增强算法首次将相邻频率的概念加入光照分量的估计,得到了自然度保持较好的光照信息。但其利用直方图规范化对光照进行后期处理,使光照分量在亮度突变处产生了低对

比度模糊区域,进而导致最终增强结果亮度突变处的细节丢失。而 Fu^[16]等提出基于融合的弱光照图像增强方法,在对光照进行处理时同时考虑亮度均衡与对比度提高,设计了对比度提高因子与亮度提升因子的融合处理方法,在亮度突变处能够得到较好的光照结果。但算法并未考虑图像中可能存在的噪声,无法应对电子内镜图像低照度区域高噪声问题。Rao^[17]等提出分离光照与反射率前利用抗退化模型处理内镜图像以应对其退化问题。算法能够抑制部分噪声信号,但对于包含于反射率的边缘细节信息并未进行处理,无法满足电子内镜图像低照度区域边缘细节增强的要求。因此本文考虑同时将抑制噪声、均衡光照和提高对比度融合入增强算法中,以应对前人算法的不足。

本文设计了一种用于电子内镜图像的融合低噪声、均衡光照和细节增强的 Retinex 框架,并根据此框架设计了增强算法。算法首先利用基于位置信息与相邻频率的滤波器得到低噪光照值;为了有效区分噪声与细节信息,设计了一种基于最大后验概率估计(Maximum A Posteriori estimation, MAP)的反射率估计方法,引入光照因子控制概率权重,对于低照度区域反射率平滑项施加强约束,并通过最大化其后验概率以应对低照度区域的高噪声问题;为均衡光照、应对人体内粘膜和消化液的散射和吸收导致的图像退化,基于暗通道先验(Dark Channel Prior, DCP)算法设计了反向均衡化模型以得到均衡光照值;为应对低照度区域细节信息不明显问题,利用对比度限制自适应直方图均衡化得到细节增强结果。通过使用均衡光照值补偿增强后的反射率,实现噪声抑制、光照均衡、细节增强提高之间的有效融合。

2 电子内镜图像增强设计思路及原理

针对电子内镜图像存在的高噪声、光照不均匀以及低照度区域边缘细节不明显问题,设计了用于电子内镜图像的 Retinex 框架。考虑到反射率与颜色与细节信息有很强的相关性,而光照分量决定了图像的整体亮度水平,将对于整体光照的处理放置于空间上变化较缓慢的光照分量以避免其对细节信息的影响;将对于细节的增强放置于反射率分量,一方面原因在于反射率分量包含大部分图像边缘细节信息,另一方面避免了细节

增强与光照亮度提升的冲突;对于增强结果不需要的噪声信号,通过图像分解将其与光照和反射率分量分离,以减少细节增强和亮度提升可能导致的噪声增强。根据这一思路,本文将期望的低噪声、光照均衡和细节增强的电子内镜图像 $S_{\text{Noise-Detail-Illumination}}$ 建模为亮度均衡的低噪声光照与细节增强的低噪声反射率的乘积。

$$S_{\text{Noise-Detail-Illumination}} = \text{DetailEnhance}(\text{NoiseSuppress}_r(R)) \cdot \text{IlluminationEqualize}(\text{NoiseSuppress}_l(L)), \quad (1)$$

其中:R 为反射率分量,L 为光照分量。

如式(1)所示,该框架包括 3 个处理步骤,分别对应上述 3 个问题:(1)低噪声输出的图像分解,包括低噪声光照估计 NoiseSuppress_l 与低噪声反射率估计 NoiseSuppress_r ;(2)光照均衡 $\text{IlluminationEqualize}$;(3)反射率细节增强 DetailEnhance 。根据这一框架设计了增强算法,如图 1 所示提出算法的流程图及其相应的中间结果,算法细节分别于 2.1、2.2 与 2.3 节进行介绍。

2.1 低噪声输出的图像分解

2.1.1 基于相邻频率与位置关系的低噪声光照估计

对于电子内镜图像光照提出三点假设:第一,RGB 通道具有相同的光照;第二,光照呈现为局部平滑;第三,光照为低噪声图像。基于这三点假设将图像颜色、细节信息和噪声从光照中剔除,得到对于图像环境的粗略评估:

$$L(x, y) = \max_{c \in \{r, g, b\}} I^c(x, y), \quad (1)$$

$$L_e(x, y) = L(x, y) \times LF(x, y), \quad (3)$$

其中: I^c 为观测图像的 c 颜色通道值; L 为到达图像传感器或人眼的光强度,根据第一点假设,其被设置为观测图像 I 的 R、G 和 B 通道的最大值; LF 为由式(4)构成的低噪声光照滤波器, L_e 为滤波产生的光照估计值:

$$LF(x, y) = \frac{1}{W(x, y)} \sum_{(i, j) \in \varphi} H(i, j) \cdot U(i, j) \cdot N(a, b), \quad (4)$$

其中: $W(x, y)$ 用于归一化; H 为剔除中心像素的高斯滤波器; U 为筛选函数, N 为相邻频率函数。

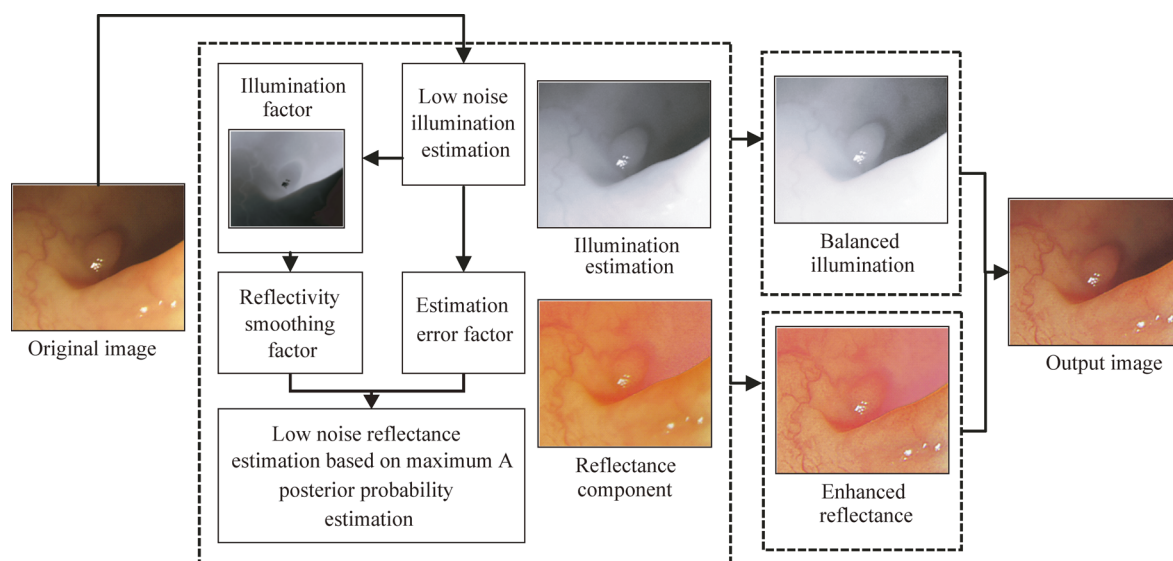


图 1 增强算法框架

Fig. 1 Proposed image enhancement

采用的低噪声光照滤波器 LF 结合像素相邻频率与位置关系,认为图像中任意邻域像素对中心像素的影响,不仅与其距中心像素距离相关,同时与两像素值在图像中为相邻关系的频率相关。高斯滤波器 H 用于表征位置信息,以实现光照局部平滑的假设;相邻频率函数 $N(a, b)$ 表示值为 a (中心像素点)与值为 b (邻域像素点)的像素在图像中出现相邻关系的频率,用于筛选噪声点并控制其参与局部平滑的权重。对于与中心像素相邻频率较高的邻域像素,其存在更具有合理性,因此赋予其高权重。而对于中心像素与邻域像素相邻频率较低的情况,认为其相邻关系具有偶然性,邻域像素或中心像素为噪声点。若邻域像素点为噪声点,相邻频率函数赋予其低权重以降低其对中心点光照的噪声干扰;若中心像素点为噪声点,则其与邻域内像素点的相邻频率皆取低值,此时相邻频率函数对其权重影响较小,剔除中心像素的高斯滤波器同样实现排除了噪声点的功能。此外,判断函数 U 用于筛选亮度高于中心像素的点,将反射率范围控制在 $[0, 1]$ 范围内以保持图像自然度:

$$U(x, y) = \begin{cases} 1, & x \geq y \\ 0, & x < y \end{cases} \quad (5)$$

$$N_{ab}(a, b) = \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n N_a(x, y) \left(\sum_{(i,j) \in \Omega} N_b(i, j) \right), \quad (6)$$

$$N(a, b) = \frac{1}{(2win + 1)} \sum_{b-win}^{b+win} N_{ab}(a, i), \quad (7)$$

其中: N_a, N_b 用于判别图像 a 值点与 b 值点, N_{ab} 输出 a, b 两像素值的相邻次数。 Ω 为八邻域区域, win 为均值窗口宽度, m, n 为图像长、宽度。

由于相邻次数受到像素值离散型的影响,并不能较好的表征相邻频率,因此使用式(7)抑制数据离散化造成的误差增大。窗口值 win 较小时无法弥补离散误差,但随着窗口值的增大,相邻频率函数对噪声的敏感性也随之降低。因此本文利用图像混乱程度评估其对于离散误差和噪声的需求程度。对于混乱程度较低的图像,如平滑的组织表层,其局部亮度较为均匀,只需较小的窗口宽度即可弥补其离散误差;同时此类图像的噪声与非噪声点像素值差异较小,需要较小的窗口宽度以获得更高的噪声敏感程度。相反,对于复杂的混乱程度较高的图像,如管腔状组织,其细节丰富,亮度差异大,则牺牲部分噪声敏感程度以获得更大的窗口宽度应对离散误差:

$$win = \text{round} \frac{E}{2}, \quad (8)$$

其中: round 为取整函数, E 为图像熵。

2.1.2 基于最大后验概率与光照因子的低噪声反射率估计

光反射模型可描述为 $I = R \times L$, 其中 I 为 $[0, 255]$ 范围内的观测图像, L 为 $[0, 255]$ 范围内的光照, R 为 $[0, 1]$ 范围内的反射率。反射率可

由观测图像与光照估计值得出。

2.1.1 节中低噪声光照估计将图像颜色细节信息剔除的同时滤除了噪声信息,因此若根据 $R=I/L$ 直接从估计得到的光照推算反射率,噪声将隐藏于反射率中,而无法被有效地处理。为了解决这一问题,本文将反射率估计模型视为 Bayes 后验分布。假设 2.1.1 节中得到的结果能够正确描述光照信息,那么根据 Bayes 定理可得,“正确估计反射的概率”与“反射先验概率”“反射模型下当前已知观测图像和光照的似然函数”成正比:

$$p(R|I,L) \propto p(I,L|R)p(R), \quad (9)$$

其中: $p(R|I,L)$ 表示后验分布, $p(I,L|R)$ 表示似然函数, $p(R)$ 表示反射率的先验概率。为了获得最大后验概率,需使似然函数与反射先验概率同时取得较大值。

假设似然函数估计误差 $\xi=I/L-R$ 为独立同分布的随机变量,其高斯分布具有零均值和方差 δ_2 :

$$p(I,L|R) = N(\xi|0, \delta_2^2 \mathbf{1}), \quad (10)$$

其中 $\mathbf{1}$ 为同一性矩阵。

关于反射率先验,提出 3 点假设,认为反射率不包含噪声、包含边缘细节且分段连续。即反射率梯度分布用零均值、方差为 δ_2^2 的拉普拉斯分布表示:

$$p(R) = L(\nabla R|0, \delta_2^2 \mathbf{1}), \quad (11)$$

其中 ∇ 为水平和垂直方向上的梯度算子。

高斯分布的最大似然估计解相当于普通最小二乘解,拉普拉斯分布的最大似然估计解相当于最小绝对偏差解^[18]。因此,最大后验概率问题可转化为能量最小化问题:

$$E(R) = \|I/L - R\|_2^2 + \alpha \|\nabla R\|_1, \quad (12)$$

$$l = g(L(x,y)) = \frac{255 - L(x,y)}{255}, \quad (13)$$

其中: $\|\cdot\|_1$ 与 $\|\cdot\|_2$ 表示 L_1 范数、 L_2 范数算子, α 为正则化强度参数。式中第 1 项用于缩小反射率估计与输出值,第 2 项用于正则化以得到光滑反射率。

根据已知观测图像与光照得到的反射率包含噪声,而先验反射率不含噪声,这就导致了反射率难以同时取得先验概率与似然函数的最大值,即式(11)中第 1 项与第 2 项五大同时取得最小值。且

由于图像传感器的动态范围有限,噪声分布集中与低照度区域,因此在低照度区域该问题尤为突出。

为应对这一问题,本文引入光照因子 l 对先验概率与似然函数的权重进行调控以应对低照度区域噪声。式(13)中 g 为单调递减函数,其作用描述为光照因子对于噪声较为明显的低照度区域赋予高权重值,即对式(12)中第 2 项施加强约束以期得到更加光滑的反射率。相对而言,其对由观测图像和光照推算的反射率估计与输出值的约束强度降低,即牺牲估计误差以得到低照度区域的去噪结果。反之对于噪声较低的高照度区域,更关注输出值是否贴近由观测图像和光照推算出的反射率估计值。最终期望得到对于高照度区域展现更多信息,对于低照度区域舍弃噪声的输出结果。

使用切分 Bregman 算法^[19]对式(12)进行能量最小化求解,由于 R 同时出现在两种范数项中,难以直接计算,引入辅助变量 d 代替 L_1 范数项内容以消除其耦合性,即式(12)可表示为:

$$E(R) = \|I/L - R\|_2^2 + \alpha \|d\|_1 + \alpha \lambda \|d - \nabla R \cdot l - b\|_2^2, \quad (14)$$

其中 b 为误差项。

求解式(13)可通过切分 Bregman 算法进行解决,代入切分 Bregman 迭代公式为:

$$(R^{k+1}, d^{k+1}) = \operatorname{argmin} \|d\|_1 + \|I/L - R\|_2^2 + \alpha \lambda \|d - \nabla R \cdot l - b^k\|_2^2, \\ b^{k+1} = b^k + (\nabla R^{k+1}) \cdot l - d^{k+1}. \quad (15)$$

Bregman 算法计算过程可表示如图 2。其中收缩函数 shrink 用于更新变量; ϵ 为一小正数,用于限定终止准则。

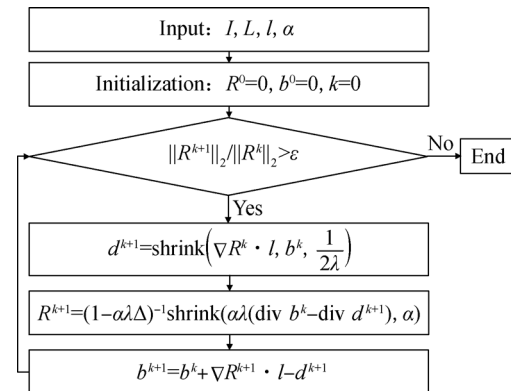


图 2 Bregman 算法计算过程

Fig. 2 Processing of Bregman algorithm

2.2 反向均衡化模型均衡光照

对于电子内镜图像,得到的低噪声的光照存在非均匀的现象,部分区域的亮度较低,需对低照度区域进行亮度提升。其次,由于内镜成像环境为人体内部,其拍摄的图像会受到人体内黏膜和消化液的散射和吸收的影响,造成图像退化。为了解决这两点问题,本文将真实内镜成像场景中由于器官内部管腔状结构导致的非均匀光照和图像退化,模拟为大气散射导致的光衰减。采用基于暗通道先验(DCP)^[20-21]的反向均衡化模型均衡光照。

本文将内镜图像光照的反向暗通道 J_{inDark} 与定义如下:

$$J_{\text{inDark}}(x, y) = \min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{(x, y) \in \Omega} (255 - L_c(x, y))). \quad (16)$$

将器官内部管腔状结构导致的非均匀光照模型模拟为大气散射导致的光衰减,其模型描述为:

$$255 - L_c = (255 - J) t + A(1 - t), \quad (17)$$

其中: J 为均衡内镜图像光照, t 为传输图像, A 为大气光估计值。

根据 DCP 原理,最终的均衡内镜图像光照由下式获得:

$$J(x, y) = 255 - \frac{255 - L_c(x, y) - A(1 - t(x, y))}{\max(t(x, y), t_0)}. \quad (18)$$

2.3 对比度限制自适应直方图均衡化增强反射率细节

为增强图像中的低照度区域,光照均衡处理使图像整体亮度被压缩,局部对比度可能会降低,影响增强结果的细节显示。因此本文基于在增强局部对比度方面具有优势的对比度限制自适应直方图均衡化^[22]设计算法提升反射率对比度以增强细节。

对于 2.1.2 节得到的低噪声反射率,为避免引入色差,取其 Y 通道亮度分量进行分块直方图创建。同时将对对比度限制在一个剪辑点上,以截断每块直方图的峰值。剪切后的像素被重新分配到每个灰度级别。剪切点计算如下:

$$\beta = \frac{M}{N} \left[1 + \frac{\mu}{100} S_{\text{max}} \right], \quad (19)$$

其中: M , N 分别为分块的像素数量与动态范围, S_{max} 为最大允许斜率, μ 为剪辑因子,本文将其取为光照均值。针对低照度情况,图像反射率对比度较低,剪辑因子接近 1,剪切点增大,实现较高的增强程度。对于整体照度较高的图像,其细节信息损失较少,为保持图像自然度赋予其较低的

增强水平。

通过剪切直方图的累积分布函数 cdf 得到映射函数用于重新映射图像块的灰度级别:

$$T(l) = cdf(l) \times R_{\text{ymax}}, \quad (20)$$

其中: $T(l)$ 为映射函数, l 为像素灰度级, R_{ymax} 为反射率 Y 通道图像块中的最大像素值。基于每个图像块中重分布直方图的累积分布函数,得到不同重映射函数。为防止遮挡伪影,从周围块的映射函数中进行双线性插值得到重拍后的像素 R'_y 。

经过反射率细节增强后,更新反射率 y 通道,其更新结果显示为高对比度低噪声反射率。使用 2.2 节输出的均衡低噪声光照补偿其更新结果,得到融合低噪声、均衡亮度和高对比度的最终增强图像。

3 实验结果及分析

给出实验结果来验证所提出算法的性能,实验环境为 Matlab R 2016b,计算机硬件配置为 Inter Core i3-2100 CPU, 4 GB 内存。

本文对存在光照不均匀问题的电子内镜图像进行了测试。将所提出的方法与近几年光照不均图像增强方法进行比较,如李^[23]等提出的亮通道先验低照度增强算法、Rao^[17]等提出的基于抗退化模型的内镜图像增强、以及经典 NPEA (Naturalness Preserved Enhancement Algorithm)^[15] 算法进行比较,其结果显示于图 3 中(彩图见期刊电子版)。

图 3 显示了非均匀光照下电子内镜图像及其增强结果。所选取的电子内镜图像中亮背景和暗前景存在于同一场景,且由于实际图像动态范围大于图像传感器能够捕获得动态范围,图像黑暗区域中的存在细节难以清晰辨识的现象。

从图 3 中图 A 与图 D 中的“血管”显示结果可以看出,李算法虽能均衡图像亮度,获得视觉上较为自然地增强结果,但对于类似“血管”的纹理细节信息无法提供有效地增强。这是因为李算法专注于低照度亮度的提升以及图像自然度的保持,而并未关注纹理信息的增强。与此同时,Rao 算法与 NPEA 算法对于纹理细节能够得到较好结果,如图中血管基本可辨认。但其效果仍不够突出,图 A 右下角照度较高区域的纹理信息模糊。此外,观察图 A 右上角低照度区域,由于

Rao 算法与 NPEA 算法并未对噪声进行滤除,因此经过亮度调整后,其遗留噪声随亮度增强,造成非自然的图像效果。类似的噪声情况还存在与图 C 低照度区域边缘,NPEA 算法结果呈现明显的白边伪像。图 C 显示为局部低照度图像,相比李算法与 NPEA 算法获得自然度保持的较好结果,本文算法与 Rao 算法更加关注电子内镜图像是否能呈现更多细节,因此更加适于获取管腔状结构深层次的图像信息。图 B 与图 E 为光照不均

匀问题较轻的图像,观察到李算法无法满足细节观察要求。而 NPEA 算法在图 E 中造成了青色斑块状图像失真问题,这是由于 NPEA 算法中对于光照的滤波过于离散化,对于光照与颜色较为单一的图像无法发挥其优势。

相比而言,本文提出的算法通过混合低噪声、均匀光照和高对比度三大标准,在主观上得到优于 Rao 算法的细节增强结果,优于李算法的光照均衡结果和优于 NPEA 算法的噪声处理结果。

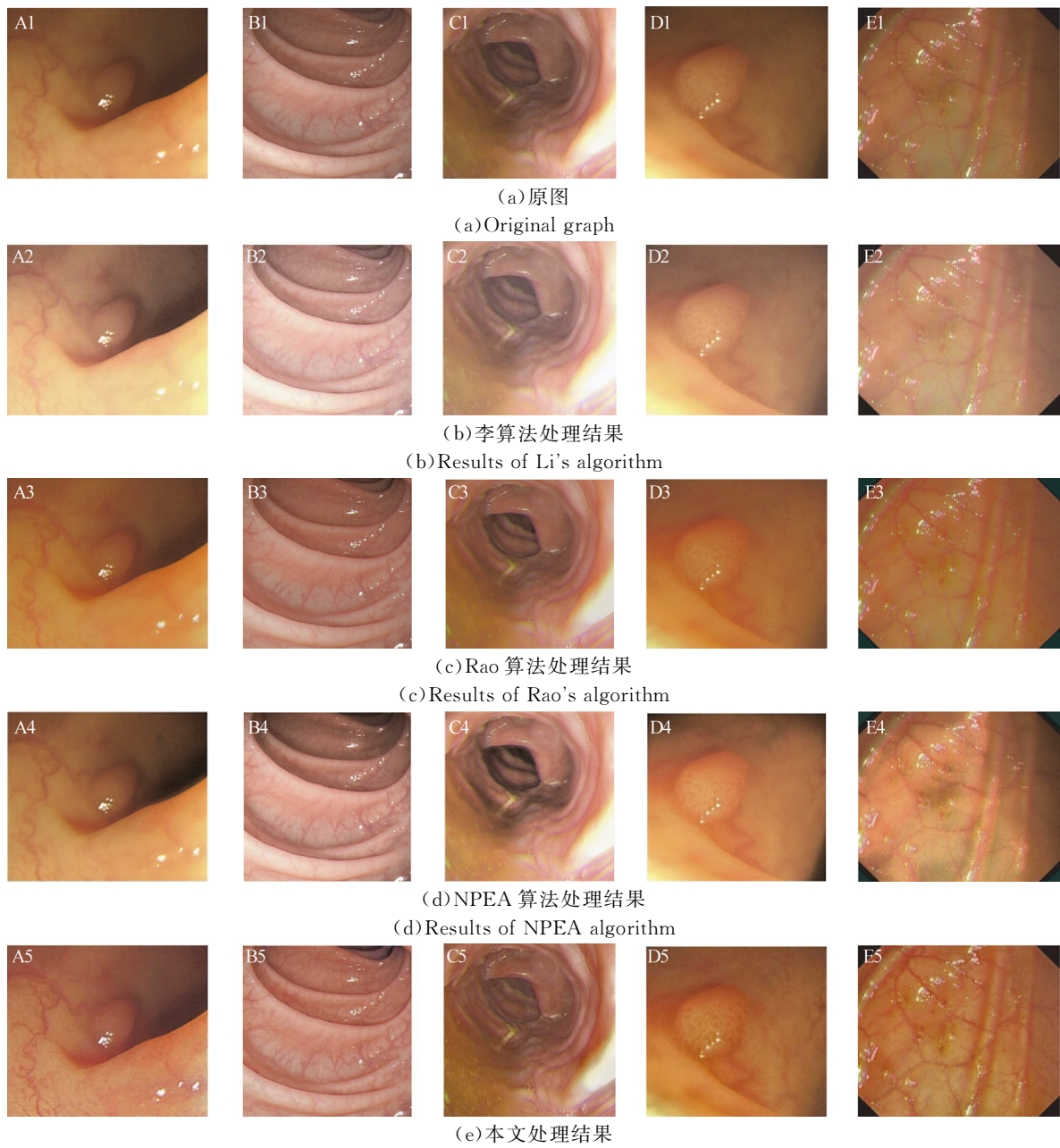


图 3 图像 A,B,C,D,E 处理结果

Fig. 3 Results for image A,B,C,D,E

针对电子内镜图像对于图像质量和细节信息的需求,以低噪声、均匀光照和高对比度为标准评估图像。本文选择熵、峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)、增强度(Measure of Enhancement, EME)^[5]3种图像评价因子进行图像信息量、信噪比、对比度的客观评价。

图像熵用于反映增强结果的信息量,其值越大,反映出越丰富的图像细节。但熵增的成因包含细节增加和噪声增加,因此通过峰值信噪比(PSNR)评估增强图像的劣化水平。峰值信噪比越高,增强图像噪声增加的概率越小。增强度(EME)对图像增强的效果进行评估。增强度越高,则图像局部对比度越高,表征更加明显的增强效果。

对选取的图3中图A~图E所示的5幅图像进行客观参数评价,评价结果显示为表1~表3。

表1 图像熵对比

Tab. 1 Performance comparison of entropy

图像	李	Rao	NPEA	Proposed
A	6.557 5	6.517 8	6.613 5	6.764 4
B	6.763 2	6.723 2	7.170 8	7.163 1
C	6.758 1	6.871 3	6.845 1	6.811 8
D	6.560 7	5.867 5	6.150 7	6.137 9
E	6.136 8	5.772 7	6.049 1	6.059 3
平均	6.555 2	6.350 5	6.565 8	6.587 3

表2 图像峰值信噪比对比

Tab. 2 Performance comparison of PSNR

图像	李	Rao	NPEA	Proposed
A	14.605 2	22.088 7	22.128 1	23.212 9
B	13.420 2	26.526 8	18.652 8	24.192 2
C	15.768 5	22.228 1	18.219 6	23.215 2
D	16.086 4	21.521 7	16.453 2	22.879 5
E	15.222 7	24.464 4	18.246 2	23.342 6
平均	15.020 6	23.365 9	18.739 9	23.368 4

表3 图像增强度对比

Tab. 3 Performance comparison of EME

图像	李	Rao	NPEA	Proposed
A	2.934 8	3.582 2	3.677 9	4.342 9
B	5.069 0	6.831 2	7.347 4	7.843 5
C	6.255 5	10.509 6	10.509 6	12.935 5
D	1.872 8	2.523 2	2.523 2	3.627 3
E	3.951 6	7.769 2	7.769 2	9.939 3
平均	4.016 7	6.243 0	6.365 4	7.737 7

分析表中数据,对于图像信息量参数,即表1数据的比较结果,4种算法得到的参数差距较小,即本算法与李算法、Rao算法、NPEA算法对于图像信息量的恢复效果相似。结合表2中峰值信噪比数据结果,可观察到本算法与Rao算法的峰值信噪比参数优于另两种算法。这是由于电子内镜图像低照度区域包含噪声较多,而NPEA算法使用对数域直方图规范化处理光照时并未考虑噪声,李算法采用的光照补偿同样会在一定程度上增强噪声。相较而言,本算法通过最大后验概率估计产生低噪声输出,对于恢复图像信息中噪声比例的控制占有优势,能够更大程度的恢复图像细节。而Rao算法中使用的抗退化模型对于低照度噪声也存在一定的抑制作用,获得了较高的峰值信噪比数据。但其与李算法、NPEA算法并未过多关注图像对比度的提升,因此在表3展示的增强度参数结果中不占优势。表3数据表明了本算法对于图像对比度提高优于其他3种算法,即本算法更关注于增强细节信息的视觉效果。相比之下,本文算法结果能够在图像信息量、信噪比、对比度三个方面取得较好结果,更适于亮度不均匀电子内镜图像的增强处理。

4 结 论

本文提出的融合低噪声、均衡光照和细节增强的Retinex框架以及算法在电子内镜图像增强

技术上做出了以下 3 点工作。首先,均衡光照以尽可能恢复低照度区域信息,展示光照影响下隐藏的深层次结构。第二,以低噪声输出结果减少视觉伪像对器官结构判断的影响。第三,为了提高诊断率,更加关注细节对比度,增强其视觉效果。实验结果表明,与李算法、NPEA 算法相比,

本算法能够在均衡光照的同时恢复更多的细节信息,具有良好的视觉效果;相比于同样针对电子内镜图像的 Rao^[17]算法,本文算法处理结果在保持信息熵与峰值信噪比的基础上,平均增强度提升 23.94%。因此,对于亮度不均匀电子内镜图像具有良好的适用性。

参考文献:

- [1] ZHANG K, YUAN B, WANG L. An image enhancement technique using nonlinear transfer function and unsharp masking in multispectral endoscope [J]. *Proceedings of the Spie*, 2017, 245:1024504.
- [2] KANSAL S, PURWAR S, TRIPATHI R K. Image contrast enhancement using unsharp masking and histogram equalization [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2018, 77(20):26919-26938.
- [3] 冯清枝, 王丹. 基于 LIP 模型和 CLAHE 的低照度图像增强算法 [J]. *光电技术应用*, 2018, 33(5).
FENG Q ZH, WANG D. A novel algorithm for low illumination image enhancement based on LIP and CLAHE [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2018, 33(5). (in Chinese)
- [4] YONG W, TING L, YONGSHENG Q. Image enhancement algorithm research based on the archives monitoring under low illumination [C]. *IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments*. IEEE, 2016.
- [5] KONG T, ISA N. Enhancer-based contrast enhancement technique for non-uniform illumination and low-contrast images [J]. *Multimedia Tools & Applications*, 2017, 76(12):14305-14326.
- [6] PARK S, YU S, MOON B, *et al.*. Low-light image enhancement using variational optimization-based retinex model [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2017, 63(2):178-184.
- [7] PARK S, YU S, KIM M, *et al.*. Dual autoencoder network for retinex-based low-light image enhancement [J]. *IEEE Access*, 2018:1-1.
- [8] KWOK N, SHI H, WU H, *et al.*. Logarithmic profile mapping multi-scale Retinex for restoration of low illumination images [C]. *International Conference on Graphic & Image Processing. Ninth International Conference on Graphic and Image Processing (ICGIP 2017)*, 2018.
- [9] 赵宏宇, 肖创柏, 禹晶, 等. 马尔科夫随机场模型下的 Retinex 夜间彩色图像增强 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(4):1048-1055.
ZHAO H Y, XIAO CH B, YU J, *et al.*. A Retinex algorithm for night color image enhancement by MRF [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4):1048-1055. (in Chinese)
- [10] LI M, LIU J, YANG W, *et al.*. Structure-revealing low-light image enhancement via robust retinex model [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2018:1-1.
- [11] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODDELL G A. Properties and performance of a center/surround retinex [J]. *IEEE Transactions on Image Processing A Publication of the IEEE Signal Processing Society*, 1997, 6(3):451-462.
- [12] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODDELL G A. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(7):965-976.
- [13] CHEN S, BEGHADADI A. Natural rendering of color image based on retinex [C]. *Image Processing (ICIP), 2009 16th IEEE International Conference on*. IEEE, 2009.
- [14] KIMMEL R, ELAD M, SHAKED D, *et al.*. A variational framework for retinex [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2003, 52(1):7-23.
- [15] WANG S, ZHENG J, HU H M, *et al.*. Naturalness preserved enhancement algorithm for non-uniform illumination images [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(9):3538-3548.
- [16] FU X, ZENG D, HUANG Y, *et al.*. A fusion-based enhancing method for weakly illuminated images [J]. *Signal Processing*, 2016;S0165168416300949.
- [17] RAO Z, XU T, LUO J, *et al.*. Non-uniform illumination endoscopic imaging enhancement via anti-degraded model and L1L2-based variational retinex [J]. *EURASIP Journal on Wireless Communica-*

- tions and Networking, 2017, 2017(1):205.
- [18] CHU Y J, MAK C M. A new QR decomposition-based RLS algorithm using the split Bregman method for L1-regularized problems [J]. *Signal Processing*, 2016, 128:303-308.
- [19] MA W, OSHER S. A TV Bregman iterative model of Retinex theory [J]. *Inverse Problems and Imaging (IPD)*, 2017, 6(4):697-708.
- [20] 刘海波, 杨杰, 吴正平, 等. 改进的基于雾气理论的视频去雾 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(7).
LIU H B, YANG J, WU ZH P, *et al.*. Improved video defogging based on fog theory [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(7). (in Chinese)
- [21] HE K, SUN J, TANG X. Single image haze removal using dark channel prior. [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2011, 33(12):2341-2353.
- [22] CHANG Y, JUNG C, KE P, *et al.*. Automatic contrast limited adaptive histogram equalization with dual gamma correction [J]. *IEEE Access*, 2018(99):1-1.
- [23] 李赓飞, 李桂菊, 韩广良, 等. 亮通道先验 Retinex 对低照度图像的光照补偿 [J]. *光学精密工程*, 2018, 26(5): 1191-1200.
LI G F, LI G J, HAN G L, *et al.*. Illumination compensation using Retinex model based on bright channel prior [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(5): 1191-1200. (in Chinese)

作者简介:



陈晓冬(1975—),男,浙江人,教授,博士生导师,1996年、2002年于天津大学分别获得学士、博士学位,主要从事光电成像与检测技术方向的研究。E-mail: xdchen@tju.edu.cn



席佳祺(1995—),女,河南人,硕士研究生,2017年于天津大学获得学士学位,主要从事电子内镜图像处理系统的研究。E-mail: xijiaqi@tju.edu.cn