

文章编号:1001-9081(2014)10-2996-04

doi:10.11772/j.issn.1001-9081.2014.10.2996

## 改进的带色彩恢复的多尺度 Retinex 雾天图像增强算法

李垚峰, 何小海\*, 吴小强

(四川大学电子信息学院, 成都 610064)

(\*通信作者电子邮箱 nic5602@scu.edu.cn)

**摘要:**针对带色彩恢复的多尺度 Retinex (MSRCR) 算法不能有效地去除远景处的雾及灰度假设所带来的灰化问题提出了一种新的方法。新的方法对原雾天图像及其取反图像分别进行 MSRCR 算法处理;然后对处理后的取反图像再进行取反操作并和直接进行 MSRCR 算法处理的图像进行线性加权叠加;同时在 MSRCR 处理过程中把提取出来的反射分量与像素的原始亮度进行线性叠加,并计算均值和方差来自适应决定对比度的拉伸程度;最后统一拉伸到显示设备。实验结果表明,所提算法能取得较好的去雾效果,处理后的图像的标准差、平均亮度、信息熵、平方梯度等评价价值均比原算法有所提高。所提算法方法简单、易于实现,对于实时视频去雾具有一定的意义。

**关键词:**雾天图像;灰度世界;线性加权;均值和方差;对比度拉伸

中图分类号: TP751.1 文献标志码:A

### Improved enhancement algorithm of fog image based on multi-scale Retinex with color restoration

LI Yaofeng, HE Xiaohai\*, WU Xiaoqiang

(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610064, China)

**Abstract:** An improved method for Multi-Scale Retinex with Color Restoration (MSRCR) algorithm was proposed, to remove the fog at the far prospect and solve gray hypothesis problem. First, original fog image was inverted. Then, MSRCR algorithm was used on it. The inverted image was to be inverted again and then was linearly superposed with the result which was processed by MSRCR algorithm directly. At the same time, the reflection component which was got during the process of the extraction was linearly superposed with the original luminance, and the mean and variance were calculated to decide the contrast stretching degree adaptively, finally, it was uniformly stretched to the display device. The experimental results show that the proposed algorithm can get a better effect of removing the fog. Evaluation values of the processed image, including standard difference, average brightness, information entropy, and squared gradient, are improved than the original algorithm. It is easy to implement and has important significance for real-time video to remove fog.

**Key words:** fog image; gray-world; linear weighting; mean and variance; contrast stretching

## 0 引言

现实生活中常因雾霾造成拍摄的图像质量低下,不仅给人们的出行带来诸多不便,而且对类似监控、导航以及家用拍摄的图片造成严重影响。雾天图像的信息退化严重造成图像细节信息不能凸显,容易导致人眼视觉疲劳及图像后期处理难度的加大。因此探索能增强雾天图像细节的去雾算法,具有十分重要的应用意义。

图像增强的目的就是针对降质的图像,突出其中有用信息,并削弱无用的信息。目前常用的雾天图像增强方法有基于直方图均衡化的方法、基于暗原色先验知识的方法及基于 Retinex 理论的方法等。自从 20 世纪 80 年代美国宇航局的研究机构采用基于 Retinex 理论的算法对太空图片进行增强处理并获取良好的效果后,一些改进的 Retinex 算法不断被应用于不同的场景。90 年代,Jobson 等<sup>[1]</sup> 基于同态滤波提出了单尺度 Retinex (Single Scale Retinex, SSR) 算法,但不能兼顾

动态范围压缩及色调重现,且会出现光晕现象。为了克服 SSR 算法的不足,Rahman 等<sup>[2]</sup> 提出了多尺度 Retinex (Multi-Scale Retinex, MSR) 算法,但是 MSR 色彩失真较大。随后,Rahman 等<sup>[2]</sup> 又提出了带色彩恢复的多尺度 Retinex (Multi-Scale Retinex with Color Restoration, MSRCR) 算法,实现了对 MSR 算法处理结果的色彩补偿,但是该方法有太多的参数需要根据具体要处理的图片来设置,这增加了算法的复杂度,不利于投入实用。

以上各种改进的 Retinex 算法都是把雾天图像看成同一景深来进行全局处理,没有考虑到实际中雾天图像的景深不同,图像的退化程度不同这一事实,所以对远景深处雾的去除效果不好而且不能凸显远景处的景物细节信息。MSRCR 算法对图像作了一个假设即图像的三个通道所占的比例接近三分之一,也就是灰度假设,这造成处理的结果图像偏暗。针对这些问题,本文提出了一种改进的算法。改进的算法先对原雾天图像进行取反操作;然后进行 MSRCR 算法处理,处理过

收稿日期:2014-04-16;修回日期:2014-05-21。

基金项目:国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合基金资助项目(11176018)。

作者简介:李垚峰(1989-),男,河南信阳人,硕士研究生,主要研究方向:图像处理、模式识别; 何小海(1964-),男,四川成都人,教授,博士,主要研究方向:图像处理与信息系统、机器视觉与智能系统; 吴小强(1971-),男,四川成都人,高级工程师,硕士,主要研究方向:图像处理,数据库系统、嵌入式开发。

后的图像再进行取反;最后把处理的结果与直接进行 MSRCR 算法处理的结果进行线性加权。在 MSRCR 算法处理过程中,为了调整图像亮暗区域的差异、改善图像的灰化现象,本文把提取出来的反射分量与像素的原始亮度进行叠加并计算均值和方差来自适应决定图像对比度的拉伸程度,最后统一拉伸到显示设备。实验结果表明,经过本算法处理的雾天图片远景处图像细节清晰,处理后的图像色彩自然明亮,而且方法简单、易于实现。

## 1 Retinex 理论

### 1.1 Retinex 的理论基础

Retinex 理论认为物体的颜色不是由反射光的强度而是由不同波长的光的反射能力来确定的并且光照不均不会影响物体的颜色一致性<sup>[3]</sup>,大气照射光和物体反射光之间相互作用而形成图像。其中:大气照射光对应图像的低频信息,决定了图像的整体光照情况;而物体反射光对应图像的高频信息,反映了图像的本质信息。所以,基于 Retinex 理论的算法本质上就是通过估计并去除图像的照度分量来获取反映图像本质信息的反射分量,以还原物体的本来面貌<sup>[4]</sup>。

Retinex 模型认为理想的图像  $I(x, y)$  可以表示为:

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

其中:照度分量  $L(x, y)$  与景物无关,确定了图像的动态范围;反射分量  $R(x, y)$  则与照明无关,对应图像中包含细节纹理的高频信息,决定了图像的固有性质<sup>[5]</sup>。因为人眼感知亮度具有非线性的特征,可对式(1)两边分别取对数运算把乘法运算转化为加法运算:

$$\ln(I(x, y)) = \ln(L(x, y)) + \ln(R(x, y)) \quad (2)$$

这不仅减小了运算量,更符合人眼感知物体的非线性特性。

### 1.2 Retinex 实现方法

虽然基本原理相同,但是基于 Retinex 理论的算法由于实现方法不同而出现了多种不同的基于 Retinex 的算法。

SSR 算法可以表示为:

$$R_i(x, y) = \ln I_i(x, y) - \ln[G(x, y) * I_i(x, y)] \quad (3)$$

其中: $R_i(x, y)$  为第  $i$  个单颜色通道图像的输出; $I_i(x, y)$  为原始图像的亮度分量;“\*”在此表示卷积运算; $G(x, y)$  为高斯环绕函数。

环绕函数形式为:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

其中: $\sigma$  是高斯函数的标准差,又称为尺度常数。尺度常数  $\sigma$  决定了 Retinex 算法的增强效果:当  $\sigma$  取值较大时,估计的入射分量较平滑,增强后图像的色彩保真能力好,但是细节信息不突出;反之,当  $\sigma$  取值较小时,估计的入射分量比较崎岖,能较好地完成动态范围的压缩,增强后的图像细节突出,但色彩保真效果较差<sup>[6-8]</sup>。因此,SSR 算法不能同时满足动态范围压缩和颜色保真的效果<sup>[9]</sup>。

为了弥补 SSR 算法的不足,将不同尺度的 SSR 处理结果进行加权平均求和,这就是 MSR 算法,MSR 算法实现图像动态范围压缩和颜色保真的折中,算法如下:

$$R_{\text{MSR}_i} = \sum_{n=1}^N \omega_n \cdot \{\ln I_i(x, y) - \ln[G_n(x, y) * I_i(x, y)]\} \quad (5)$$

其中: $R_{\text{MSR}_i}$  为 MSR 在第  $i$  个单颜色通道的输出; $G_n(x, y)$  为不

同的尺度常数下的环绕函数; $N$  为尺度个数,考虑到计算的效率实际应用中  $N$  一般取 3 个尺度,一个小尺度( $\sigma < 50$ ),一个中尺度( $50 \leq \sigma < 100$ ),一个大尺度( $\sigma \geq 100$ ); $\omega_n$  为加权值, $\omega_n$  要满足  $\sum_{n=1}^N \omega_n = 1$ ,实际应用中  $\omega_n$  经典的取值为等权重取值。

MSR 算法对某些图片处理的结果色彩失真严重。为了解决色彩失真问题,研究者们进一步提出了 MSRCR 算法,算法表示如下:

$$R_{\text{MSRCR}_i}(x, y) = C_i(x, y) \cdot R_{\text{MSR}_i}(x, y) \quad (6)$$

其中  $C_i(x, y)$  为用来调节三个颜色通道颜色比例的色彩恢复函数,可以表示为:

$$C_i(x, y) = \beta \cdot \ln \left[ \alpha \cdot \frac{I_i(x, y)}{\sum_{i=1}^S I_i(x, y)} \right] \quad (7)$$

$S$  在 RGB 颜色空间中取值为 3。 $\beta$  为增益常数, $\alpha$  为非线性强度控制因子。由式(7)可以看到,MSRCR 算法在实现时已经作了一个假设:图像的 3 个通道所占的比例接近 1/3,这就是灰度假设。这种假设造成输出的图像偏暗,对比度不明显。后来的研究者们又对 MSRCR 算法进行了改进,他们对处理后的输出图像作了一个类似直方图截取的处理:

$$R_{\text{MSRCR}_i}(x, y) = G[\{C_i(x, y)\} \ln I_i(x, y) - \ln[G_n(x, y) * I_i(x, y)]\} + b] \quad (8)$$

$G$  和  $b$  是增益和偏移常量, $G$  是为了增加全局的对比度以获取更好的处理结果,偏移量  $b$  以调节处理结果。 $G$  和  $b$  的值需要根据处理的图像来调整设定。在文献[10]中这些常量参数的取值被设定为:  $\beta = 46$ ,  $\alpha = 125$ ,  $b = -30$ ,  $G = 192$ 。

## 2 改进的 MSRCR 去雾算法

基于 Retinex 理论的算法对图像的较暗区域有明显的增强效果,而对于雾天图像,被雾覆盖的地方图像的亮度较大,图像的细节信息被遮掩。可以把雾天图像进行取反操作,这样图像较亮的有雾遮掩的地方就会变暗,然后再进行 MSRCR 算法处理,从而可以增强变暗区域即原来的有雾区域的亮度和细节,然后再进行取反得到最终处理的图像,这样有雾区域的亮度被降低,而被雾遮掩的细节信息却可以得到增强。为了使近景和远景处理的结果有一个平衡,对取反的雾天图像和原雾天图像分别进行 MSRCR 算法处理后把二者的处理结果进行线性加权叠加,进行线性加权的公式如下:

$$R''_{\text{MSRCR}}(x, y) = \varepsilon \cdot R'_{\text{MSRCR}}(x, y) + (1 - \varepsilon) \cdot R_{\text{MSRCR}}(x, y) \quad (9)$$

其中: $R''_{\text{MSRCR}}(x, y)$  为最终的输出图像; $R'_{\text{MSRCR}}(x, y)$  为取反处理再取反后的输出图像; $R_{\text{MSRCR}}(x, y)$  为直接处理的图像; $\varepsilon$  为线性加权系数,一般的雾天图像远景区的雾浓度更大而近景区的雾浓度相对要稀薄一些,所以  $\varepsilon$  取值要适当大一些,在本文中经过实验  $\varepsilon$  取值 0.95 时,图片的处理结果最好。

经过上述过程处理后,虽然图像远景区的去雾效果更好一些,图像的细节明显,但是图片的灰化现象并没有多少改善。由以上对 MSRCR 算法的分析可以看出,这是因为算法中作了灰度假设所导致,而且人眼的视觉效果不好。Jobson 等<sup>[10]</sup> 在他们的工作中提出一个基于直方图截取的方法来进行调整。基于直方图截取的方法如图 1 所示,该方法上切点和下切点的合理选取对图像的最终处理效果起着重要的作用,原算法通过手工设置下切点概率和上切点概率来获得相应的

值。但是由于不同雾天图像的直方图不同,需要进行多次调整,以获得好的处理结果,这就造成了该方法不能自适应地适用各种图像。

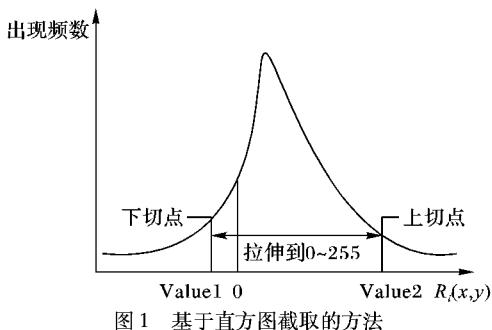


图 1 基于直方图截取的方法

Hulbert<sup>[11]</sup>通过计算单颜色通道像素值的最大值和最小值来进行对比度拉伸,但是这种方法没有考虑到图像的内容,效果并不非常有效。

实际应用中发现雾天图像的灰度分布基本符合正态分布,而对一幅图像而言:图像的均值可以反映图像的亮度信息;图像的方差可以反映图像的细节信息;图像的原始亮度信息可以较好保持图像的整体色调。基于此,本文把图像的原始亮度信息和反射分量进行线性加权叠加并使用图像的均值和方差来改善图像的亮度。

首先以式(10)获得 RGB 彩色图像的亮度信息  $I(x,y)$ :

$$I(x,y) = (R(x,y) + G(x,y) + B(x,y))/3 \quad (10)$$

其中: $R(x,y)$ 、 $G(x,y)$ 、 $B(x,y)$  分别为  $(x,y)$  处像素的红色、绿色、蓝色分量。再把亮度信息在对数域中和获得的反射分量进行线性叠加以平衡图像的亮区域和暗区域的差别,叠加公式如下:

$$R'(x,y) = \tau \cdot R(x,y) + (1 - \tau) \cdot \ln I(x,y) \quad (11)$$

其中: $R(x,y)$  为获得的反射分量; $\tau$  为一个加权系数, $\tau$  越大图像的细节越明显同时噪声也增加,实验中  $\tau$  取值 0.5,二者能获得较好的平衡。

假设某个单通道图像限定拉伸的灰度范围为  $[L, H]$ ,计算所得的单通道图像的均值为  $Mean$ ,方差为  $Var$ 。确定要拉伸的灰度范围如式(12)~(13)所示:

$$L = Mean - K * \sqrt{Var} \quad (12)$$

$$H = Mean + K * \sqrt{Var} \quad (13)$$

式(12)、(13)中  $K$  为动态调整因子,本文中设定  $K$  为一

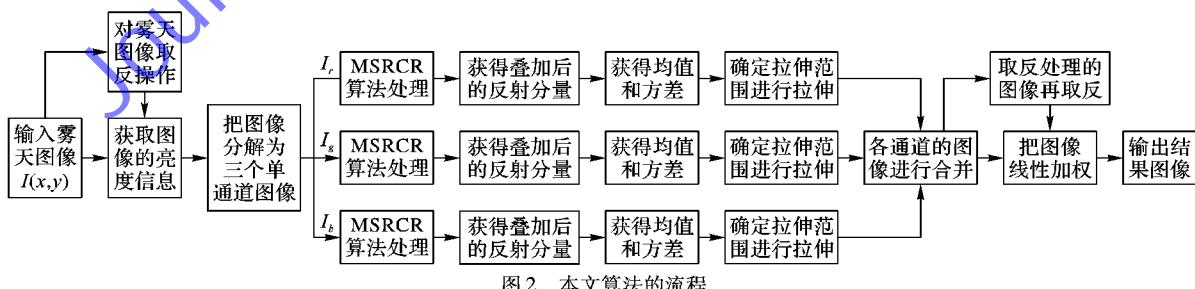


图 2 本文算法的流程

### 3 实验结果和分析

为了验证本文算法的有效性并和原算法处理的结果进行对比,本文选取不同浓度的雾天图像进行处理,处理结果如图 3~5 所示。

个常数。当  $K$  越小图像的对比度越大,但是图像的信息损失较严重,实验中结合正态分布的特性发现当  $K$  取值 1.96 ~ 2.58 时处理的雾天图像能获得很好的效果,图像也较清晰。

经过式(12)、(13)确定要拉伸的灰度范围之后通过下式进行线性映射:

$$R_{out}(x,y) = \frac{255 * (R'(x,y) - L)}{H - L} \quad (14)$$

其中: $R_{out}(x,y)$  为拉伸后的输出值,如果拉伸后的输出值大于 255,则取值为 255;若小于 0,则取值为 0。 $R'(x,y)$  为经过式(11)线性叠加后的反射分量值。

经过以上分析,本文算法的流程如图 2 所示。

本文改进的 MSRCR 雾天图像增强算法具体实现步骤如下。

- 1) 输入雾天图像并将雾天图像进行取反操作。
- 2) 依据式(9)分别获得雾天图像和取反图像的亮度信息  $I(x,y)$  并取对数。
- 3) 将雾天图像和取反图像分别分解为  $R$ 、 $G$ 、 $B$  三个单通道图像。

4) 对每个单通道图像分别作以下处理:

- ① 对图像取对数运算转换到对数域;
- ② 将图像与三个不同尺度的高斯模板进行快速高斯卷积运算,以获得估计的照度分量;
- ③ 用原图像分别减去不同尺度下估计的照度分量获得图像的反射分量;
- ④ 将获得的反射分量采用不同的权值进行加权平均,本文的权值取等权值计算;
- ⑤ 把获得的反射分量和亮度信息采用式(11)进行叠加获得叠加后的反射分量  $R'(x,y)$ ;
- ⑥ 获得每一个单通道图像反射分量的均值  $Mean$  和方差  $Var$ ;
- ⑦ 使用计算式(12)、(13)依据图像的均值和方差自适应确定每个颜色通道的对比对拉伸的灰度范围;
- ⑧ 对 5) 获得的输出结果利用式(14)进行线性拉伸,同时,若拉伸后的输出值大于 255,则取值为 255;若小于 0,则取值为 0。
- 5) 将各个颜色通道的结果进行合并获得雾天图像和取反图像的处理结果。
- 6) 将取反图像的处理结果再取反并与雾天图像的处理结果采用式(9)进行线性加权求和,结果作为最终的输出。

从图 3 中可以看到,原图图像退化严重,基本上看不到雾遮掩下的目标景物,经过原 MSRCR 算法处理过后图片效果有所改善,但是图片偏右边缘的地方从视觉上来看是黑的,看不到图片的景物信息,经过本算法处理过后虽然远景处的雾并没有完全去掉,但处理后的图像细节更明显,色彩更好,

右边边缘已能看到景物信息。图 4 为中雾图像的处理结果,原图像由于雾的影响远景区的车辆和树看不到,MSRCR 算法处理过后,图像的对比度增强,远处的车辆和树有所体现,但图像偏暗,经过本算法处理过后图像的对比度清晰度都很好,图像亮度增加并且远景区车辆和树的细节体现更好。图 5 为薄雾情况下的处理结果,薄雾基本完全去除,本文算法处理后图像更清晰,更明亮。从图 3~5 处理的结果看出:本文算法处理过后的图像比原算法处理的图像亮度增加,色彩保真度好,更适合人眼的视觉观察,对不同浓度的雾都可以获得不错的处理效果。

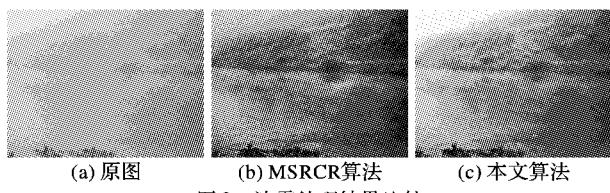


图 3 浓雾处理结果比较



图 4 中雾处理结果比较



图 5 薄雾处理结果比较

本文算法和自适应直方图均衡化及暗原色先验知识处理的结果进行了对比,结果如图 6 所示。

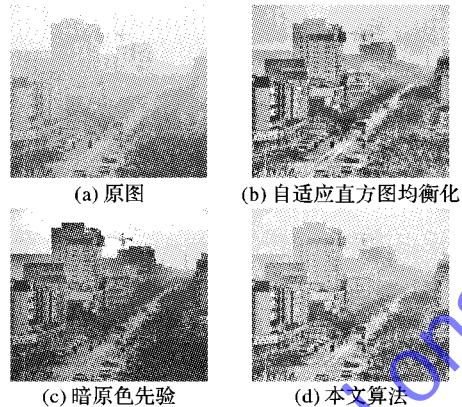


图 6 本文算法与自适应直方图和暗原色先验比较

从处理的效果上来看基于暗原色先验的算法和本文算法处理的结果最好,雾都有去除,细节更突出;本文算法处理的结果更明亮,暗原色先验远景处理得更好,自适应直方图某些部分色彩已经失真。

对上述处理的图像进一步进行客观分析,利用图像评价函数分别计算了图像的标准差、亮度均值、信息熵及平方梯度。图像的标准差反映了图像的细节信息,标准差越大图像的细节越突出;亮度均值反映了图像的亮度大小,亮度均值越大图像的亮度越高;信息熵反映了图像像素包含信息的多少,信息熵越大图像包含越多的信息,图像的质量越好;平方梯度反映了图像细节的平均变化率,表现了图像的清晰程度,平方梯度越大说明图像越清晰。表 1 给出图 3~5 的评价函数比较。

表 1 图像评价函数比较

图像	标准差			亮度均值			信息熵			平方梯度		
	原图	MSRCR 算法	本文 算法	原图	MSRCR 算法	本文 算法	原图	MSRCR 算法	本文 算法	原图	MSRCR 算法	本文 算法
图 3	25.5169	39.5030	50.8387	147.8684	90.6929	128.3445	6.6713	7.2102	7.4466	8.3102	101.8174	117.0480
图 4	25.2050	44.9512	59.9442	174.0697	82.5029	129.4259	6.5658	7.1588	7.6876	79.9671	525.6036	607.8613
图 5	16.4565	47.4894	43.7082	139.2723	85.4201	119.2583	5.9321	7.1288	7.2105	23.5859	224.2473	326.3640

从表 1 中看到 MSRCR 算法和本文算法处理过后的图像的标准差、信息熵及平方梯度均比原图像的相应值要大,说明处理过后的图像在细节、信息量方面比原图像要好,另外基本上本文算法比 MSRCR 算法相应的值要大,这说明本文算法比 MSRCR 算法更好。从表 2 中看到处理过后的图像亮度均值均比原图像要低,但是本文算法处理过后的数据和原图像的亮度均值比较接近,这说明本文算法对原算法的图像偏暗问题有了改进。

图 6 的结果评价函数对比如表 2 所示。

表 2 本文算法与自适应直方图和暗原色先验比较

算法	标准差	亮度均值	熵	平方梯度
未用任何算法(原图)	53.5604	173.2753	7.1141	251.9313
自适应直方图算法	63.3447	144.4094	7.6345	1618.0454
暗原色先验	75.4169	122.5198	6.9706	658.6567
本文算法	62.1998	162.4539	7.6683	1238.8774

从表 2 中看到本文算法和自适应直方图算法处理的结果

相应指标均比原图要高,自适应直方图处理结果的标准差和平方梯度比本文算法要高,但是本文算法处理结果的熵和亮度均值要比自适应直方图的大,说明本文算法处理结果的亮度视觉效果更好。本文算法的亮度均值、熵、平方梯度比暗原色先验的要大,但暗原色先验的标准差比本文算法及自适应直方图的均要高得多。

#### 4 结语

本文在 MSRCR 算法的基础上,针对原算法不能很好处理远景区的雾及灰度假设所带来的图像偏暗这一问题,提出了一种改进的算法。该方法把雾天图像处理结果和取反图像的处理结果进行线性加权并在处理过程中将反射分量和原图像亮度信息进行叠加,通过计算各个颜色通道的均值和方差来自适应确定每一个颜色通道的拉伸范围。通过对多组不同条件下雾天图像的处理效果进行对比并结合客观的图像质量评价数据,表明本算法能取得较好的去雾效果,而且图像明亮色彩自然,人眼视觉效果更好。  
(下转第 3023 页)

## 4 结语

本文提出并实现了一种的高速的血管内超声成像数据采集成像系统。结合 USB3.0 高速数据传输、配置方便的优势,设计实现了快速 IVUS 成像软件。软件端对数压缩、坐标变换等数据处理算法仿真效果明显。经实验验证,成像速度快而稳定、相关算法处理效果良好、提供医学信息准确。但是软件仍然有不足,例如功能比较简单,图像自动化分析等功能有待增加,而且离散的图像不利于全面的分析血管病变情况。接下来计划进行图像边缘检测,特征识别等工作;然后利用二维的血管超声图像进行三维重建,重现血管在三维空间中的结构,从而可随意比较相邻的图像,了解血管中斑块弥散性情况。

### 参考文献:

- [1] ROSS R. Atherosclerosis — an inflammatory disease [ J ]. Mechanisms of Disease, 1999, 340(2): 115 – 126.
- [2] BLANKENHORN D H, AZEN S P, KRAMSCH D M, et al. Coronary angiographic changes with lovastatin therapy: the Monitored Atherosclerosis Regression Study (MARS) [ J ]. Annals of Internal Medicine, 1993, 119(10): 969 – 976.
- [3] KASTELEIN J J, de GROOT E. Ultrasound imaging techniques for the evaluation of cardiovascular therapies [ J ]. European Heart Journal, 2008, 29(7): 849 – 858.
- [4] NICHOLLS S J, SIPAHI I, SCHOENHAGEN P, et al. Application of intravascular in anti-atherosclerotic drug development [ J ]. Nature Review Drug Discovery, 2006, 5(6): 485 – 492.
- [5] HARTMANN M, HUISMAN J, BOSE D, et al. Serial intravascular ultrasound assessment of changes in coronary atherosclerotic plaque dimensions and composition: an update [ J ]. European Journal of Echocardiography, 2011, 12(4): 313 – 321.
- [6] ZOU X, XU J. High speed and convenient collecting and processing system [ J ]. Instrument Technique and Sensor, 2008, 2(3): 23 – 25. (邹小芳,许剑.便携式高速数据采集处理系统[J].仪表技术与传感器,2008,2(3):23 – 25.)
- [7] SUN K, LI Z, QIN B, et al. A method of data collecting and transmission in Eternet: China, ZL200710158652.8 [ P ]. 2009-06-10. (孙凯,李智刚,秦宝成,等.一种以太网数据采集传输方法:中国, ZL200710158652.8[P]. 2009-06-10.)
- [8] HU B, CHEN X, WANG C, et al. High-speed data acquisition card and data acquisition method: China, ZL200910311862.5 [ P ]. 2010-12-01. (胡炳梁,陈小来,王彩铃,等.一种高速数据采集卡及数据采集方法:中国, ZL200910311862.5[P]. 2010-12-01.)
- [9] QIU W, CHEN Y, LI X, et al. An open system for intravascular ultrasound imaging [ J ]. IEEE Transactions on Ultrasonics, 2012, 59(10): 5 – 8.
- [10] XIAO S. Ultrasonic RF data acquisition and transmission system [ D ]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012. (肖舜金.基于 USB3.0 超声射频信号的采集与传输系统[D].成都:电子科技大学,2012.)
- [11] LU Z, DING H, SUN W, et al. Application of CORDIC algorithm in digital scan converter [ J ]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2005, 24(6): 781 – 783. (卢智远,丁华,孙文权,等. CORDIC 算法在 B 超数字扫描变换器中的应用[J].中国生物医学工程学报,2005,24(6):781 – 783.)
- [12] GAO S. Medical imaging system [ M ]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. (高尚凯.医学成像系统[M].北京:清华大学出版,2000: 102 – 106.)

(上接第 2999 页)

### 参考文献:

- [1] JOBSON D J, RAHMAN Z U, WOODELL G A. Properties and performance of a center/surround Retinex [ J ]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(3): 451 – 462.
- [2] RAHMAN Z U, JOBSON D J, WOODELL G A. Retinex processing for automatic image enhancement [ J ]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 13(1): 100 – 110.
- [3] FANG S, GUO C, WU P, et al. Color image enhancement algorithm based on multiscale Retinex theory [ J ]. Journal of Jishou University: Natural Sciences Edition, 2009, 30(4): 37 – 40. (房少梅,郭昌洪,吴沛,等.基于多尺度 Retinex 理论的彩色图像增强算法[J].吉首大学学报:自然科学版,2009,30(4):37 – 40.)
- [4] ZHANG X. Image enhancement based on human visual characteristics theory and application research [ D ]. Hefei: Hefei University of Technology, 2011. (张新龙.基于人类视觉特性的图像增强理论及应用研究[D].合肥:合肥工业大学,2011.)
- [5] WANG D, FAN J, LIU Y. A fog monitoring video image enhancement processing algorithm [ J ]. Journal of Xi'an University of Post and Telecommunications, 2012, 17(5): 20 – 24. (王殿伟,范九伦,刘颖.一种雾天监控视频图像增强处理算法[J].西安邮电学院学报,2012,17(5):20 – 24.)
- [6] WANG R, ZHU J, YANG W, et al. Local multiscale Retinex algorithm based on division of illumination [ J ]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(5): 1181 – 1186. (汪荣贵,朱静,杨万挺,等.基于照度

分割的局部多尺度 Retinex 算法 [ J ]. 电子学报, 2010, 38(5): 1181 – 1186.)

- [7] CHU Z, WANG R, FANG S. Wavelet domain image contrast enhancement method based on Retinex theory [ J ]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(15): 175 – 179. (储昭辉,汪荣贵,方帅.基于 Retinex 理论的小波域雾天图像增强方法[J].计算机工程与应用,2011,47(15):175 – 179.)
- [8] CHENG F, DU X, MA L, et al. Low illumination image enhancement based on the Retinex [ J ]. Television Technology, 2013, 37(15): 4 – 6. (程芳瑾,杜晓骏,马丽,等.基于 Retinex 的低照度图像增强[J].电视技术,2013,37(15):4 – 6.)
- [9] ZHANG Y. Image enhancement based on the exponential transform and MSR uneven illumination [ J ]. Computer Knowledge and Technology, 2012, 8(8): 5456 – 5458. (张亚飞.基于幂次变换和 MSR 的光照不均图像增强[J].电脑知识与技术,2012,8(8): 5456 – 5458.)
- [10] JOBSON D J, RAHMAN Z U, WOODELL 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.
- [11] HURLBERT A. Formal connections between lightness algorithms [ J ]. Journal of the Optical Society of America A, 1986, 3(10): 1684 – 1693.