

doi: 10.3788/lop47.041001

基于 Contourlet 变换和多尺度 Retinex 的水下图像增强算法

石丹 李庆武 范新南 霍冠英

(河海大学计算机及信息工程学院, 江苏 常州 213022)

摘要 针对水下图像对比度低、边缘模糊、噪声大等特点, 提出一种基于非下采样 Contourlet 变换和多尺度 Retinex 的水下图像增强算法。将水下图像进行多尺度多方向的非下采样 Contourlet 变换; 利用多尺度 Retinex 算法调整低频系数, 提高图像整体对比度; 在各带通方向子带上估计噪声, 抑制模值小于阈值的系数, 改进神经网络中的 Sigmoid 函数用于调节模值大于阈值的系数; 经非下采样 Contourlet 逆变换得到增强图像。与几种传统增强算法相比, 本算法处理的图像达到了抑制噪声、改善图像对比度、突出目标轮廓的目的, 具有较高的对比度评估值。

关键词 图像处理; 图像增强; 非下采样 Contourlet 变换; 水下图像; 多尺度 Retinex; Sigmoid 函数

中图分类号 TN911.73 OCIS 100.2980 100.3008 文献标识码 A

Underwater Image Enhancement Algorithm Based on Contourlet Transform and Multi-Scale Retinex

Shi Dan Li Qingwu Fan Xinnan Huo Guanying

(College of Computer and Information Engineering, Hohai University, Changzhou, Jiangsu 213022, China)

Abstract Considering the low contrast, fuzzy edge and strong noise of underwater images, an underwater image enhancement algorithm based on nonsubsampling Contourlet transform (NSCT) and multi-scale retinex is proposed. The underwater image is decomposed by nonsubsampling Contourlet transform. Then multi-scale Retinex (MSR) is used to enhance the image's global contrast in the low frequency subband, and an improved Sigmoid function is used to process the coefficients at each scale in the directional bandpass subbands respectively, which suppresses small coefficients and enhances large coefficients by threshold denoising method. Finally, the enhanced coefficients are reconstructed to obtain enhanced image. Compared with the other traditional methods, the approach reduces the noise of original images, improves the contrast of the image, enhances object's contour and achieves higher quantitative contrast assessment indicator.

Key words image processing; image enhancement; nonsubsampling Contourlet transform; underwater image; multi-scale Retinex; Sigmoid function

1 引言

由于水体的能见度低, 加上水中悬浮物对光波的吸收和散射效应以及水流对摄像头的影 响, 使得水下图像亮度分布不均匀, 冗余信息匮乏, 具有噪声大、对比度低、边缘模糊、纹理弱等缺陷。1977 年, Edwin H. Land^[1]首次提出一种人眼感知亮度和色度的视觉模型——Retinex 理论。根据视觉感知特性, 人眼的光接收体可分为锥状体和杆状体两类。锥状体能辨认图像的细节, 但在低照度下不起作用, 杆状体在低

收稿日期: 2009-08-09; 收到修改稿日期: 2009-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(60972101)、江苏省社会发展科技项目(BS2007058)、疏浚技术教育部工程研究中心开放基金(HDCN08002)资助课题。

作者简介: 石丹(1985—), 女, 硕士研究生, 主要从事数字图像处理方面的研究。E-mail: shidan-96@163.com

导师简介: 李庆武(1964—), 男, 教授, 主要从事数字图像处理方面的研究。E-mail: liqw@hhuc.edu.cn (通信联系人)

照度下起作用,但不能感受图像的细节。因此,在太高或太低的照度下,增强细节意义不大。多尺度 Retinex 理论的出现实现了在不同照度下增强图像的细节,有利于处理光照不均匀的水下图像。一种理想的图像增强技术应该既能增强图像的局部细节,又能改善图像的整体对比度,同时还能有效抑制噪声。在空域对水下图像进行多尺度 Retinex 增强显然不能满足以上要求。以小波变换为代表的多分辨分析方法在增强细节的同时能够有效地抑制图像噪声,且增强区域及增强目标易于控制^[2]。但是由一维小波变换张成的二维可分离小波仅可捕捉图像水平、垂直及对角三个方向的信息,在图像细节描述上不能达到最优。

2002 年 Donoho 等^[3,4]提出的具有各向异性的 Contourlet 变换,克服了小波的缺陷,但是由于下采样过程的存在,基于 Contourlet 变换的图像增强结果会产生伪 Gibbs 失真。A.L.Cunha 等^[5-8]对其进行改进,提出的非下采样 Contourlet(NSCT)是一种多分辨、多方向、平移不变的超完备变换,具有更强的细节保护能力。本文在非下采样 Contourlet 域中研究了一种基于多尺度 Retinex 理论的水下图像增强算法,取得了良好的效果。

2 非下采样 Contourlet 变换

Contourlet 变换滤波器组结构由拉普拉斯塔式滤波器(LP)和方向滤波器(DFB)两部分组成。为了保持 Contourlet 变换的频带分割特性,并使其具有平移不变性,NSCT 去掉了 Contourlet 两级变换中的下采样过程,构造了相应的非下采样滤波器,其结构如图 1 所示。首先由非下采样塔式滤波器(NSP)将其分解为高频和低频子带,然后由非下采样方向滤波器(NSDFB)将高频子带分解为若干个方向。NSCT 对应的滤波带具有更好的频域选择性和规则性,能够得到更好的子带分解。理想的频带分解图如图 2 所示。

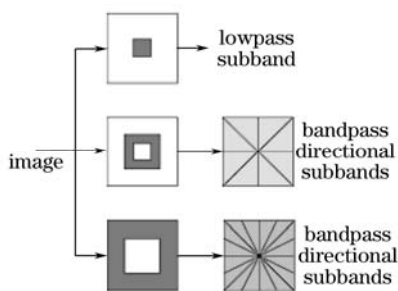


图1 非下采样 Contourlet 滤波器组结构图
Fig.1 NSFB structure of NSCT

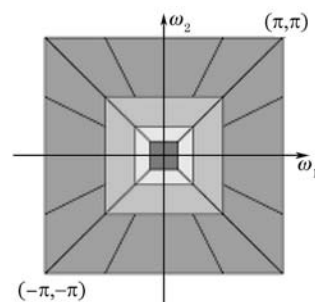


图2 非下采样 Contourlet 变换的频域分解
Fig.2 Frequency decomposition of NSCT

3 NSCT 域图像增强算法

3.1 Retinex 理论

与 Contourlet 变换相同,NSCT 域高频信息反映图像的细节,模值较大的系数集中在边缘附近且与边缘方向一致的子带中,仅对高频子带进行增强不能改善图像整体对比度。因此,反映图像整体信息的低频子带在增强处理中起着不容忽视的作用。本文采用多尺度 Retinex (MSR)理论^[1,9]对低频子带进行增强,它利用了人眼的色感一致性对图像进行处理。对于灰度图像,色感一致性体现了在不同亮度情况下分辨物体灰度级(亮度)的能力,能够对不同照度下的细节都有增强作用,

$$R(x, y) = \sum_{n=1}^N w_n \{ \log I(x, y) - \log [\mathcal{F}(x, y) \otimes I(x, y)] \}, \quad (1)$$

式中 $R(x, y)$ 为输出数据, w_n 为权重,且满足 $\sum w_n = 1$, $I(x, y)$ 为图像数据, \otimes 为卷积运算符, 高斯函数

$$\mathcal{F}(x, y) = k \cdot \exp \left[-\frac{(x^2 + y^2)}{c^2} \right], \quad (2)$$

k 必须满足 $\iint \mathcal{F}(x, y) dx dy = 1$, c 控制高斯曲面的形状,其数目代表尺度数目。

3.2 改进的 Sigmoid 函数

在 NSCT 域中, 噪声和平滑部分通常对应的是高频子带幅值较小的系数, 而边缘部分对应的是大系数。对灰度图像进行对比度增强处理, 关键在于增强图像的边缘高频信息, 抑制噪声的放大。因此, 根据系数的模值来调节提升幅度能够取得良好的增强效果。神经网络中的 Sigmoid 函数(S 函数)是一个非线性函数, 其输出可取 $(-1, 1)$ 开区间内的连续值, 函数方程为

$$y(x) = \frac{2}{1 + \exp(-2x)} - 1, \quad (3)$$

该函数曲线呈近似 S 形, 能够抑制值较小的 x , 拉升值较大的 x , 符合在变换域进行增强的要求。

考虑到非下采样 Contourlet 分解后的系数有正有负, 负系数在图像重构中同样起着很重要的作用, 其模值直接影响重构图像的效果, 不能忽略或置零。因此将 S 函数做一定改进, 构造出可以分别对正负系数进行 S 形调节的新函数, 方程为

$$y(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left\{ \frac{2}{1 + \exp[-4(kx - a)]} - 1 + b \right\}, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ \frac{1}{2} \left\{ \frac{2}{1 + \exp[-4(ka + a)]} - 1 - b \right\}, & x < 0 \end{cases} \quad (4)$$

改进的 S 函数能抑制小系数的模值, 为了更有效地去除噪声, 采用阈值法处理高频子带系数。由于系数中大部分噪声处于最细子带, 因此, 在最细子带中采用经典中值估计公式^[10,11]对方差 σ 进行估计比较准确, 则阈值

$$T = \begin{cases} 3\sigma\sqrt{\sigma_{j,k}}, & j=1,2,\dots,J-1 \\ \rho 3\sigma\sqrt{\sigma_{j,k}}, & j=J \end{cases} \quad (5)$$

式中 $\sigma_{j,k}$ 为蒙特卡罗法估计的第 j 尺度、第 k 方向子带的噪声方差, ρ 为微调因子, J 为分解层数。

3.3 算法步骤

该算法对非下采样 Contourlet 变换的高低频系数分别进行处理, 算法流程如图 3 所示。具体步骤如下:

- 1) 对水下图像进行非下采样 Contourlet 变换, 滤波器选用 “maxflat” 和 “dmaxflat7”, 得到变换域的系数矩阵;
- 2) 低频子带采用 MSR 算法进行整体对比度拉升;
- 3) 根据最细子带系数估计阈值, 通常 $k \approx a/T$, 构造改进的 S 函数;
- 4) 采用改进的 S 函数对高频子带系数的模值进行调节, 得到新的系数矩阵;
- 5) 由处理后的系数进行非下采样 Contourlet 逆变换(INSCT)得到增强后的图像。

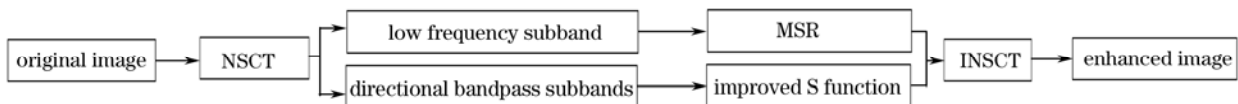


图 3 算法流程图

Fig.3 Flow chart of algorithm

4 实验结果与分析

以水下鱼群和探测沉船的潜水员图像为例进行实验, 分别将本算法与直方图均衡和空域 MSR 算法进行对比。第一组是水下鱼群图像实验, 如图 4 所示, 其中(a1)为原图, (b1), (c1), (d1)分别为直方图均衡、空域 MSR 增强及本文算法增强结果, (a2)~(d2)分别为(a1)~(d1)的直方图。从直方图 5(a2)可以看出, 原图灰度集中在一个很窄的范围内, 整体对比度低, 且噪声严重。按照本算法进行增强, 低频部分 MSR 选用三个尺度, c 分别取 27, 76, 108, 权重分别为 1/3, 1/3 和 1/3, 高频子带根据噪声程度构造 a , b , k 分别

为 2, 1, 10 的 S 函数进行模值调节, 实验结果见图 4(d1)。比较发现, 图 4(b1)在增强图像的同时, 噪声也有明显的增强, 图 4(c1)提升了图像的整体亮度, 但目标和背景的对亮度没有得到很好改善, 本文算法抑制了噪声, 提高了图像对比度, 突出了目标。

第二组是探测沉船的潜水员图像, 如图 5 所示。由于深海水域光照不足, 图 5(a3)整体偏暗, 存在较大噪声。同样采用三尺度的 MSR 处理低频系数, 高频子带进行 S 函数拉伸。实验表明, 图 5(b3)将对亮度拉到了最大, 但是噪声也被放大了很多, 图像整体视觉效果很差, 图 5(c3)提高了图像亮度, 对比度改善却不多, 本文算法在提高对比度的同时抑制了噪声, 增强了边缘和轮廓信息。

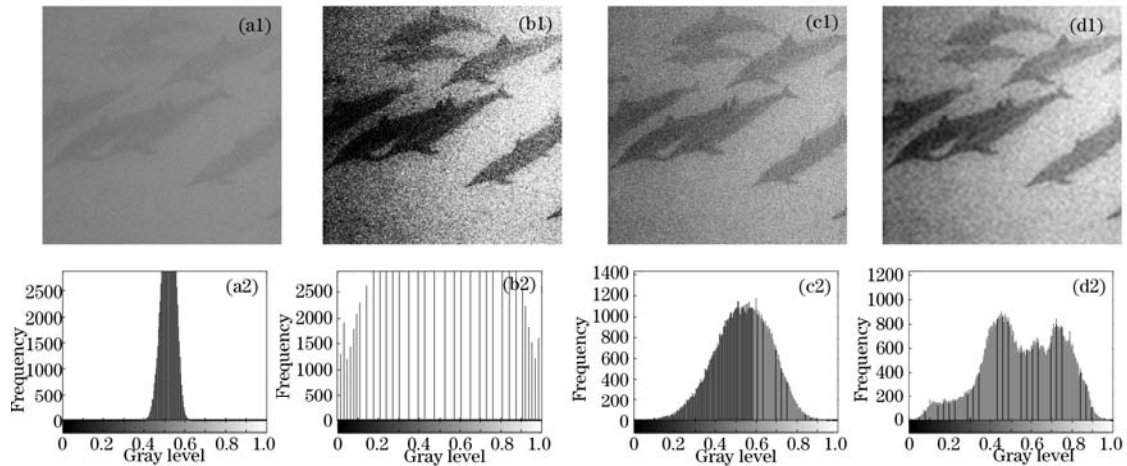


图4 水下鱼群图像增强。(a1)原图; (b1) 直方图均衡化; (c1) 多尺度Retinex增强; (d1) 非下采样Contourlet变换增强法; (a2)~(d2)分别为(a1)~(d1)的直方图

Fig.4 “Fish” image enhancement. (a1) original image; (b1) histogram equalization; (c1) MSR enhancement; (d1) NSCT enhancement; (a2)~(d2) histograms of (a1)~(d1)

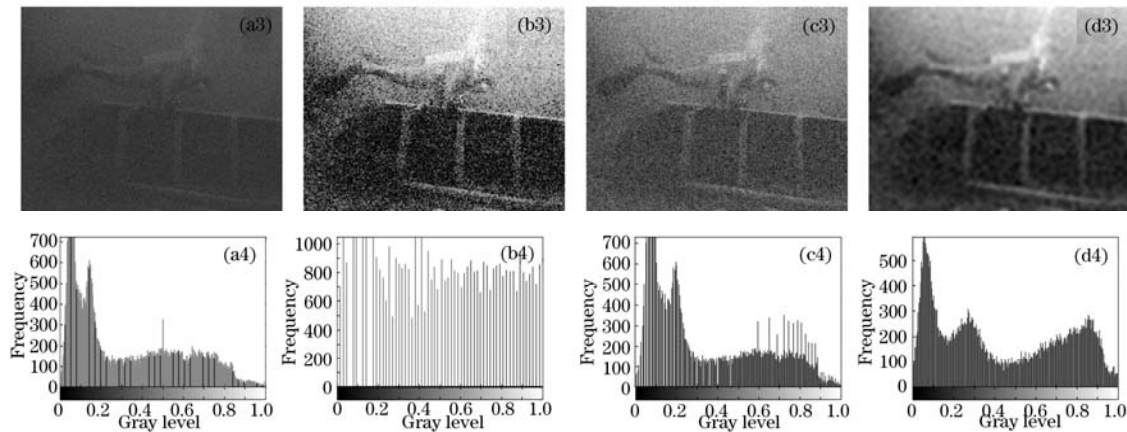


图5 潜水员图像增强。(a3)原图; (b3) 直方图均衡化; (c3) 多尺度Retinex增强; (d3) 非下采样Contourlet变换增强法; (a4)~(d4)分别为(a3)~(d3)的直方图

Fig.5 “Diver” image enhancement. (a3) original image; (b3) histogram equalization; (c3) MSR enhancement; (d3) NSCT enhancement; (a4)~(d4) histograms of (a3)~(d3)

为进一步说明实验效果, 选择对比度指标 C 和标准差 S 对增强结果进行客观评价。 C 能在一定程度上反映图像对比度的大小, 而 S 则能反映图像亮度的大小, 二者均未衡量算法对图像的降噪效果^[9-11],

$$C = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N f'^2(m,n) - \left[\frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N f'(m,n) \right]^2, \quad S = \sqrt{\frac{1}{MN-1} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [f'(m,n) - \bar{f}]^2}, \quad (6)$$

式中 f' 为增强处理后的图像, \bar{f} 为 f' 的均值, M 和 N 分别为图像的行列数。表 1 为两组实验的客观评价。分析表中数据发现, 本文算法的客观评价高于空域 MSR 算法, 而低于直方图均衡法(HE), 这与主观分析结果一致, 即直方图均衡能实现对比度的最大拉伸, 但综合考虑对比度改善程度和图像降噪效果, 本文算法更优。

表 1 水下鱼群与潜水员图像实验的客观评价
Table 1 Objective evaluations of fish and diver image enhancement

		HE	MSR	NSCT
Fish	C	0.0855	0.0173	0.0373
	S	0.2925	0.1355	0.1933
Diver	C	0.0860	0.0256	0.0537
	S	0.2933	0.1600	0.2319

5 结 论

从人眼感知特性出发, 利用非下采样 Contourlet 变换的各向异性和平移不变性, 研究了一种基于非下采样 Contourlet 变换和 Retinex 的水下图像增强算法。作为一种多分辨分析方法, Contourlet 变换能够在增强图像细节的同时有效抑制噪声, 具有直方图均衡无法比拟的优势, 但是它对图像的亮度改变不大, 对于光照不足或光照不均匀的水下图像达不到理想的增强效果, 所以本文用 MSR 处理分解的低频系数, 再由改进的 S 函数对高频系数进行非线性拉伸。实验表明, 该算法达到了改善水下图像对比度、降低噪声、突出目标轮廓的目的。

参 考 文 献

- 1 Edwin H. Land. The Retinex theory of color vision [J]. *Sci. Am.*, 1977, **237**(6): 108~128
- 2 T. J. Brown. An adaptive strategy for wavelet based image enhancement[C]. Proceedings of Irish Machine Vision and Image Processing Conference, 2000. 67~81
- 3 M. N. Donoho, M. Vetterli. Contourlets: A directional multiresolution image representation [C]. Rochester: Proc. of IEEE ICIP, 2002. 357~360
- 4 M. N. Donoho, M. Vetterli. Contourlets, Beyond Wavelets[M]. New York: Academic Press, 2002. 1~23
- 5 Arthur L. da Cunha, Jianping Zhou. The nonsubsampling contourlet transform: theory, design, and applications[J]. *IEEE Trans. Image Process.*, 2006, **15**(10): 3089~3101
- 6 Baolong Guo, Qiang Zhang, Ye Hou. Region-based fusion of infrared and visible images using nonsubsampling contourlet transform [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **10**(6): 338~341
- 7 Zhang Qiang, Guo Baolong. Remote sensing image fusion based on the nonsubsampling contourlet transform[J]. *Acta Optica Sinica*. 2008, **28**(1): 74~80
张 强, 郭宝龙. 基于非采样 Contourlet 变换的遥感图像融合算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 74~80
- 8 Liang Dong, Yin Bing, Yu Mei *et al.*. Image enhancement based on the nonsubsampling contourlet transform and adaptive threshold [J]. *Acta Electronica Sinica*. 2008, **36**(3): 527~530
梁 栋, 殷 兵, 于 梅 等. 基于非采样 Contourlet 变换的自适应阈值图像增强算法[J]. *电子学报*, 2008, **36**(3): 527~530
- 9 Zhou Xuan, Zhou Shudao, Huang Feng *et al.*. New algorithm of image enhancement based on wavelet transform[J]. *Comput. Appl.*, 2005, **25**(3): 606~608
周 旋, 周树道, 黄 峰 等. 基于小波变换的图像增强新算法[J]. *计算机应用*, 2005, **25**(3): 606~608
- 10 D. L. Donoho, I. M. Johnstone. Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage[J]. *Biometrika*, 1994, **81**(3): 425~455
- 11 Shi Dan, Li Qingwu, Ni Xue *et al.*. Infrared image nonlinear enhancement algorithm based on contourlet transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 342~346
石 丹, 李庆武, 倪 雪 等. 基于 Contourlet 变换的红外图像非线性增强算法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 342~346