

一种边缘保护的低能见度水下图像增强方法

霍冠英^{1,2}, 李庆武^{1,2}, 朱国庆¹

(1. 河海大学计算机与信息学院, 江苏 常州 213022; 2. 常州市传感网与环境感知重点实验室, 江苏 常州 213022)

摘要:针对低能见度水下图像对比度差、噪声强、边缘模糊,严重影响人工判读及图像分割等处理的特点,提出一种基于快速 Curvelet 变换的低能见度水下图像非线性增强方法。首先对低能见度水下图像进行 Curvelet 分解;基于 Sigmoid 函数构造分段非线性增益函数以增强低频子带的大系数并衰减小系数,从而有效提高图像的整体对比度;结合阈值去噪对高频子带系数进行非线性增强,在去除噪声的同时保护边缘细节;经 Curvelet 重构得到增强图像。实验结果表明,与直方图均衡化、多尺度 Retinex 增强及小波变换增强等经典方法相比,该方法在提高图像整体对比度、抑制背景噪声的同时,更好地保护了水下目标的边缘细节。

关键词:低能见度水下图像;非线性增强;Curvelet 变换;边缘细节

中图分类号:TP751

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2012)S2-0040-04

水下电视、微光摄像、蓝绿激光成像可应用于水下目标探测、水利工程作业、水下考古和失事救援等国防和民生领域^[1]。然而,由于水体的能见度低、照明条件不良、大量悬浮颗粒的存在、水体对光的散射和吸收等诸多因素的影响,水下光学图像往往对比度低,边缘模糊,噪声较强^[2]。因此,亟须对低能见度的水下模糊图像进行增强处理以提高图像的对比度,突出感兴趣目标的边缘细节特征,从而提供直观、清晰、宜于判读的图像^[3]。

现有的图像增强方法可分为空域处理方法和频域处理方法两大类。空域处理方法直接作用于图像中的像素点,可分为全局增强的方法和区域自适应增强的方法。典型的全局增强方法有线性拉伸、伽玛校正、直方图均衡化^[4]和反锐化掩模^[5]等。这类方法简单快捷,但没有考虑图像的局部信息和噪声的影响,对光照不均、背景噪声较强的水下图像往往放大噪声并造成局部亮度失真。区域自适应的增强方法主要有基于中心/环绕假设的单尺度 Retinex 方法(SSR)^[6]及带色彩恢复的多尺度 Retinex 方法(MSRCR)^[7]。这类方法需要先从原始图像中估计出光照,然后在对数域从原图中减去光照图像得到增强后的图像,通常假设光照均匀变化,与水下图像的实际情况并不相符。频域处理方法主要有基于傅

里叶变换的同态滤波、小波变换增强方法^[8]等。同态滤波的截止频率选取困难,在抑制低频并增强高频时忽视了相角的影响,不可避免地导致图像边缘细节丢失^[3]。小波变换增强方法通过对小波系数的处理,在提高图像对比度的同时能够更好地抑制噪声。但小波变换反映信号的点奇异性,其基是各向同性的,很难精确地表达图像中边缘的方向,因此会在边缘处引起失真。

Curvelet 变换^[9]的提出克服了小波变换难以表示图像的边缘方向等高维奇异性的不足,较之小波变换,除了尺度和位移参量,Curvelet 增加了方向参量,因此具有更好的方向辨识能力和边缘稀疏表示优势。由于第一代 Curvelet 的数字实现比较复杂,给实际应用带来不便,Cand 等^[10]又提出了实现更简单、更便于理解的快速 Curvelet 变换。基于 Curvelet 变换的边缘表示优势,本文提出一种边缘保护的低能见度水下图像增强方法。对水下图像进行 Curvelet 变换,构造非线性 Sigmoid 函数以增强低频子带的大系数并衰减小系数,结合阈值去噪进行高频子带系数的非线性增强,经 Curvelet 逆变换得到增强图像。实验结果表明,与直方图均衡化等经典方法相比,提出的方法不仅能够有效提高图像整体对比度、抑制水下背景噪声,而且可以更好地保护

基金项目:国家自然科学基金(60972101)

作者简介:霍冠英(1979—),男,河南汝南人,博士研究生,主要从事图像处理研究。E-mail:huoguanying@163.com

目标边缘细节等有用信息。

1 快速离散 Curvelet 变换

快速 Curvelet 变换脱离了 Ridgelet 变换理论,直接在频域中定义,大大降低了数据冗余度,提高了运算速度。在频域中, Curvelet 基的支撑区间具有楔形的结构,如图 1(a) 所示(其中 j 表示尺度);而在空域中,它是沿着某个方向的具有曲线状边缘的“容器”,如图 1(b) 所示。Curvelet 基所具有的方向性使得只有当逼近基与奇异性特征重叠,才具有较大的 Curvelet 系数。

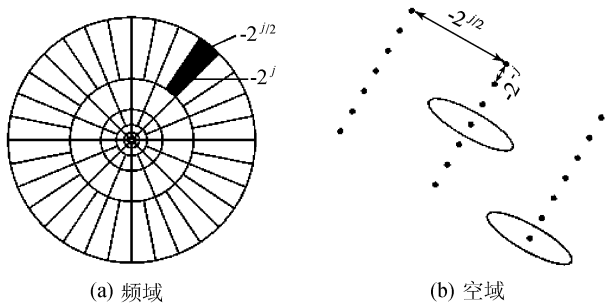


图 1 Curvelet 空域频域分块示意图

对于数字图像,需要采用离散 Curvelet 变换。快速离散 Curvelet 变换的算法实现有 Wrap 算法(wrapping-based transform) 和 USFFT 算法(unequispaced FFT) 两种^[10]。Wrap 算法先将图像变换到频域,然后在频域中进行局部化,局部化后采用 2-D IFFT 得到 Curvelet 系数,计算复杂度为 $O(n^2 \log_2 n)$,要求的存储量为 $O(n^2)$,较采用 padding 技术的 USFFT 算法更为快捷。算法具体实现如下:

第一步:对于给定的一个笛卡尔坐标下的二维函数进行 2DFFT 变换,得到二维频域表示

$$\hat{f}[n_1, n_2] \quad (n_1 \geq -n/2, n_2 \leq -n/2) \quad (1)$$

第二步:在频域,对于每一对 (j, l) (尺度,角度),重采样 $\hat{f}[n_1, n_2]$,得到采样值

$$\hat{f}[n_1, n_2 - n_1 \tan \theta_l] \quad (n_1, n_2) \in P_j \quad (2)$$

第三步:将内插后的 $\hat{f}$ 与窗函数 $\tilde{U}_j$ 相乘可得

$$\hat{f}[n_1, n_2] = \hat{f}[n_1, n_2 - n_1 \tan \theta_l] \tilde{U}_j[n_1, n_2] \quad (3)$$

第四步:围绕原点局部化 $\hat{f}[n_1, n_2]$ 。

第五步:对局部化的 $\hat{f}_{j,l}$ 作二维 IFFT,得到离散的 Curvelet 系数 $c^D(j, l, k)$ 。

2 基于快速 Curvelet 变换的水下图像增强算法

基于快速 Curvelet 变换的水下图像增强算法包含 3 个步骤:首先对待增强的水下图像进行 Curvelet 分解;然后基于 Sigmoid 函数构造非线性增益函数,对 Curvelet 变换域的低频子带系数和高频子带系数

分别进行处理,增强低频子带的大系数并衰减小系数,结合阈值去噪进行高频子带系数的非线性增强;最后对经处理的 Curvelet 系数进行重构得到增强的图像。

2.1 非线性增益函数

借鉴人工神经网络,引入符合人眼视觉对比度调节的 Sigmoid 函数,构造非线性增益函数如下:

$$G(x) = a(S(c(x - b)) - S(c(x + b))) \quad (4)$$

式中: S 代表 Sigmoid 函数,定义为 $S(x) = 1/(1 + e^{-x})$; $a = 1/(S(c(1 - b)) - S(c(1 + b)))$; b 为归一化后的非线性增益函数的增益衰减分界点, $0 < b < 1$; c 为增益速率。

2.2 低频子带系数增强

低频子带系数包含图像的整体信息,决定图像整体对比度。对于低对比度的水下图像,其低频子带系数相差较小,需要进行灰度值的拉伸。为了克服单一增益函数增强和衰减部分相互影响、不能分别校正的缺点,提出了一种分段非线性增益函数,函数定义如下:

$$f_L(C_{1,1}(n_1, n_2)) = \begin{cases} A_1 G_1(C_{1,1}(n_1, n_2)/M) C_{1,1}(n_1, n_2) & C_{1,1}(n_1, n_2)/M \geq b \\ A_2 G_2(C_{1,1}(n_1, n_2)/M) C_{1,1}(n_1, n_2) & C_{1,1}(n_1, n_2)/M < b \end{cases} \quad (5)$$

式中: $C_{1,1}(n_1, n_2)$ 代表低频子带系数,其中的 n_1 和 n_2 分别代表行索引和列索引; M 为低频子带系数的最大值; A_1 和 A_2 为增益调节因子,通常在 1 ~ 1.5 之间选择; G_1 和 G_2 具有相同的 b 参数,但增益速率不同。为保证分段非线性增益函数的连续性,给定 A_1 之后, $A_2 = A_1 G_1(b)/G_2(b)$ 。考虑到经多次低通滤波后,低频子带系数可认为服从高斯分布,采用式(6)自适应确定参数 b :

$$b = (\mu - \delta_L)/M \quad (6)$$

式中: μ 为低频子带的均值; δ_L 为低频子带的方差。

2.3 高频子带系数增强

与低频子带系数不同,高频子带系数表征局部变化,反映的是图像边缘细节信息,并且往往包含噪声。因此对高频子带系数增强时应特别考虑去除噪声,需要估计噪声方差 δ 。考虑到高频子带中的最细子带包含了主要的噪声,在最细子带中估计噪声方差,采用 Donoho 提出的鲁棒中值估计方法^[11]。采用硬阈值去噪,对于最细子带,噪声较多,阈值 T 选取为 3.5δ ;对于其他高频子带,阈值 T 选取为 2.5δ 。用于高频子带系数调整的分段非线性增益函数定义如下:

$$f_H(C_{j,l}(n_1, n_2)) = \begin{cases} A(|C_{j,l}(n_1, n_2)| / (|C_{j,l}(n_1, n_2)| + T)) \cdot \\ C_{j,l}(n_1, n_2) & |C_{j,l}(n_1, n_2)| \geq T \\ 0 & |C_{j,l}(n_1, n_2)| < T \end{cases} \quad (7)$$

式中: $C_{j,l}(n_1, n_2)$ 表示高频子带系数, j 和 l 分别为尺度变量和方向变量; A 为增益调节因子, 通常可在 3 ~ 5 之间选择。由于 $|C_{j,l}(n_1, n_2)| = T$ 时, $|C_{j,l}(n_1, n_2)| / (|C_{j,l}(n_1, n_2)| + T) = 0.5$, 为了对所有边缘细节进行增强, 对于高频子带系数, G 函数的参数 b 总是设置为 0.5。

3 实验结果与分析

2012 年 4 月 25 日起, 中央电视台主导了千岛湖水下古城探秘, 采用先进的水下机器人和水下摄像机, 在对狮城秀坊的水下探摸中发现了石狮子和牌坊等目标。由于水体的能见度低、悬浮颗粒多, 获取的图像对比度低, 石狮子和牌坊等目标模糊。分别采用直方图均衡化、多尺度 Retinex 增强方法、小波变换增强方法及本文提出的方法对石狮子的头部图像(图 2(a))和牌坊的花纹图像(图 3(a))进行了增强比较。实验中, 本文方法的低频子带增益调节因子 A_1 和 A_2 分别选取为 1.35 和 4, G_1 和 G_2 的增益速率分别设置为 25 和 50; 高频子带的增益调节因子 A 选取为 4, G 的增益速率选取为 25。为公平比较, 小波变换增强方法采用本文提出的非线性增益函数并选择同样的参数, 采用“db4”小波进行 4 层分解。多尺度 Retinex 增强方法的 3 个高斯核参数依据文献[7]分别选取为 15, 80, 250。

图 2 和图 3 分别给出了两幅实验图采用各种方法得到的增强结果。直方图均衡化得到的结果如图 2(b)和图 3(b)所示, 该方法虽能提高图像整体的对比度, 但放大了背景噪声, 局部出现亮度失真, 目标的部分细节被强亮度和悬浮颗粒掩盖, 如图 2(b)中狮子头部右上侧的雕刻和图 3(b)中牌坊左下方的栏杆均湮没于强亮度之中, 图 3(b)中的牌坊花纹细节同时受到悬浮颗粒的明显影响。多尺度 Retinex 增强方法得到的结果如图 2(c)和图 3(c)所示, 虽然有效提高了对比度并较好地保留了边缘细节, 但图像中的颗粒噪声布满了整个图像, 影响了视觉效果。小波变换增强方法得到的结果如图 2(d)和图 3(d)所示, 较之前两种方法, 小波变换增强方法噪声去除干净, 但图像的目标边缘部分产生明显的模糊和伪影, 图 2(d)中左下方狮子的花纹、图 3(d)中牌坊的花纹均存在较明显的模糊。由图 2(e)和 3(e)均可以看出, 本文方法得到的增强图像更为干净清晰, 背景噪声得到很好的抑制, 同时目标

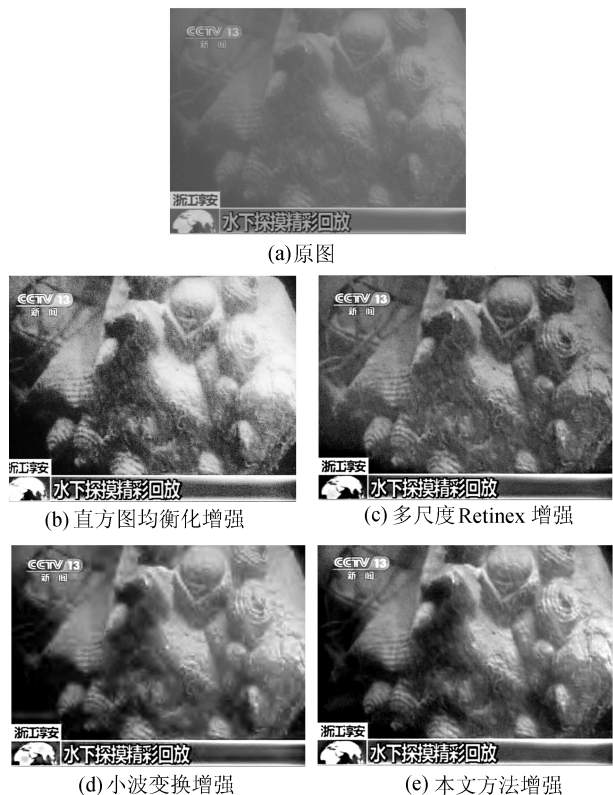


图 2 水下石狮头部原图及各种方法增强结果

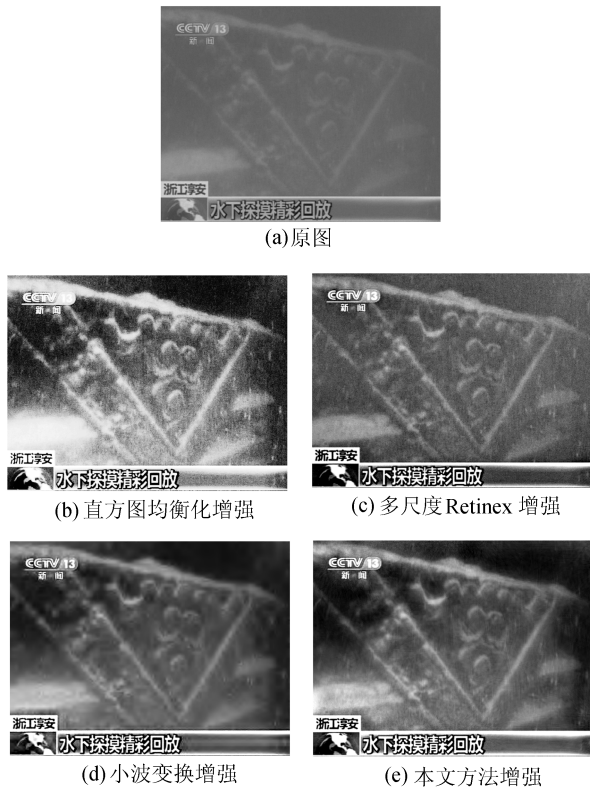


图 3 水下牌坊花纹原图及各种方法增强结果

边缘细节也得到了有效地增强, 因此具有更好的视觉效果。

对图像增强效果的评价除了人眼的主观感受这一最直接有效的定性评判标准, 还可以借助定量评价标准。采用文献[12]等使用的对比度测量函数

定量评价增强效果,表 1 同时给出了对图 2 和图 3 中各种增强方法得到的图像进行定量评价的结果。对比度测量值越大,图像的对比度越好,表 1 的定量数据表明,本文提出的方法的评估值均高于另外几种方法。

表 1 各增强算法定量对比度测量值评价				
实验图	直方图均衡化 增强	多尺度 Retinex 增强	小波变换 增强	本文方法 增强
图 1	0.0860	0.0978	0.1023	0.1176
图 2	0.0863	0.0876	0.0908	0.1109

4 结 论

基于 Curvelet 变换的边缘表示优势,结合非线性增益函数提出了一种边缘保护的低能见度水下图像增强方法。实验结果表明,与经典方法相比,本文方法得到的增强图像具有更好的视觉效果和对比度评价指标,在有效提高图像整体对比度、抑制水下背景噪声的同时,更好地保护了目标的边缘细节。文中同时给出了具体的实验参数和部分参数选取的一般规律,其中,增益速率、增益调节因子等参数还需要根据经验手动设置,如何自适应地确定相关参数以推广方法的适应性是需要进一步深入研究的问题。

参考文献:

[1] 金伟其,王霞,曹峰梅,等. 水下光电成像技术与装备研究进展[J]. 红外技术,2011,33(3):125-132.
[2] 边信黔,王晓娟. 基于散射模型的水下图像复原[J]. 机器人,2010,32(6):721-725.
[3] 陈从平,王健,邹雷,等. 一种有效的低对比度水下图像

(上接第 33 页)

参考文献:

[1] ETTEMA R, MUSTE M. Scale Effects in flume experiments on flow around a spur dike in flatbed channel [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE,2004,130(7):635-646.
[2] ELAWADY E, MICHIEU M, HINOKIDANI O. Experimental study of flow behavior around submerged spur-dike on rigid bed[J] Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE,2000,44:539-544.
[3] 韩玉芳. 丁坝的造床作用研究[D]. 南京:南京水利科学研究院,2003.
[4] 应强. 淹没丁坝附近的水流流态[J]. 河海大学学报,1995,23(4):62-68.
[5] 李洪. 丁坝水力学特性研究[D]. 成都:四川大学,2003.
[6] 曹棉. 丁坝的水毁机理及稳定计算[D]. 重庆:重庆交

通大学,2006.
[7] 曹艳敏,张华庆,蒋昌波,等. 丁坝冲刷坑及下游回流区流场和紊动特性实验研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑,2008,23(5):560-569.
[8] 周阳. 丁坝对弯道水流流态影响的实验研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2006.
[9] 于守兵. 淹没丁坝对水流结构的调整作用研究[D]. 南京:南京水利科学研究院,2010.
[10] 黑鹏飞. 丁坝回流区水流特性的实验研究[D]. 北京:清华大学,2009.
[11] 高桂景,王平义,杨成渝,等. 丁坝附近水流动能分布研究[J]. 水运工程,2007(11):75-79.
[12] 彭静,河原能久. 丁坝群近体流动结构的可视化实验研究[J]. 水力学报,2000(3):42-45.
[13] 张柏山,吕志咏,祝立国. 绕丁坝流动结构实验研究[J]. 北京航空航天大学学报,2002,28(5):585-588.

(收稿日期:2012-07-10 编辑:熊水斌)

(收稿日期:2012-07-31 编辑:熊水斌)