

# 不同波长光源照明的水下成像及光学图像实时处理

聂 瑛 何志毅

(桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

**摘要** 水下成像环境复杂,为改进水下成像质量,在清水中掺入一定量的蓝绿墨水和牛奶来模拟不同的水质环境,采用不同波长的照明光源进行水下图像采集实验。考虑到水下的吸收和散射的影响,将不同光源采集到的图像特点进行对比分析,设计了一种新的光学方法来进行图像处理。结合长波长的红光抗散射和较短波长的蓝绿光抗吸收两方面的光传输特性,通过红光和绿光照明采集图像的灰度线性差值去除散射噪声信息,获取目标图像信息,在 Windows 和 Android 系统中进行图像采集和清晰化。实验结果表明该方法能有效增强图像清晰度,与虚光蒙板(USM)锐化算法相比计算量小,实时性高。

**关键词** 图像处理;水下成像;照明光源;散射;吸收

**中图分类号** TN29 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0710002

## Underwater Imaging and Real-Time Optical Image Processing under Illumination by Light Sources with Different Wavelengths

Nie Ying He Zhiyi

(School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

**Abstract** To improve the underwater imaging quality under the complex underwater imaging environment, different water environments are simulated by adding the blue-green ink and milk for the absorption and scattering effects respectively, and light sources with different wavelengths are employed for illumination. To eliminate or alleviate the effect of absorption and scattering, an optical image processing technique is proposed after analyzing the collected characteristics of images with different light sources. The experiments show that the blue-green light has better transmission to overcome the water absorption and the red light with longer wavelength exhibits clearer illumination to alleviate the scattering influence and obtain target image information. The scattering noise can be removed with the collected differential image grey-scale value of the red light and blue-green light. The image processing technique in both Windows and Android systems is demonstrated, achieving a high performance. Compared with the unsharp mask (USM) sharpening algorithms, it has the advantages of simpler computation and good real-time performance.

**Key words** image processing; underwater imaging; light source; scattering; absorption

**OCIS codes** 100.1160; 010.4450; 010.4455; 010.7295

## 1 引 言

随着陆地资源的逐步减少,人们开始越来越关注于海洋资源的开发利用,水下成像是海底探测的重要手段,同时也是打捞救援经常采用的搜寻方法<sup>[1-3]</sup>。对远距离目标成像时,光在水中传输时受

到水中介质的影响迅速衰减,尤其是在浑浊的海水中,光的散射造成严重的光传输损耗,随着水下景深的增加,散射光在探测器上形成的背景噪声导致图像质量更差<sup>[4]</sup>。除光吸收带来的影响以外,如何克服散射对成像的影响、提高对成像目标实时的可辨

**收稿日期**: 2014-01-01; **收到修改稿日期**: 2014-02-09

**基金项目**: 国家自然科学基金(61077036)、无线宽带通信与信号处理重点实验室开放基金(12108)

**作者简介**: 聂 瑛(1989—),女,硕士研究生,主要从事光电图像信号采集与处理方面的研究。

E-mail: nie\_ying89@163.com

**导师简介**: 何志毅(1965—),男,教授,主要从事光电显示与照明和计算机图形图像技术等方面的研究。

E-mail: hezhiyi@guet.edu.cn(通信联系人)

认度也是水下成像需要解决的难题。

虽然利用水下成像特有的时间空间特性,可以通过采用距离选通<sup>[5]</sup>和同步扫描等光电水下成像技术来减小散射带来的影响,但对光源和图像采集硬件性能要求很高,系统复杂且成本较高,由此采集到的图像仍存在细节模糊、对比度低等问题<sup>[6]</sup>。这就必须采用水下图像处理技术进行噪声滤除来增强图像的清晰度。在图像处理技术方面,Padmavathi等<sup>[7]</sup>利用同态滤波、各向异性扩散滤波、小波滤波等方法来提高图像的对比度,抑制噪声和保留图像的边缘,从而增强和平滑图像。美国 NASA 的兰利(Langley)研究中心<sup>[8]</sup>采用先进的 Retinex 图像增强处理算法,能去除大气雾霾、水下图像散射等的影响。文献<sup>[9]</sup>中针对不同水质产生的水下激光距离选通图像采用目标与背景相减、相邻图像按周期加微小时间偏移量取极值,然后层层递进重构以及分割重构等算法进行处理后,可以较好地展现大景深范围的全部信息,但该算法仅适用于定焦图像。还有学者根据提出的物理模型对成像系统的传递函数和加性噪声的特性等进行理论分析研究<sup>[10]</sup>,采用维纳滤波对实际水下降质图像进行复原具有一定创新性与可行性。以上方法虽然能在一定程度上解决水下成像模糊的问题,但由于这些算法普遍计算量大、运算周期长且对光电成像器件要求较高,因而不适合运用于水下视频实时处理。

本文对影响水下成像的因素进行分析,在不同水下环境中采用不同的照明光源来克服光吸收和散射的影响。根据水下的光传播特性提出了一种新的光学处理方法来解决水下成像模糊问题。

## 2 不同照明光源对水下成像的影响

### 2.1 水的光学特性对水下成像的影响

在水下环境中光衰减主要是由于水对光的吸收和水中的悬浮介质对光的散射作用引起的。水对光的吸收在不同的光谱区域具有明显的选择性,在可见光区域吸收较大的分别是红光、黄光和淡绿光谱区域,而在波长为 462~475 nm 范围内的蓝绿光衰减最少<sup>[11]</sup>。水下光吸收造成的光能量损失使水下成像变得困难。水中的散射现象主要是由于水本身和水中的悬浮粒子而引起的,使光偏离原来直线传播的方向。散射的主要方式分为前向散射和后向散射,严重影响了水下的成像质量,因此如何去除散射造成的背景噪声是提高水下成像质量的关键。

吸收和散射能同时影响水下的成像质量,如果

水中的光衰减主要是由于吸收作用引起的,可以通过增大照明光源的光功率来减小吸收对水下成像的影响,但随着照明光源功率的增大,由水本身和水中的悬浮粒子引起的散射将会愈加明显,使图像细节更加模糊,严重影响了成像效果。即使是清澈透明的海水,60%的衰减都是由散射引起的<sup>[11]</sup>。因此有效减小水下散射造成的光损耗能提高水下成像的清晰度和成像效果。

### 2.2 实验水体模拟海水环境

图 1 中虚线表示海水的典型吸收光谱,它存在一个相对透明的窗口,波长在 430~570 nm 范围的蓝绿光在海水中衰减最小,而其它波长的光源在水中的衰减都较大。由于地域条件和潜水设备条件限制,难以到实际深海环境下进行实验,通过向清水中掺入一定量的蓝绿墨水和牛奶稀释后,配成具有如图 1 虚线所示衰减特性的实验水体来模拟海水环境。蓝绿色墨水可以用来模拟海水中的吸收作用,水中墨水含量越高,光传播的吸收损耗越明显,牛奶则可以模拟光在海水中的散射损耗。实验中采用法国 J. Herbin D 系列彩色染料钢笔墨水,该墨水在实验所用照明光源波长范围内的吸收光谱相对值曲线最接近海水的特性,而且染料的溶解性好。由实验数据测得实验水体的光衰减特性如图 1 实线所示,实验水体衰减特性在采用照明光源波长坐标上的相对变化趋势与海水近似,也存在一个透射窗口,波长范围为 430~570 nm,在 600~650 nm 之间存在一个波峰,由于同色系不同品牌的其他墨水进行对比测试时也存在此类特点,这可能是蓝绿墨水本身具有的光吸收特性。

虽然图 1 中 650nm 以上的深红到近红外的区域墨水的吸收有显著降低,与海水的差异较大,但所

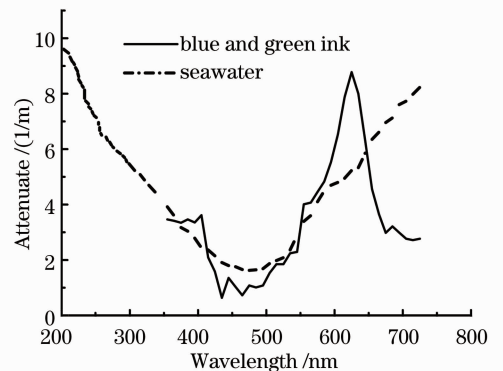


图 1 典型的海水和掺入蓝绿墨水的实验水体吸收光谱  
Fig.1 Typical absorption spectra of the seawater and the experimental water mixed with the blue-green ink

用的发光二极管(LED)照明光源的峰值波长如图2所示,范围都在650 nm以下,不涉及到更长波长区域,所以实际上墨水在长波长与海水吸收的差异不影响实验中对海水吸收特性的模拟效果。在所用照明光源的蓝绿光到红光的波长范围,可以近似地模拟海水的吸收特性。所有成像实验都是在此类实验水体中进行的。

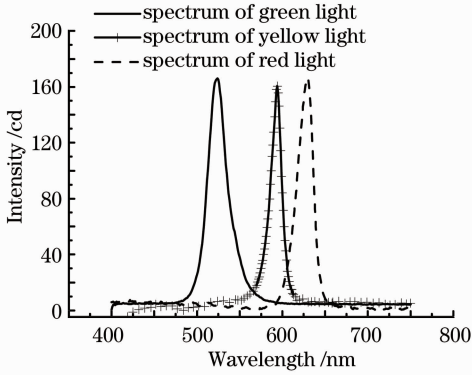


图2 照明光源3 W绿光、黄光、红光LED发光光谱  
Fig.2 Spectrums of 3 W green, yellow, red light LED

### 2.3 不同波长的光源在不同水质环境下衰减不同

不同海域的海水,由于水中含有的粒子颗粒大

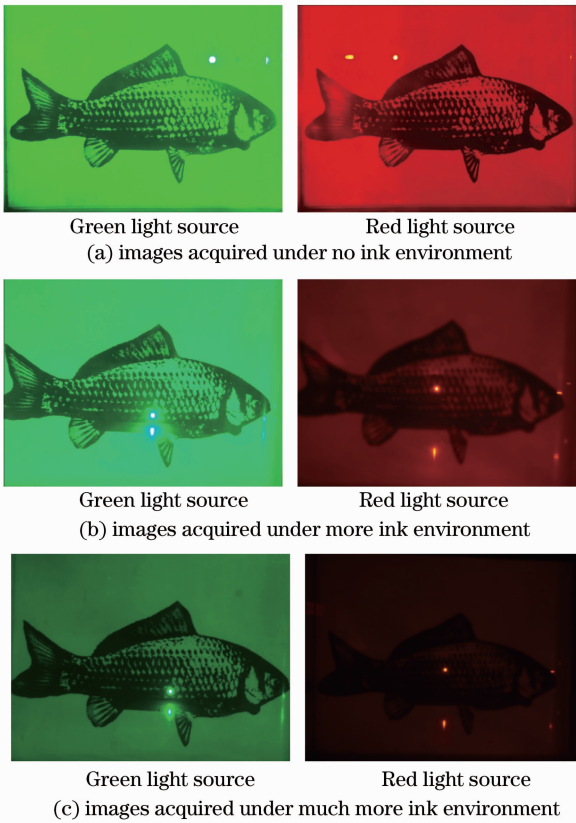


图3 加入不同浓度墨水时绿光和红光照明下采集图像对比  
Fig.3 Comparison of the images acquired by green and red lighting at different concentrations of the ink added

小和含量不同,所以光在不同海域传输时吸收散射比存在一定的差异<sup>[12]</sup>。针对不同海水对光源的衰减机制不同,选用不同的主动照明光源输出最佳光波长,抑制海水对光的吸收和散射损耗,实现增大水下成像距离的同时,提高水下成像清晰度<sup>[13]</sup>。实验中向水体加入不定量的墨水和牛奶模拟不同的海域环境,采用不同波长的照明光源进行水下实验。

向清水中不断添加蓝绿墨水来模拟光吸收衰减较为严重的水下环境。随着实验水体中墨水含量不断增加,光源在水中受到的吸收衰减越来越严重,图3为在水体环境和LED光功率相同的情况下采集到的三组图片。从图3(a)~(c)的变化中可以看出随着墨水含量的增加绿色光源的图像虽然整体亮度有所衰减,但总体图像细节和红色相比清晰很多。即以吸收占主导损耗的水下环境中,主动照明光源波长越短的光在水下的光衰减较小,而长波长的红色光源在水中的吸收衰减严重,这点与水下衰减窗口理论相符。然而在水中的吸收衰减虽然严重,但通过增加主动照明光源的光功率在一定程度上可以减小吸收损耗的影响<sup>[14]</sup>。

为了模拟水下散射现象严重的成像环境,通过

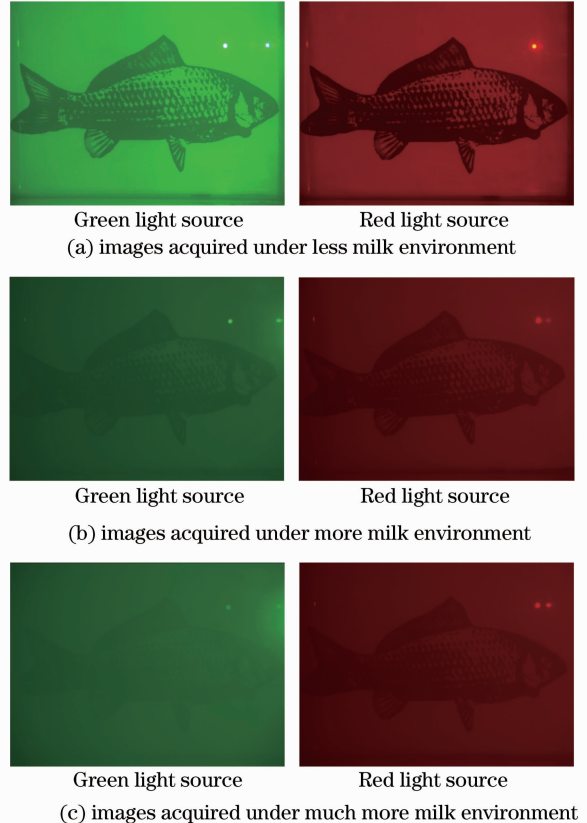


图4 加入不同浓度牛奶时绿光和红光照明下采集图像对比  
Fig.4 Comparison of the images acquired by green and red lighting at different concentrations of the milk added

向实验水体中不断添加牛奶增强水体对光的散射效果,水体中牛奶含量越高水质越浑浊由散射而引起的光衰减越严重。图4是在牛奶含量不断增加的实验水体中采集到的三组图片。从图4(a)~(c)的三组图像变化中可见,随着牛奶含量的增加,由绿色光源采集到的图像细节越来越模糊,而红色光源采集到的图像虽然也受到散射的影响,但相比于绿色光源清晰度较高<sup>[15]</sup>,即在光衰减主要由散射引起的水下环境中,以红色为主的长波长光源在去除水下散射噪声方面有一定优势<sup>[16]</sup>。

有些海水区域吸收和散射衰减同时存在,通过向实验水体中添加一定量的墨水和牛奶模拟此类水



图5 加入牛奶和墨水的水中采集图像的对比。分别采用照明光源为(a)绿光;(b)红光;(c)黄色

Fig.5 Comparison of the images acquired in the water added with both milk and blue-green ink by illumination of (a) green light; (b) red light; (c) yellow light

从实验中可以得出由于水下环境的复杂性,不同区域的海水由于浑浊程度的不一致使得吸收散射比都不尽相同,应该就不同的水域选择不同波长的照明光源。在散射衰减较弱的水域中,应尽可能选用短波长的蓝绿光源作为主动照明光源;在某些水域水下散射严重,吸收散射比较小,则应根据具体环境采用波长较长的红色光源进行水下照明;而在吸收散射作用相当的水下环境,采用介于长波长和短波长之间的黄色光源能提高成像质量。

## 3 克服散射的光学图像处理方法

### 3.1 光学图像处理方法

依据以上实验不同波长的光源在不同水质环境下衰减不同这一理论,提出了一种新的光学图像处理方法,该方法充分利用了长波长的红光散射衰减较小和短波长的绿光抑制吸收损耗的特点,对水下采集到的图像进行清晰化处理。

水下成像一般采用单色照明光源,此时采集到的图像由于光传输受到水下吸收散射影响而丢失了部分彩色信息,该方法以增强水下图像清晰度为目的并不强调恢复原始色彩信息,将所采集图像中的三色灰度图像的灰度值进行处理来提高成像质量。

下环境。图5为分别以相同光功率的绿光、红光和黄光作为照明光源在同一实验环境中采集到的图像。从图5(a)~(c)的对比中可以看出以绿光和红光为照明光源采集到的图像已完全看不清了,而黄光采集到的图像较绿光和红光要清晰得多。即散射和吸收同时影响光传输时,以短波长为主的绿色光源无法消减由散射引起的光衰减,而以长波长为主的红色光源也无法抑制光在水中的吸收损耗,导致成像效果都不佳。而波长介于长波长和短波长之间的黄色光源能实现同时减小光吸收和散射衰减的影响从而提高成像质量。

一幅图像的信息  $P$  可以表示为

$$P = P_r + P_g + P_b, \quad (1)$$

式中  $P_r$ 、 $P_g$  和  $P_b$  分别为图像中的红色分量、绿色分量和蓝色分量<sup>[17]</sup>。

由于在海水中大部分光衰减都是由水中的悬浮颗粒和微生物的散射作用引起的,而蓝光的光波长最短,受到海水中的散射衰减相对于红光和绿光是最严重的,水下采集到的图像中自带的蓝色分量对图像质量的贡献也是最小的,因此这里不考虑用蓝色光源作为海水中的主动照明光源进行图像采集。由于红光和绿光在水下传输中能分别减弱散射和吸收衰减的影响,则多以红光和绿光作为水下照明光源。以红色光源进行主动照明成像时, $P_r$  所提供的图像信息量是最大的,即  $P_r \gg P_g \gg P_b$ ,同理以绿色光源进行主动照明成像时, $P_g$  所提供的图像信息最大,即  $P_g \gg P_r \gg P_b$ 。

针对水下采集到的像素信息来看整体图像信息  $P$  也可以表示为

$$P = S + N, \quad (2)$$

式中  $S$  为真实图像信息, $N$  为后向散射光和前向散射光在成像设备上形成的背景噪声,即图像的噪声信息。由(2)式可知将整体图像信息  $P$  中的  $N$  去除

便可恢复出原图像信息。由于采集到的图像中同时含有真实图像信息和噪声信息,图像中红色分量、绿色分量也可理解为受到水下光吸收衰减影响后的真实图像信息和散射作用的噪声信息的合成,因而可以表示为

$$P_r = a_1 S_0 + b_1 N_0, \quad (3)$$

$$P_g = a_2 S_0 + b_2 N_0, \quad (4)$$

式中  $a_1 S_0$  和  $a_2 S_0$  为受到水下吸收损耗后的图像信息,  $b_1 N_0$  和  $b_2 N_0$  为水下散射造成的噪声信息,  $a_1$  和  $a_2$  为受到吸收作用后真实图像的衰减系数,  $b_1$  和  $b_2$  为散射噪声强度系数,  $S_0$  为未受吸收散射影响的目标图像信息,  $N_0$  为某种特定海水的散射噪声强度,或是以某种标准散射条件下的散射光强度作为参考,在此它只是一个过渡参数,不影响计算结果。

由于海水中的散射现象比较明显,红色光源作为主动照明光源时受到的散射影响较小,因而图像中的散射噪声信息较小,即  $b_1 < b_2$ ; 然而红光又受海水的吸收衰减较绿色严重,对图像的真实信息影响较大,即  $a_1 < a_2$ 。通过(3)式和(4)式的线性运算可以去除图像的噪声信息得出未受水下光传输介质影响的图像信息  $S_0$ ,  $S_0$  表达式为

$$S_0 = \frac{b_2 P_r - b_1 P_g}{a_1 b_2 - a_2 b_1} = (P_r - \alpha P_g) \cdot \beta, \quad (5)$$

式中  $\alpha = b_1/b_2$ , 为红色分量减去的绿色分量的比例系数,  $\beta = b_2/(a_1 b_2 - a_2 b_1)$ , 为图像真实信息的放大倍数。(5)式中  $P_r$  和  $P_g$  可以从采集到的整体图像信息  $P$  中获取, 想要获得  $S_0$ , 关键是估计出  $\alpha$  和  $\beta$ , 通过在一定水下成像环境中不断调节  $\alpha$  和  $\beta$  的值, 根据处理出来的图像清晰度对比得到准确的范围。

令  $P_r = P_g = P_b = S_0$  便将原图像信息中的噪声信息去除, 利用光学方法可以成功恢复出真实的图像信息。可见这种方法主要是以光在水下的传输特性为理论依据, 通过相关运算提取出真实图像信息从而使成像质量得到提高。

### 3.2 实验结果与分析

基于绿色照明光源抗吸收和红色照明光源抗散射的原理, 在 Microsoft Visual C++6.0 上运用提出的水下光学方法进行图像处理。图 6(a)、(b) 为实验室模拟海水环境采集到的图片, 由于水下散射吸收衰减严重图像清晰度变得十分模糊, 图 6(c) 为采用所提方法处理后的图像。从实验结果可以看出处理后的图像清晰度得到了很大的提高, 证明所提的光学方法能同时解决水中的吸收和散射衰减造成的成像模糊问题。虚光蒙板(USM)锐化是最成

熟的锐化技术之一, 常用于图像的去雾、消除模糊, 在增强边缘清晰度的同时也不会产生不自然的迹象, 可以快速调整图像边缘细节的对比度, 使画面整体更加清晰。USM 算法主要是利用高斯模板原图进行高斯模糊处理, 求取模糊后对应像素点的颜色值之差, 再以参数阈值为基准, 与像素点的颜色值之差进行比较。由此可见, 算法的主体算法部分为高斯模糊部分<sup>[18]</sup>。图 6(d) 是经过 USM 锐化算法处理后的图像结果, 从视觉角度来看, 采用的水下光学处理方法要优于 USM 锐化算法。同时从图像清晰度评价的数据指标上来看, 图 6(c) 的方差为 2925, 熵为 7.23, 图 6(d) 的方差为 2478, 熵为 7.12。方差和熵越大代表图像整体越清晰, 即从客观指标上也可以看出利用所提方法处理出来的图像要优于 USM 锐化算法。

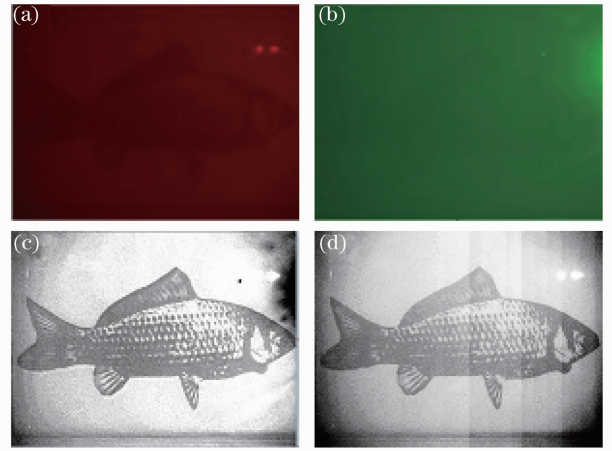


图 6 (a) 红光照明采集的图片; (b) 绿光照明采集的图片; (c) 光学处理后的图片; (d) USM 锐化算法处理的图像

Fig. 6 (a) Image acquired under red light; (b) image acquired under green light; (c) image after optical processing; (d) image processed by USM sharpening algorithm

### 4 基于不同平台实时视频处理

提出的光学处理方法只是对图像信息进行线性运算, 和 USM 锐化算法的计算量相比要小很多, 同时 USM 锐化算法占用资源较大, 处理连续视频对硬件资源的配置要求较高, 理论上所提光学处理方法时效性应该更强。时间测试: 使用计算机处理器(CPU)为 Intel Core I5-2410(主频 2.30 GHz 双核), 内存为 4 GB, 编程软件平台为 Microsoft Visual C++6.0, 运用所提方法对分辨率为 480 pixel × 360 pixel 的彩色图像进行处理所需时间为 16 ms; 而在相同

环境下采用 USM 锐化算法对同一幅图像进行处理所需时间为 40 ms,可见所提光学方法明显优于 USM 锐化算法,实时性较高,基本满足了水下视频实时处理的需求。文献 [13] 中已实现了在 Windows 系统上运用 DirectShow 视频采集函数库来实现 LED 同步水下闪光摄像,常见摄像头的帧频为 30 frame/s,而光学方法所需处理一帧图片时间不过 16 ms 左右,将所提的图像处理方法运用于此类系统中在实现 LED 同步水下闪光摄像的同时,提高水下成像质量。在 DirectShow SDK 开发中进行视频数据捕获,并运用光学方法进行视频处理。图 7(a)为摄像头在水下采集到的视频图像,图 7(b)为经过光学处理后的视频图像。

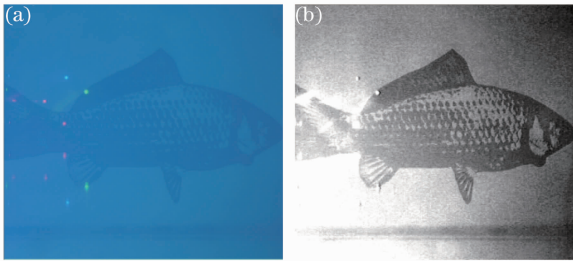


图 7 Windows 系统的视频处理效果。(a)原始视频图像;(b)处理后的视频图像

Fig. 7 Effect of video processing on Windows system.  
(a) Original video image; (b) video image after processing

随着嵌入式系统的迅速发展,嵌入式系统下的水下摄像应用越来越广泛,由于嵌入式系统下硬件资源受限,相比于 Windows 系统 CPU 的处理速度较慢,在进行水下视频实时处理时对水下图像处理方法的效率要求更高。在 CPU 为 MSM8260(主频为 1.5 GHz 双核),内存为 1 GB,操作系统为 Android 4.0 的嵌入式系统下运用光学方法对绿色和红色光源采集的两幅图像进行线性运算,能有效提高图像的清晰度,处理时间仅为 100 ms 左右,而运用 USM 锐化算法对一幅图像进行处理的耗时接近 1 s。USM 算法采用数字图像的方法进行处理计算量大,对帧频为 15 frame/s 和 30 frame/s 的摄像头而言实时性较差,而所提的处理方法基本满足了水下视频实时处理的需求。将所提的方法应用于 Android 平台下的水下视频采集,通过调用 API 中的回调函数 onPreviewFrame (byte [ ] data, Camera camera) 获取视频数据,然而 Android 系统下采集的图像格式是 YUV420SP,须先将 YUV420SP 格式的图像数据转化为 RGB 格式再结

合文中的光学方法进行视频处理。YUV420SP 转化为 RGB 的转换公式以矩阵形式表示如下:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1.402 \\ 1 & -0.3441 & -0.7141 \\ 1 & 1.772 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ (U-128) \\ (V-128) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

可见在水下视频实时处理时,所提处理方法和 USM 锐化算法相比大大节省了内存和 CPU 的运算量,实时性较高,更加适用于资源有限的嵌入式系统下的水下视频实时处理。

## 5 结 论

通过实验水体模拟海水中的水下成像环境,考察吸收和散射对海水中成像的影响,选用合适的照明光源光波长,在降低光吸收和散射衰减两方面之间考虑,以获得最佳图像质量。根据光散射与光波长的关系,利用不同波长照明所采集图像的线性差值来增强图像清晰度,这种光学处理方法能在一定程度上解决由于散射引起成像模糊的问题,并且具有很好的实时性,可应用于不同开发平台进行水下视频实时处理。

## 参 考 文 献

- G L Foresti, S Gentili. A vision based system for object detection in underwater images [J]. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2000, 14(2): 167-188.
- Han Biao, Liu Jifang, Liu Kunlun, *et al.*. Study of backward optical detection method for ship wake bubbles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0101001.  
韩彪,刘继芳,刘昆仑,等.舰船尾流气泡后向光学检测方法研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0101001.
- Zhang Wenming, Wang Xin, Zhang Qiang, *et al.*. Positioning algorithm in multi-media refractive imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0515001.  
张文明,王鑫,张强,等.基于粒子群标定的多介质折射成像定位算法[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0515001.
- Zhong Sencheng, Li Zeren, Wang Rongbo. Influence of backscattering on underwater laser imaging [J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(7): 735-738.  
钟森城,李泽仁,王荣波.后向散射对激光水下成像的影响研究[J]. *激光与红外*, 2012, 42(7): 735-738.
- Wang Lei, Xu Zhiyong, Zhang Qiheng, *et al.*. Design and experiment of range-gated underwater laser imaging system [J]. *Laser & Optoelectronic Progress*, 2012, 49(5): 051101.  
王磊,徐智勇,张启衡,等.距离选通水下激光成像系统设计及实验[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(5): 051101.
- Lu Jing. Underwater image degradation model of continuous laser imaging [J]. *Journal of Hubei Second Normal College*, 2013, 30(8): 53-55.  
鲁静.水下连续激光成像的图像退化模型[J]. *湖北第二师范学院学报*, 2013, 30(8): 53-55.
- G Padmavathi, P Subahini, M M Kumar, *et al.*. Comparison of filters used for underwater image preprocessing [J]. *International Journal of Computer Science and Network Security*, 2010, 10

- (1): 58—65.
- 8 Jing Weiqi, Wang Xia, Cao Fengmei, *et al.*. Review of underwater opto-electrical imaging technology and equipment (II) [J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(3): 125—132.  
金伟其, 王霞, 曹峰梅, 等. 水下光电成像技术与装备研究进展(下)[J]. *红外技术*, 2011, 33(3): 125—132.
- 9 Li Hailan, Wang Xia, Jin Weiqi, *et al.*. 3-Dimensional reconstruction based on underwater range gated images [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12): 3464—3470.  
李海兰, 王霞, 金伟其, 等. 基于多帧水下距离选通图像的三维重构方法[J]. *光学学报*, 2010, 30(12): 3464—3470.
- 10 Ma Tian. Research of Underwater Image Restoration Algorithm Based on Backward Scattering Noise Model [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010. 32—47.  
马田. 基于后向散射噪声模型的水下图像复原算法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010. 32—47.
- 11 Sun Chuandong, Chen Liangyi, Gao Limin, *et al.*. The optical properties of water and its influence on underwater imaging [J]. *Journal of Applied Optics*, 2000, 21(4): 39—46.  
孙传东, 陈良益, 高立民, 等. 水的光学特性及其对水下成像的影响[J]. *应用光学*, 2000, 21(4): 39—46.
- 12 Andre Morel, Hubert Loisel. Apparent optical properties of oceanic water; dependence on the molecular scattering contribution [J]. *Appl Opt*, 1998, 37(21): 4765—4776.
- 13 Kang Yanmei. Studies on LED Synchronized Strobe Lighting for Underwater Camera Technology [D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2013. 26—37.  
康艳梅. LED同步闪光照明的水下摄像技术研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2013. 26—37.
- 14 Zheng Bing, Sun Feifei, Wang Guangpeng. The theoretical analysis of the affect about scatter to laser underwater imaging precision [J]. *Control and Automation Publication Group*, 2007, 23(10): 200—202.  
郑冰, 孙飞飞, 王光鹏. 散射对激光水下图像传输影响的理论分析[J]. *微计算机信息*, 2007, 23(10): 200—202.
- 15 F Bonin, A Burguera, G Oliver. Imaging systems for advanced underwater vehicles [J]. *Journal of Maritime Research*, 2011, 8(1): 65—86.
- 16 Tommy D Dickey, George W Kattawar, Kenneth J Voss. Shedding new light on light in the ocean [J]. *Physics Today*, 2011, 64(4): 44—49.
- 17 Joseph R Curran. A Strategy for the Use of Light Emitting Diodes by Autonomous Underwater Vehicles [D]. Massachusetts Institute of Technology, 2004. 26—37.
- 18 Guang Deng. A generalized unsharp masking algorithm [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(5): 1249—1261.

栏目编辑：张浩佳