

不同光照条件下水下成像背景光的建模与研究

赵欣慰 金韬 池灏 曲嵩

Modeling and simulation of the background light in underwater imaging under different illumination conditions

Zhao Xin-Wei Jin Tao Chi Hao Qu Song

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 104201 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.104201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.104201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I10>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种基于 BLT 方程的孔缝箱体屏蔽效能计算方法

[A BLT equation-based approach for calculating the shielding effectiveness of enclosures with apertures](#)

物理学报.2015, 64(1): 010701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.010701>

一种考虑小孔尺寸效应的孔阵等效建模方法

[An equivalent approach to modeling aperture array with considering size effect of apertures](#)

物理学报.2014, 63(12): 120701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.120701>

球形压头与单晶铝材料纳米接触过程的多尺度分析

[Multi-scale analysis of nanoscale contact process between spherical indenter and single crystal aluminium](#)

物理学报.2013, 62(18): 180702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.180702>

石墨烯等二维原子晶体薄片样品的光学衬度计算及其层数表征

[The numerical-aperture-dependent optical contrast and thickness determination of ultrathin flakes of two-dimensional atomic crystals: A case of graphene multilayers](#)

物理学报.2013, 62(11): 110702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.110702>

温度梯度对晶粒生长行为影响的相场模拟

[Effect of temperature gradient on grain growth behavior from phase field simulations](#)

物理学报.2011, 60(10): 100701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.100701>

不同光照条件下水下成像背景光的建模与研究*

赵欣慰 金韬[†] 池灏 曲嵩

(浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027)

(2014年10月4日收到; 2014年12月26日收到修改稿)

由于光在水中传输时的衰减和散射效应, 水下成像系统通常很难达到令人满意的成像效果, 而成像过程中由于光散射产生的背景光则是造成水下图像退化的主要原因. 本文对自然光照和人工光照两种不同光照条件下的水下成像背景光进行了建模和仿真分析. 结果显示: 自然光照下的无穷远处背景光与衰减系数成反比, 与散射系数成正比; 人工光照下的无穷远处背景光则与衰减系数、散射系数和相机-光源距离有关. 两种光照条件下的背景光都可以用无穷远处背景光的指数衰减表达式来表示. 水下图像背景光的强度主要与水体光学参数、相机-景物的距离、相机-光源的距离及相机成像角等因素有关. 本文的研究结论不仅可用于水下成像系统的设计与优化, 也可用来从水下图像背景光中估计水体光学参数、相机-景物距离等图像信息.

关键词: 海洋光学, 水下成像, 散射, 背景光**PACS:** 42.68.Xy, 07.05.Tp, 43.30.Ft, 43.30.Pc**DOI:** 10.7498/aps.64.104201

1 引言

近年来, 海洋资源开发、海洋环境保护及海洋军事应用等方面的研究越来越引起人们的关注. 水下的成像质量对于这些应用非常重要, 已经成为水下视觉和水下图像处理所关注的热点. 然而, 在复杂多变的水下环境中, 大多数的水下成像系统并不能有令人满意的表现, 这是因为水下图像会因为光在水中的衰减与散射造成不同程度的退化^[1]. 一方面, 不同波长的光在水中不同的衰减和散射特性会造成图像颜色的畸变; 另一方面, 成像视角内的环境光会由于水中悬浮粒子和水分子的散射进入相机镜头, 给水下图像造成“雾”的效果, 降低图像的对比度. 这部分散射光通常被称为背景光, 也是造成水下图像退化的主要原因.

海水中的各种微粒对光的散射是影响水下主动光电式成像效果的主要因素. 前向散射造成目标景物的模糊, 后向散射背景光则造成水下图像对比度的下降. 对水下成像中光散射的研究主要

集中在如何将水体散射光和目标景物反射光进行区分, 并通过去除水体散射光来达到图像复原或图像增强的目的. 其中, 基于水下光偏振特性的主动偏振去散射技术^[2,3]、基于波长补偿和图像去雾的水下图像增强技术^[4]、基于成像物理模型的水下图像复原技术等^[5]方法都是根据对水下成像的散射和衰减效应进行分析, 并建立水下成像物理模型来设计相应的算法. 因此, 对自然光照和人工光照这两种光照条件下的水下成像背景散射光进行系统的分析对水下图像复原和增强的研究有重要意义.

对特殊环境下不同成像模式的建模与仿真分析是研究成像特点和如何改进成像质量的一种重要方法, 被广泛应用于雷达成像、遥感成像和雾天成像等领域^[6,7]. 散射介质中成像与背景光形成的研究通常从建立物理模型出发. 由于类似的散射现象和成像原理, 一些学者研究了雾天的大气中成像^[8-10]. 水下成像模型大多基于McGlamery提出的一个水下成像系统的计算机模型, 通过这个模型可以模拟水下图像的形成^[11], 他认为相机接收到

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2012CB315703)和国家自然科学基金(批准号: 61275027, 61177003)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: jint@zju.edu.cn

的光线主要由三部分构成: 直接衰减的场景辐射、前向散射的场景辐射和后向散射光. 基于这个模型并加以改进, Jaffe^[12,13] 对水下图像的形成进行了计算机仿真分析. Jaffe的模型研究了水体的固有光学特性和外在光学特性对成像的影响, 并得出了如何增大图像对比度的方法.

本文首先通过对自然光照和人工光照这两种情况下的水下成像背景光进行建模, 分析了水下成像中背景光的形成原理. 本文建立的模型中的参数包括相机参数、光源参数、水体光学参数、相机-光源-景物相对位置及相机成像角等参数. 基于所建立的模型和计算机仿真分析, 首先研究了无穷远处背景光与水体光学参数和相机-光源距离之间的关系, 并得出了任意距离背景光的简化表达式, 极大地方便了水下成像背景光的计算. 最后分析了整幅水下图像背景的特点. 对无穷远处背景光的分析有助于水下成像系统的设计与优化, 并可用于估计水体光学参数和景深等图像信息. 对整幅图像背景光的分析表明, 在水下摄影时可以通过适当增大相机-光源距离、选择合适的拍摄角度和距离等方法来减小背景光对成像质量的影响.

2 海洋光学

光在海水中传输时, 它会由于水体的吸收和散射效应造成衰减. 吸收造成光能量的损耗, 散射则改变光的传输路径. 根据 Lambert-Beer 定律, 光在水中传输时以指数形式衰减^[14]. 假设水体是均匀的, 光在水中的传输函数可表示为

$$t_\lambda(x) = \exp[-c_\lambda d(x)], \quad (1)$$

其中 c_λ 表示水体的衰减系数, $d(x)$ 表示光的传输距离, λ 表示不同波长的光.

光在水中的衰减是由吸收和散射共同造成的. 假设水体为各向同性的均匀介质, 衰减系数 c_λ 可以表示为吸收系数 a_λ 和散射系数 b_λ 之和, 即 $c_\lambda = a_\lambda + b_\lambda$. 散射系数 b_λ 表示在某一散射点上所有散射角上发生的散射总和, 它可以表示为体散射函数 $\beta_\lambda(\theta)$ 的积分^[15]:

$$b_\lambda = \int_0^\pi \beta_\lambda(\theta) d\omega = 2\pi \int_0^\pi \beta_\lambda(\theta) \sin\theta d\theta, \quad (2)$$

参数 c_λ , a_λ , b_λ 和 $\beta_\lambda(\theta)$ 都是水体的固有光学参数. 然而, 对这些参数的实时简便的精确测量仍然是很

难实现和耗费巨大的工作, 所以从图像本身来估计这些参数非常有意义.

3 水下成像背景光

当对水下景物成像时, 散射入相机镜头的环境光会对成像质量造成很大的影响, 背景光的去除一直是水下图像增强和复原的首要研究对象.

水下成像时的自然光照是由水面上方大气中的光线穿透海水表面并射入水体中的. 光线射入海水的过程中, 经过了海水表面的反射和大气-海水交界面的折射. 光在水体中的衰减和散射都与光波长有关. 一般来说, I类和II类海水中的光衰减系数随光波长的增大而增大, 而散射系数随光波长的增大而减小^[16,17], 因此水下的光强分布也与光波长有相关关系. 许多学者已对水下光场做过研究^[18,19], 本文中我们将基于这些研究对水下的环境光光强分布做一些合理的假设. 在较深的水下环境中, 上方透射下来的自然光由于衰减而过于微弱, 不足以达到理想的成像条件, 此时就需要辅以人工光照. 本节中, 我们将对这两种不同光照条件下的水下成像背景光进行建模.

3.1 自然光照下的背景光

在没有人工光源存在的水下环境中, 水面上方透射下来的自然光对水下成像提供照明. 这种情况下, 成像时所产生的背景光并不起源于被摄景物, 而是由成像视角内的环境光被水中的悬浮粒子和水分子从各个角度散射入相机镜头^[20]. 对水下成像背景光的分析有助于我们研究它与其他参数的关系, 进而可估计出水体光学参数和相机-景物的距离, 这对于水下图像增强和水下3D场景重建非常有意义.

为了计算散射入相机镜头的背景光, 首先沿着相机视线将视角内小圆锥体分成厚度无穷小的薄片^[11,12]. 如图1所示, 距离相机 l 处的薄片所产生的背景散射光可以表示为

$$dB_\lambda^n(l, \Theta) = \beta_\lambda(\theta) E_\lambda(l, \Theta) \exp(-c_\lambda l) \times \frac{\pi \cos^3 \alpha}{4F_n^2} T_l \left[1 - \frac{F_l}{l}\right]^2 dl, \quad (3)$$

其中 $\Theta = (\theta, \varphi)$ 表示小散射体的方位与散射方向, θ 是散射角, φ 是景物反射面与相机视线的夹角,

$E_\lambda(l, \Theta)$ 表示环境光的光强, α 为相机成像角. 在仅有自然光照的情况下, 可以假设环境光光强近似不变, 这是因为水下光强在水下几米深的范围内和成像光波段内变化不大^[18], 这里我们将环境光简称为 E_n . 相机系统对背景光的影响由参数相机 F 值 F_n 、镜头透过率 T_l 和焦距 F_l 来决定.

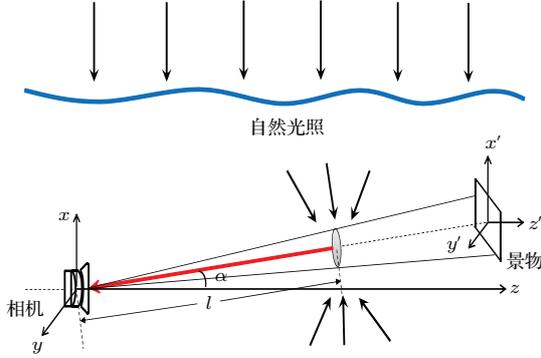


图1 (网刊彩色) 自然光照下的水下成像背景光光路图
Fig. 1. (color online) The background light of underwater imaging under natural illumination.

一般地, 相比于相机-景物距离 l , 焦距 $F_l \ll l$ ^[21], 因此 $1 - F_l/l \approx 1$. (3) 式可简化为

$$dB_\lambda^n(l, \Theta) = \beta_\lambda(\theta) E_n \exp(-c_\lambda l) \cos^3 \alpha \kappa_l dl, \quad (4)$$

其中

$$\kappa_l = \frac{\pi T_l}{4F_n^2} \quad (5)$$

是一个表征相机系统的参数, 它对于同一幅图像上的所有像素点来说是定值.

自然光照下的环境光是从各个方向照射在每一个小散射体上的, 计算背景光时必须考虑所有方向上产生的散射. 因此, 距离相机 z 处的背景光可以通过对 (4) 式从 $l = 0$ 到 $l = z$ 进行积分得到:

$$B_{\lambda,d,z}^n = \int_0^z \int_\Theta \beta_\lambda(\theta) E_n \exp(-c_\lambda l) \times \cos^3 \alpha \kappa_l dl d\Theta, \quad (6)$$

上式中下标 d 表示背景光的直接衰减部分.

在前面的建模中, 我们没有考虑前向散射对背景光的影响. 背景光的前向散射部分可以通过对 (4) 式中的散射光部分和水体点扩散函数 $g_\lambda(l)$ 进行卷积来计算^[11]:

$$B_{\lambda,f,z}^n = \int_0^z \int_\Theta g_\lambda(l) * [\beta_\lambda(\theta) E_n \cos^3 \alpha \kappa_l] dl d\Theta. \quad (7)$$

注意上式中在进行卷积前我们去掉了 (4) 式中的衰减因子, 因为 $g_\lambda(l)$ 中已经包含了衰减因子:

$$g_\lambda(l) = F^{-1} \{ [\exp(-G_\lambda l) - \exp(-c_\lambda l)] \times \exp(-K_\lambda f l) \}, \quad (8)$$

其中 G_λ 和 K_λ 是经验常数, f 是单位为 cycles/rd 的图像半径频率, F^{-1} 表示傅里叶逆变换.

自然光照下水下成像总的背景光可以表示为直接衰减背景光和前向散射背景光之和:

$$B_{\lambda,t,z}^n = B_{\lambda,d,z}^n + B_{\lambda,f,z}^n. \quad (9)$$

3.2 人工光照下的背景光

不同于自然光照下的背景光, 人工光照下的背景光是由特定方向上的光照射向小散射体并产生散射形成的, 这个特定方向即光源入射方向, 如图 2 所示.

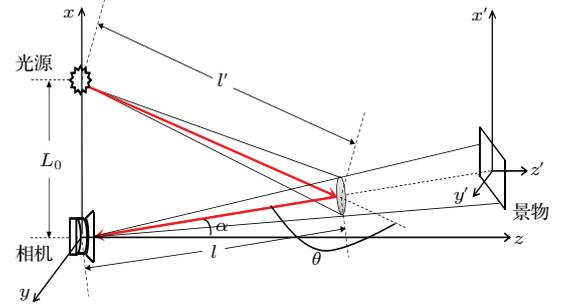


图2 (网刊彩色) 人工光照下的水下成像背景光光路图
Fig. 2. (color online) The background light under artificial lighting.

首先考虑被人工光源照射的一个小散射体 dV , 它接收到的光照度为

$$dE_\lambda = \frac{d\Phi_S}{dA} = \frac{I_\lambda}{l'^2} e^{-c_\lambda l'}, \quad (10)$$

其中 I_λ 是光源的发光强度, l' 是光源与小散射体之间的距离. 小散射体散射向相机的背景光可表示为

$$dJ_\lambda = dE_\lambda \beta_\lambda(\theta) dV. \quad (11)$$

忽略散射光传输至相机过程中水体的衰减与散射, 相机接收到的散射光可以表示为

$$dB_{\lambda,t}^a = \frac{I_\lambda \beta_\lambda(\theta) \pi \cos^3 \alpha}{l'^2} e^{-c_\lambda l'} \frac{T_l}{4F_n^2} \left[1 - \frac{F_l}{l} \right]^2 dl \approx \frac{\kappa_l I_\lambda \beta_\lambda(\theta) \cos^3 \alpha}{l'^2} e^{-c_\lambda l'} dl. \quad (12)$$

散射光从散射体传输至相机的过程中要再次经历衰减与散射. 衰减效应可以用水体的传输函数

来表示:

$$dB_{\lambda,d,l}^{\alpha} = dB_{\lambda,l}^{\alpha} e^{-c_{\lambda}l}. \quad (13)$$

对上式进行积分即可得到距离相机 z 处的直接衰减背景光:

$$B_{\lambda,d,z}^{\alpha} = \int_0^z \frac{\kappa_l I_{\lambda} \beta_{\lambda}(\theta) \cos^3 \alpha}{l'^2} e^{-c_{\lambda}(l+l')} dl. \quad (14)$$

值得注意的是, 参数 l' 和 θ 随着积分距离 l 的变化而变化, 它们都可以通过坐标关系由 l 、相机-光源距离 L_0 和成像角 α 计算得出. 成像角 α 对应图像上的像素点位置.

背景光的前向散射部分可通过对 (12) 式和水体的点扩散函数进行卷积来计算:

$$B_{\lambda,f,z}^{\alpha} = \int_0^z g_{\lambda}(l) * dB_{\lambda,l}^{\alpha}. \quad (15)$$

对 (14) 式与 (15) 式取和即可得到人工光照下总的背景光为

$$B_{\lambda,t,z}^{\alpha} = B_{\lambda,d,z}^{\alpha} + B_{\lambda,f,z}^{\alpha}. \quad (16)$$

从上式可以看出, 当求图像上某一个像素点的背景光时, 我们对 l 从 0 到相机-景物距离 z 积分即可. 而当 l 从 0 变为 z 的过程中, 必须分别计算散射角 θ 和光源-散射体距离 l' 的值, 计算较为复杂. 为了方便地计算水下成像的背景光, 下节我们将对该模型进行简化.

4 仿真与结果分析

上节中我们对自然光照和人工光照两种情况下的水下成像背景光进行了建模. 本节我们将通过计算机仿真计算, 分析这两种光照情况下的背景光的特点, 及其与水体光学参数、相机-光源-景物位置和相机成像角等参数之间的关系.

在进行仿真之前, 我们要对一些参数进行定义或假设. 在自然光照情况下, 假设环境光在成像光波段内和成像水域是不变的, 且设 $E_n = 1$ cd. 同样地, 设人工光源的发光强度在成像光波段内均为 1 cd. 相机的透射率 T_l 和 F 数分别设为 0.75 和 2.8, 相机的横向和纵向成像角均设为 20° .

水体的体散射函数 $\beta(\theta)$ 一般可表示为散射系数 b 和散射相函数 $\tilde{\beta}$ 的乘积, 即 $\beta(\theta) = b\tilde{\beta}(\theta)$. 散射相函数有许多不同的表示方法^[22-26], 在仿真中我们使用比较通用的 Fournier-Forand 相函数^[26]:

$$\tilde{\beta}(\theta) = \frac{1}{4\pi(1-\delta)^2\delta^v} \left[v(1-\delta) - (1-\delta^v) \right.$$

$$\left. + [\delta(1-\delta^v) - v(1-\delta)] \sin^{-2} \left(\frac{\theta}{2} \right) \right] + \frac{1-\delta^v}{16\pi(\delta_{\pi}-1)\delta_{\pi}^v} (3\cos^2\theta - 1), \quad (17)$$

其中

$$v = \frac{3-\mu}{2}, \quad \delta = \frac{4}{3(n-1)^2} \sin^2 \left(\frac{\theta}{2} \right), \quad (18)$$

这里 μ 是双曲线分布的斜率系数, n 是散射粒子相对于海水的折射率, δ_{π} 是 $\theta = \pi$ 时的 δ 值.

水体的衰减系数大小取决于不同的水体类型和光波长. 为了模拟 RGB 图像中红、绿、蓝三种颜色的背景光, 我们选择了 I 类海水中三个特定波长 700, 520 和 440 nm 处的衰减系数; 红、绿、蓝三种颜色的水体衰减系数分别为 0.086, 0.022 和 0.011 m^{-1} ^[27]; 取散射相函数中的斜率系数 $\mu = 3$, 粒子折射率 $n = 1.3$; 经验常数 G_{λ} 和 K_{λ} 根据参考文献^[11]来选取相应的值.

在水下成像过程中, 环境光的散射造成成像对比度的下降, 不同波长光的衰减造成图像的色偏, 前向散射则给图像造成模糊或光晕. 为了对模型进行简化, 在水下图像增强和图像复原的应用研究中, 往往假设前向散射对背景光的影响不大^[2,21]. 为了更好地分析无穷远处背景光与水体光学参数的关系以及距相机一定距离 z 处的背景光与无穷远处背景光的关系, 我们近似地认为散射光传输至相机的过程中仅受到光衰减的影响.

4.1 自然光照下无穷远处的背景光

所谓无穷远处的背景光, 就是假设景物距相机的距离为无穷大时, 在对应成像点上所产生的背景光. 无穷远处背景光的分析有助于研究水下图像的背景颜色, 还有助于从背景光的分析中估计水体光学参数和景物距相机的距离等. 对自然光照下背景光的表达式 (6) 进行进一步的积分可得到:

$$B_{\lambda,d,z}^n = B_{\lambda,d,\infty}^n [1 - \exp(-c_{\lambda}z)], \quad (19)$$

其中

$$B_{\lambda,d,\infty}^n = \frac{\kappa_l E_n \cos^3 \alpha}{c_{\lambda}} \int_{\Theta} \beta_{\lambda}(\theta) d\Theta \quad (20)$$

表示自然光照下无穷远处的背景光.

从 (20) 式可以看出, 无穷远处背景光 $B_{\lambda,d,\infty}^n$ 的大小与相机参数 κ_l 、环境光 E_n 成正比, 与衰减系数 c_{λ} 成反比, 另外还取决于图像上像素点位置 (对应于成像角 α). (20) 式中的积分项 $\int_{\Theta} \beta_{\lambda}(\theta) d\Theta$ 表

示在每一个小散射体上从所有方向上散射向相机镜头的散射光都贡献为背景光. 自然光照下的水下环境光由于漫散射效应分布比较均匀, 所以可近似假设散射角在 $0-\pi$ 范围内的散射光都对背景光有贡献. 基于以上分析, 并对比 (2) 式中散射系数 b_λ 的定义可发现, 积分项 $\int_{\Theta} \beta_\lambda(\theta) d\Theta$ 与散射系数 b_λ 近似成正比关系. 对单幅水下图像, 相机参数 κ_l 与环境光 E_n 对所有像素点是定值, 所以

$$B_{\lambda,d,\infty}^n \propto \frac{b_\lambda \cos^3 \alpha}{c_\lambda}, \quad (21)$$

也就是说, 某个像素点处的背景光强度与散射系数 b_λ 成正比, 与衰减系数 c_λ 成反比.

这一结论可用于通过水下雾化图像来估计水体光学参数. 如图 3(a) 所示的一幅从视频中提取的水下退化图像 [28], 我们用 Chiang 和 Chen [4] 的方法对其无穷远处背景光进行估计 [如图 3(b) 所示], 估计出的 $B_{\lambda,d,\infty}^n = [0.7686 \ 0.8392 \ 0.9333]$, 三个数字分别对应红、绿、蓝 (RGB) 值.

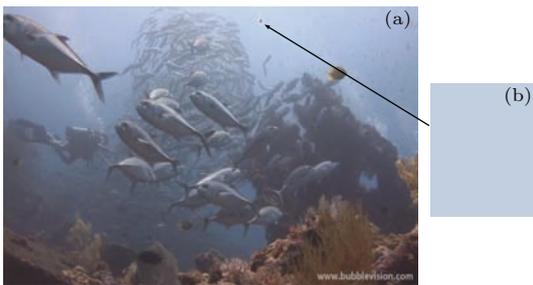


图 3 (网刊彩色) 水下退化图像和无穷远处背景光的估计 (a) 水下退化图像, 红色标记处为估计出的无穷远处背景光位置; (b) 无穷远处背景光的放大显示

Fig. 3. (color online) An underwater bluish image and the estimation of the global background light: (a) original image, which is extracted from a video of N. Hope [28], the patch marked as red is where we get the global background light; (b) blow up of the estimated global background light.

如果知道光学参数的一些先验条件, 利用 (21) 式和从水下图像中估计出的无穷远处背景光可以估计出水体的光学参数. 作为示例, 我们利用 Richard 提出的一个 I 类和 II 类海水中散射系数 b_λ 与光波长 λ 之间关系的物理模型, 即散射系数 b_λ 可近似表示为光波长 λ 的线性关系式 [17]:

$$b_\lambda = (-0.00113\lambda + 1.62517) b(\lambda_r), \quad (22)$$

其中 λ_r 是与测量设备有关的参考波长 (如文献 [17] 中是 555 nm). 选择波长 620, 540 和 450 nm 来表征

图像中 RGB 三种颜色 [29,30], 根据 (21) 和 (22) 式可得出 RGB 颜色通道的衰减系数比:

$$\frac{c_g}{c_r} = \frac{b_g B_{r,d,\infty}^n}{b_r B_{g,d,\infty}^n}, \quad (23)$$

$$\frac{c_b}{c_r} = \frac{b_b B_{r,d,\infty}^n}{b_r B_{b,d,\infty}^n}. \quad (24)$$

4.2 人工光照下无穷远处背景光

同样假设前向散射对背景光的影响很小, 那么人工光照下的背景光表达式如 (14) 式所示. 为了方便分析, 我们仅计算图像中心点, 即成像角 $\alpha = 0^\circ$ 时的处背景光. 相机-景物距离 z 的变化范围为 $0-3$ m, 衰减系数 c_λ 为 0.022 m^{-1} , 散射系数 b_λ 为 0.008 m^{-1} , 相机-光源距离 $L_0 = 0.1$ m, 并使用 (17) 式的散射相函数. 计算结果如图 4 所示. 可以看出背景光随相机-景物距离 z 的增大而指数增大, 并在某个距离上趋于一个极大值并保持稳定, 这个极大值对应于无穷远处背景光 $B_{\lambda,d,\infty}^n$.

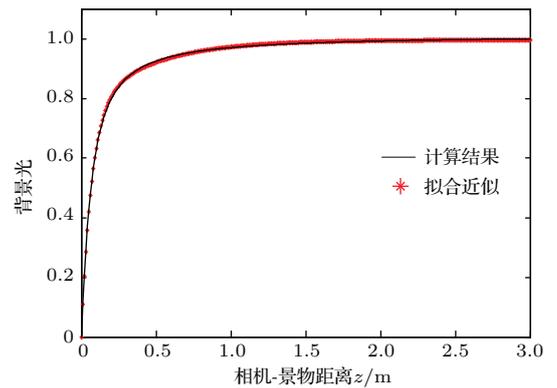


图 4 (网刊彩色) 人工光照下水下成像背景光随相机-景物距离 z 的变化

Fig. 4. (color online) The normalized background light under artificial lighting varies with the camera-scene distance z .

利用 (14) 式计算背景光虽然可行, 但是对于整幅图像的背景光计算量太大, 并不适用于图像背景光的仿真. 为了对模型进行简化, 首先考虑一种特殊的情况, 即相机-光源距离 L_0 相比于相机-景物距离 z 来说非常小, 在这种情况下可近似假设 $l' \approx l$. 另外, 在一般的水下成像中, 为防止产生较强的后向散射光, 光源的照射范围并不从相机镜头处开始. 设光源照射角与相机成像角首次交汇处距相机的距离为 z_0 , (14) 式变为

$$B_{\lambda,d,z}^n = \int_{z_0}^z \frac{\kappa_l I_\lambda \beta_\lambda(\theta) \cos^3 \alpha}{l'^2} e^{-c_\lambda(l+l')} dl. \quad (25)$$

当 z_0 较大时, 由于相机-光源距离 L_0 较小, 可假设 $l' \approx l$, 因此 (25) 式可近似表示为

$$B_{\lambda,d,z}^a \approx \kappa_l I_\lambda \cos^3 \alpha \int_{z_0}^z \frac{\beta_\lambda(\theta)}{l^2} e^{-2c_\lambda l} dl. \quad (26)$$

基于 (25) 和 (26) 式对背景光的计算结果如图 5 所示, z_0 分别为 0.4 和 0.6 m. z_0 的值越大, 假设 $l' \approx l$ 造成的误差越小, 利用近似表达式 (26) 计算对结果的影响越小.

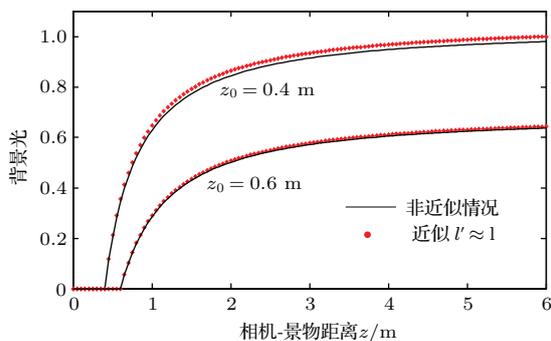


图 5 (网刊彩色) 人工光照条件下基于 (25) 和 (26) 式对背景光的计算结果

Fig. 5. (color online) The calculation results of the background light under artificial lighting using equations (25) and (26).

对图 5 中的曲线进行拟合分析, 并对 (26) 式进行数值求解得到人工光照下的背景光可近似表示为一种更简单的形式:

$$B_{\lambda,d,z}^a \approx B_{\lambda,d,\infty}^a \{1 - \exp[-k_\lambda(z - z_0)]\}, \quad (27)$$

其中 k_λ 是衰减因子, 它的值不仅与衰减系数 c_λ 与散射系数 b_λ 有关, 还与 z_0 有关. 作为 $z_0 = 0$ 时的一种特殊情况, (14) 式也可近似表示为 (27) 式的形式. 图 4 中红色星标线是根据拟合出的表达式所绘制的近似曲线, 与直接计算结果非常接近. 对比 (19) 式可知, 人工光照下的背景光同样可近似表示为类似于自然光照下的背景光的简洁形式, 这极大地简化了背景光的计算.

类似于自然光照下的情况, 我们研究了人工光照下的无穷远处背景光与水体光学参数的关系. 根据 (14) 式, 计算图像中心点, 即成像角 $\alpha = 0^\circ$ 时的无穷远处背景光, 散射系数 b_λ 为 0.008 m^{-1} , 相机-光源距离 $L_0 = 0.1 \text{ m}$, 衰减系数的变化范围设为 $0.01\text{--}0.1 \text{ m}^{-1}$. 仿真结果如图 6 所示. 在结果显示中, 用无穷远处背景光的最大值对其进行标准化. 可以看出 $B_{\lambda,d,\infty}^a$ 随衰减系数的增大而减小. 这是因为较大的衰减系数会产生更多的散射光衰减,

并且大的衰减系数往往伴随着小的散射系数, 比如红光波段. 水下图像往往会呈现蓝色色调, 这也是因为蓝光的衰减系数较小而散射系数较大, 所以蓝光波段的无穷远处背景光较其他光波段强.

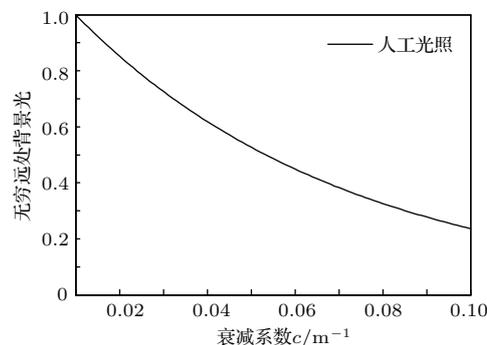


图 6 人工光照下无穷远处背景光随衰减系数 c 的变化

Fig. 6. The normalized global background light under artificial lighting varies with the attenuation coefficient c .

水下成像时, 相机-光源的距离 L_0 也会对背景光的强度产生影响. 根据 (14) 式, 我们计算了 L_0 变化时无穷远处背景光的变化情况, 结果如图 7 所示. 从图 7 可以看出, 人工光照下的无穷远处背景光随相机-光源距离 L_0 的减小而迅速增强. 这是因为当光源离相机较近时, 更多的散射光线经过较短距离的衰减就进入相机镜头. 在设计水下成像系统时, 必须选择合适的相机-光源距离, 防止背景光过大.

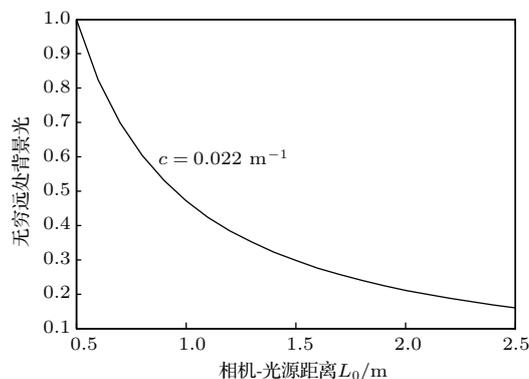


图 7 人工光照下无穷远处背景光随相机-光源距离 L_0 的变化

Fig. 7. The normalized global background light under artificial lighting varies with the camera-source distance L_0 .

4.3 整幅图像的背景光

对自然光照下水下成像背景光的计算分为三步, 首先利用 (20) 式计算出无穷远处的背景光 $B_{\lambda,d,\infty}^n$, 然后利用 (19) 式计算不同 z 处直接衰减的

背景光,再利用(7)式计算前向散射背景光,最后将两种背景光相加.人工光照下背景光的仿真与自然光照下类似,仿真结果如图8所示.对于两种光照情况,相机-景物的距离都设为从下到上0—7 m线性变化.可以看到,RGB图像的背景光呈现蓝色.这是因为蓝光的衰减系数较小而散射系数较大,造成了更强的散射光进入相机镜头.另外,人工光照下的背景光分布比较均匀,而自然光照下的背景光随相机-景物距离和相机视场角的变化较为剧烈.这表明自然光照下的背景光受相机-散射体这一传输过程中的光衰减影响较大.

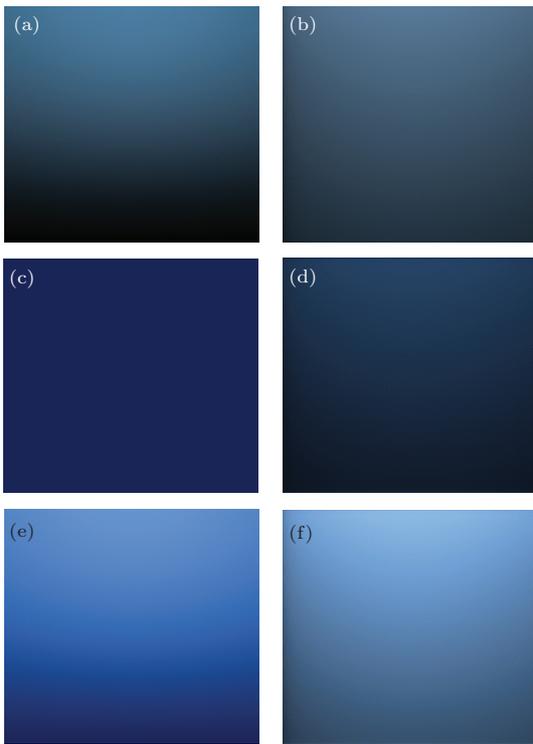


图8 (网刊彩色) 自然光照下的水下成像背景光(a)–(c)与人工光照下的水下成像背景光(d)–(f) 从上到下依次为直接衰减的背景光、前向散射背景光和总的背景光

Fig. 8. (color online) The background light of underwater imaging under natural illumination (a)–(c) and artificial lighting (d)–(f). The images from top to bottom are direct attenuation background light, forward scattering background light and total background light.

5 结 论

本文中通过建模和计算机仿真分析了水下成像中背景光的形成及其与其他参数的关系.我们对自然光照和人工光照这两种光照下的水下成像背景光均进行了建模.基于所建立的物理模型,分析

了背景光与水体光学参数、相机-光源-景物空间位置、相机参数和相机成像角等参数之间的关系.

无穷远处背景光的分析对于研究水下图像背景颜色、估计水体光学参数、估计景深等都非常有意义.基于对模型的分析,得出自然光照下的无穷远处背景光与散射系数成正比、与衰减系数成反比的结论;人工光照下的无穷远处背景光强度不仅与水体光学参数有关系,还与相机-光源的距离有关系.通过进行合理的假设,得出了两种光照条件下背景光的简化表达式,极大地方便了对背景光的计算和分析.

对背景光图像的仿真结果表明,可以通过合理布局相机-光源-景物的位置来减小背景光对成像的影响,减小光源和相机的距离,尽量使光源更接近被摄景物.本文的建模和仿真结果有助于研究如何提高水下成像系统的性能和水下图像成像质量.此外,无穷远处背景光与其他参数,如水体光学参数的关系可以用来估计水体光学参数和相机-景物的距离,进而可用于水下图像增强和3D场景重建.

参考文献

- [1] Schettini R, Corchs S 2010 *EURASIP J. Adv. Sig. Pr.* **2010** 1
- [2] Treibitz T, Schechner Y Y 2009 *IEEE Trans. Pattern Anal.* **31** 385
- [3] Cao N W, Liu W Q, Zhang Y J 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 61 (in Chinese) [曹念文, 刘文清, 张玉钧 2000 物理学报 **49** 61]
- [4] Chiang J Y, Chen Y C 2012 *IEEE Trans. Image Process.* **21** 1756
- [5] Yu Y, Liu F 2007 *Opt. Eng.* **46** 116002
- [6] Sun Z G, Han C Z 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 998 (in Chinese) [孙增国, 韩崇昭 2010 物理学报 **59** 998]
- [7] Chen S J, Hu Y H, Sun D J, Xu S L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 204201 (in Chinese) [陈善静, 胡以华, 孙杜娟, 徐世龙 2013 物理学报 **62** 204201]
- [8] Oakley J P, Satherley B L 1998 *IEEE Trans. Image Process.* **7** 167
- [9] Narasimhan S G, Nayar S K 2002 *Int. J. Comput. Vision* **48** 233
- [10] Sun B, Hong J, Sun X B 2014 *Chin. Phys. B* **23** 094201
- [11] McGlamery B L 1980 *Proceedings of Ocean Optics VI. International Society for Optics and Photonics Monterey, USA, October 23, 1979* p221
- [12] Jules S J 1990 *IEEE J. Oceanic Eng.* **15** 101
- [13] Palowitch A W, Jules S J 1991 *Int. Soc. Opt. Photon.* **128**
- [14] Gordon H R 1989 *Limnol. Oceanogr.* **34** 1389

- [15] Spinrad R W, Carder K L, Perry M J 1994 *Ocean Optics* (Oxford: Oxford University Press) pp 56–58
- [16] Morel A 1974 in Jerlov N G, Steeman Nielsen ed. *Optical Aspects of Oceanography* (New York: Academic) pp1–24
- [17] Gould Jr R W, Arnone R A, Martinolich P M 1999 *Appl. Opt.* **38** 2377
- [18] Mobley C D 1994 *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters* (San-Diego: Academic Press) pp 212–213
- [19] Lewis M R, Wei J, Dommelen R V, Voss K J 2011 *J. Geophys. Res. : Oceans* **116** C7
- [20] Narasimhan S G, Nayar S K 2002 *Int. J. Comput. Vision* **48** 233
- [21] Schechner Y Y, Karpel N 2004 *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* Washington, DC, USA June 27–July 2, 2004 p I-536
- [22] Henyey L G, Greenstein J L 1941 *Astrophys. J.* **93** 70
- [23] Kattawar G W 1975 *J. Quant. Spectrosc. Ra.* **15** 839
- [24] Haltrin V I 2002 *Appl. Opt.* **41** 1022
- [25] Fournier G R, Forand J L 1994 *Proceedings of Ocean Optics XII. International Society for Optics and Photonics* Bergen, Norway, June 13, 1994 p194
- [26] Fournier G R, Jonasz M 1999 *Proceedings of SPIE's International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation* Denver, CO, USA, July 18, 1999 p62
- [27] Jerlov N G 1968 *Optical Oceanography* (Amsterdam: Elsevier) pp153–155
- [28] Hoop N <http://www.bubblevision.com> [2014-10-4]
- [29] Tan K K, Oakley J P 2001 *J. Opt. Soc. Am. A* **18** 2460
- [30] Susstrunk S E, Holm J M, Finlayson G D 2001 *Proceedings of SPIE 4300, Color Imaging: Device-Independent Color, Color Hardcopy, and Graphic Arts VI* San Jose, CA, USA, December 21, 2000 p172

Modeling and simulation of the background light in underwater imaging under different illumination conditions*

Zhao Xin-Wei Jin Tao[†] Chi Hao Qu Song

(Department of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(Received 4 October 2014; revised manuscript received 26 December 2014)

Abstract

The underwater visibility is very important in underwater vision research and target detection. However, most underwater vision systems cannot guarantee to possess the performance under complex water conditions. This is because underwater images are usually degraded by light-water interactions of absorption and scattering. The ambient light is scattered into the camera's line of sight by water molecules and suspended particles in the water medium, which adds a layer of haze to the image and reduces the contrast of the image. This part of scattered light is usually called background light, which is the main reason for underwater image degradation. In this paper, the formations of background light in underwater imaging under two different lighting conditions: natural illumination and artificial lighting, are analyzed by setting up physical models. The models developed include the parameters such as camera parameters, light source parameters, inherent optical properties, and camera-source-object geometry. Based on the models, the relationship between the background light and the above parameters is studied. Computer analysis shows that the global background light under two illumination conditions has a close relationship between the inherent optical properties of water medium and camera parameters. The global background light under natural illumination is proportional to the scattering coefficient and inversely proportional to the attenuation coefficient. The background light under the two illumination conditions both can be described in simple exponential falloff expressions of the global background light. The simple expression greatly reduces the computational complexity of simulations. The intensity of background light mainly depends on the inherent optical properties, camera-scene distance, camera-source distance and camera's imaging angle. The relationship between the global background light and the inherent optical properties can be used to estimate the attenuation coefficient, scattering coefficient and scene depth information. The result of this paper can be very useful for designing and improving the underwater imaging systems.

Keywords: oceanic optics, underwater imaging, scattering, background light

PACS: 42.68.Xy, 07.05.Tp, 43.30.Ft, 43.30.Pc

DOI: [10.7498/aps.64.104201](https://doi.org/10.7498/aps.64.104201)

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB315703) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61275027, 61177003).

[†] Corresponding author. E-mail: jint@zju.edu.cn