

文章编号:1004-4213(2011)07-1061-5

水下光学监控系统照明方式的研究

张法全¹, 王国富¹, 叶金才¹, 刘庆华¹, 陈良益²

(1 桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

摘要:提出了一种确定水下光学监控系统中照明光源方向角和安装位置的方法. 利用光在水中的传输特性, 分析了传输距离、体积散射函数、散射角和小体积元的影响, 以及照明光源不同方向角产生的不同照明效果. 据此提出了光源方向角的确定原则, 即在满足监控区域要求的前提下, 照明光源的方向角应该选取散射角最大的方向. 在视场角为 45° 时, 光源方向角应为 67.5° . 根据监控范围边界的要求以及光源方向角, 确定光源安装位置. 实际应用结果表明, 此方法可以很好地满足水下光学监控系统的要求.

关键词:海洋光学; 水下照明; 体积散射函数; 散射角; 方向角

中图分类号: P341

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114007.1061

0 引言

水下光学监控系统广泛应用于海洋生物研究、海流测量、水下科学试验监控和测量、水下安全防护等领域, 能代替潜水员在深海和极其恶劣的环境中长时间执行任务, 是目前监控水下环境、获取即时清晰图像的主要方法^[1-3]. 水对光有明显的衰减作用, 水下的可见度很低, 因此需要辅助照明系统^[4-6]. 大部分水下光学系统都是由携带水下电视的水下机器人组成, 可以运动到指定的目标处进行监控, 照明系统通常安装在水下机器人上. 文献[7]研究了目标位置固定且已知, 光源配置的不同角度对目标图像质量的影响. 但是当监控目标出现的时间和方位事先无法确定时, 只能对监控区域进行全方位、全天候监控, 当光线不足时, 需要增加照明设备, 光源的安装位置和方向角对监控效果至关重要. 本文研究了水下监控系统照明光源方向角和光源安装位置的确定, 研究结果为水下监控系统中照明光源和成像系统的合理配置提供了依据.

1 常用的水下照明方式

图1是在目标已知的情况下常用的照明方式, 把照明灯尽可能地靠近被摄物体并加大照射角度, 由于照明灯靠近被摄物体, 所以引起的散射很小; 同时照射角度大, 进入到摄像机镜头的散射光少, 被摄物体的反射光强, 因此可以得到对比度良好的图像.

当监控对象出现的时间和方位事先无法确定时, 这种照明方式无法满足应用要求.

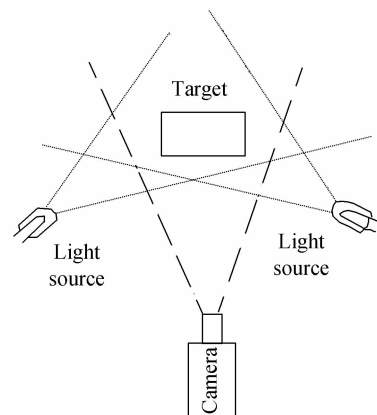


图1 常用的水下照明方式

Fig. 1 The commonly used underwater lighting style

由体积散射函数可知, 一束光入射到散射物质(如海水)的小体积上时, 其能量将分布在一个很宽的角度范围内, 散射光的强度随散射角变化的函数关系在很多问题中都十分重要.

如图2, 考虑一个小的体积元 dV , 散射光的强

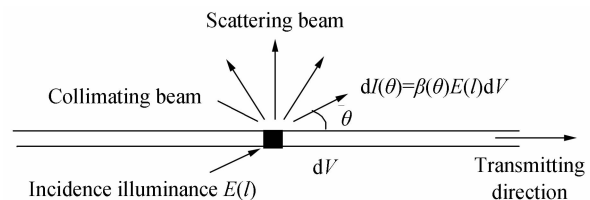


图2 体积散射函数示意图

Fig. 2 Schematic graph of volume scattering function

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60337030)和桂林电子科技大学博士基金(No. UF10006Y)联合资助

第一作者: 张法全(1969-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为机器视觉、水下光学信息处理和模式识别. Email: zhangfq@guet.edu.cn

收稿日期: 2010-12-31; 修回日期: 2011-03-07

度是极坐标角 θ 、 φ 的函数,其中 φ 是在垂直于光束的平面内量度,散射光的强度对于角 φ 是完全对称的,因而仅仅是角 θ 的函数.在 θ 方向散射光强度与入射照度 $E(l)$ 的关系式为

$$dI(\theta) = \beta(\theta)E(l)dV \quad (1)$$

式中 $\beta(\theta)$ 称为体积散射函数^[8],表示散射光的角分布,单位是 $\text{m}^{-1} \cdot \text{Sr}^{-1}$.因海水成分复杂,不同海域的水质各不相同,且都随机变化,所以体积散射函数 $\beta(\theta)$ 很难找出统一的解析函数形式,一般由实验给出^[9],如表 1.

表 1 水的特性参量

Table 1 Characteristic parameters of water

$\theta/(\circ)$	$\beta(\theta)$	$\theta/(\circ)$	$\beta(\theta)$	$\theta/(\circ)$	$\beta(\theta)$
0	4910	70	2.09	140	0.851
10	411	80	1.38	150	0.995
20	84.4	90	1.00	160	1.27
30	27.6	100	0.832	170	1.79
40	11.5	110	0.777	180	1.97
50	5.71	120	0.758		
60	3.31	130	0.776		

从表 1 中可以看出,散射光的角分布特性为:有强烈的前向散射,后向散射比前向散射小.

2 水下光学监控系统的照明方式

针对水下光学监控系统的特点,根据光在水中的传输特性,结合实际使用效果,采用在可视距离末端处设置一个线光源,照亮监控区域的最末端水域,形成一片光幕,利用水对光的散射作用,在摄像机镜头与光幕之间形成光的渐变区域^[10-11].当有运动目标从中间穿过时,会因遮挡作用在图像中形成阴影,根据阴影判断是否需要报警,实现监控功能.

2.1 理论分析

根据水下光线的传输原理,距离光源 l 处的垂直入射光照度 $E(l)$ 可以看成是由直射部分 $E_D(l)$ 和散射部分 $E_S(l)$ 组成^[12]

$$E(l) = E_D(l) + E_S(l) \quad (2)$$

直射部分 $E_D(l)$ 由式(3)给出

$$E_D(l) = \frac{I}{l^2} e^{-\alpha l} \quad (3)$$

式中 I 、 α 分别为所考虑方向上的光源强度和体积衰减系数.照度的散射部分 $E_S(l)$ 可用 Duntley 导出的一个半经验公式来估算

$$E_S(l) = \left(2.5 - 1.5 \lg \frac{2\pi}{\varphi} \right) \cdot \left[1 + 7 \left(\frac{2\pi}{\varphi} \right)^{1/2} e^{-kl} \right] \cdot \frac{I k e^{-kl}}{4\pi l} \quad (4)$$

式中 φ 、 k 分别为光源光束的发散角、散射光的衰减

系数,并假设照度的散射部分是沿着光束轴向测量的.

由式(2)~(4)可以计算出摄像机视场右边缘处的照度,变化曲线如图 3.随着距离的增加,照度与光源光强的比值迅速下降.

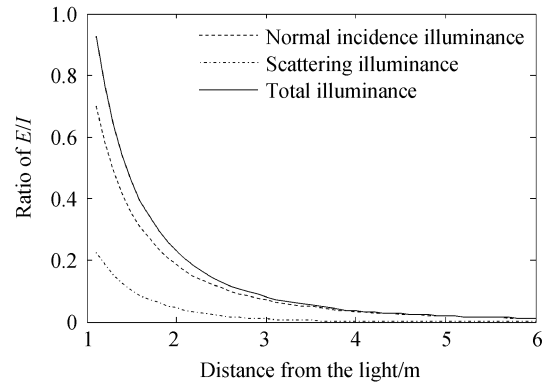


图 3 与光源不同距离处水下照度的变化曲线
Fig. 3 Curve of underwater illuminance on different distance from the light source

在图 4 所示的光源位置示意图中,以坐标原点 O 处的摄像机作为研究对象. l 为沿光源方向上某位置处小体积元 dV 与光源的距离, φ 为光源光束的全张角,应选择全张角较小的光源, h 为光源与摄像机的距离, θ 为小体积元处的散射角, r 为摄像机与小体积元的距离,即 O 点到光源中心线的距离, u 为光源方向角.根据监控区域的要求,光源发出的照明光应能覆盖摄像机的整个视场,即光线应能到达图中虚线处.对于虚线处某一固定点而言,当光源方向角 u 确定后,光源的位置就确定了,因此主要讨论如何确定光源方向角 u .

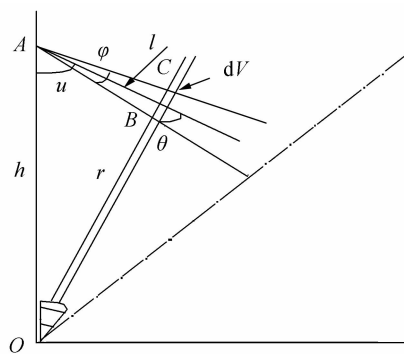


图 4 光源位置示意图

Fig. 4 Schematic graph of the light's position

根据图 4 的几何关系,散射角 θ 与光源方向角 u 的关系可推导为

$$r = \sqrt{h^2 + l^2 - 2hl \cos u} \quad (5)$$

$$\sin \theta = \sin(\pi - \theta) = \frac{h \sin u}{r} \quad (6)$$

当 θ 、 l 、 h 确定后,光源方向角 u 也就确定了.

水下摄像机的 CCD 像元尺寸为 $8.3 \mu\text{m} \times$

8.3 μm ,根据成像关系,对应小体积元 dV 近似为长方体,其底面边长为

$$a = 8.3 \times 10^{-3} \times \frac{h}{l'} \quad (7)$$

式中 l' 为像距,高 d 由 l 和 φ 决定.在图 4 的三角形 ABC 中,由正弦定理可以求出

$$d = l \frac{\sin \theta \sin \varphi}{\sin(\theta - \varphi/2) \sin(\theta + \varphi/2)} \quad (8)$$

在右边界顶点 B 处,小体积元的体积随散射角的变化曲线如图 5.随着 B 点处散射角 θ 的增大,小体积元的体积由 $6.2 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ 减小到 $3.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3$.

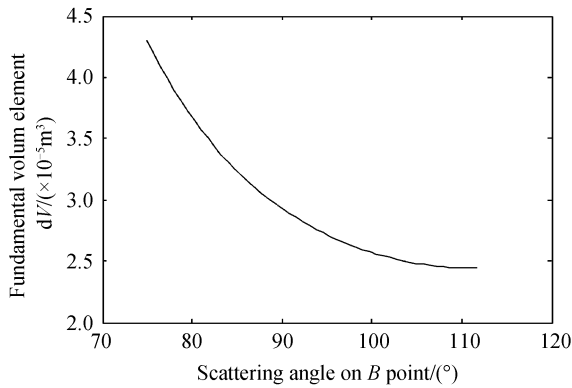


图 5 B 点处小体积元随散射角的变化曲线
Fig. 5 Curve of fundamental volume element dV with scattering angle on B point

由于表 1 只给出了特定散射角 θ 对应的体积散射函数,两者都是离散量,但左边界顶点 A 沿左边界变化时,引起 B 点处散射角 θ 的变化是连续的,因此需要插值运算.经过对数据的趋势观察,选用效果较好的样条插值算法,图 6 给出了体积散射函数的样条插值结果.为清楚起见,只显示散射角为 40° 至 180° 的插值结果.

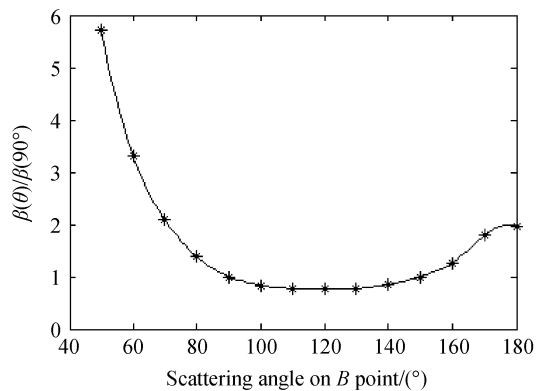


图 6 体积散射函数的样条插值结果
Fig. 6 Spline interpolation of volume scattering function on B point

由式(1)可以计算出 B 点处小体积元 dV 的出射光强,由于小体积元 dV 的照度是光源光强的函数,因此图 7 给出的是出射光强与光源光强的比值.

从图 7 中可以看出,随着 B 点处散射角的增

大,出射光强逐渐增大.因此可以确定:对于水下监控系统,在满足监控区域的前提下,照明光源的方向角应该选取散射角较大的方向.散射角越大,体积散射函数取值越小,则在摄像机方向的散射光越少,更有利于减少散射光对成像的影响,提高成像质量.

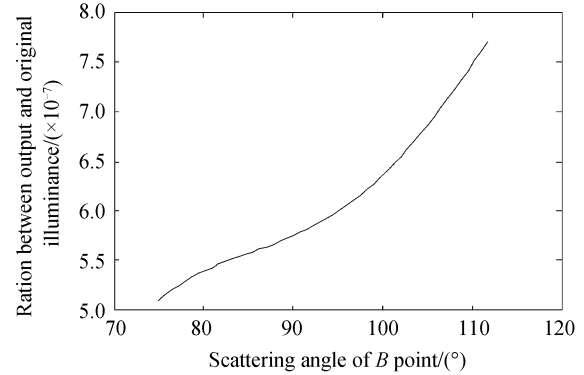


图 7 出射光强与入射光强的比值变化曲线
Fig. 7 Ratio curve between output illuminance and original lighting illuminance on B point

2.2 实际应用验证

光源方向角的三种不同情形如图 8,位置 B 是监控区域的右边界顶点,位置 A_1 是左边界顶点,即 OA_1B 所示的三角区域是监控范围,且 $OB = OA_1 = a$,此时光源方向角为 u_1 ,而 $\angle A_1OB = 45^\circ$,故 $u_1 = 67.5^\circ$; A_2B 与 OB 相垂直, $u_2 = 45^\circ$; A_3 是超过垂直状态的任一位置,此处取为 $u_3 = 30^\circ$.三种情形下光源需要传输距离分别为 $l_1 = 0.765a$, $l_2 = a$, $l_3 = 1.414a$.在 B 点处各自对应的散射角分别为: $\theta_1 = 112.5^\circ$, $\theta_2 = 90^\circ$, $\theta_3 = 75^\circ$.随着 A_1 向 A_3 移动,光源方向角由 u_1 逐渐缩小为 u_3 .

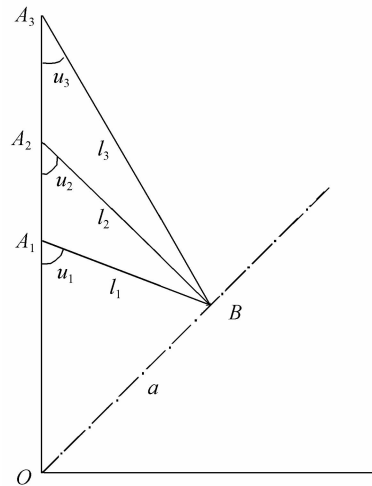


图 8 光源方向角的三种不同情形
Fig. 8 Three different cases of light directional angle

根据监控系统的要求,监控距离 $a = 5 \text{ m}$.当监控区域的右边界顶点 B 固定,左边界顶点从 A_3 变化到 A_1 时, B 点处的散射角从 75° 变化到 112.5° .

本系统主要研究水下监控的问题,要求监控范

围越大越好,对于原点 O 与 A_1 之间的任何位置,与 B 点和原点 O 构成的三角形面积,都比 A_1 和 A_3 之间的位置与 B 点及原点 O 构成的三角形面积要小,因此本系统不考虑原点 O 与 A_1 之间的位置。

实际应用中分别选取了图 8 中所示的三个位置进行测试.当光源位于 A_3 位置时,光源方向角取 30° ,由于传输距离变为 $1.414a=7.07\text{ m}$,光强衰减很大,以至于图像很黑,几乎看不到任何目标.当光源位于 A_2 位置时,光源方向角取 45° ,如图 9(a),虽然照度较低,但已能分辨出目标.当光源位于 A_1 位置时,光源方向角取 67.5° ,如图 9(b),目标比较清晰可见。

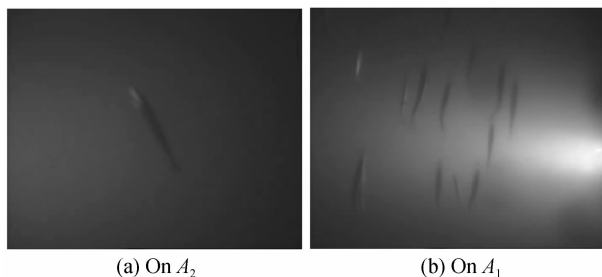


图 9 光源位于 A_2 和 A_1 位置时图像

Fig. 9 Image when the light is on A_2 and A_1

因此,本系统选择图 9(b)中 A_1 所示的位置,光源方向角取为 67.5° 。

根据图像质量评价方法^[13-14],分别计算两幅图像的亮度 I 和视觉信噪比 $HVSNR$,可以得到:图 9(a)中, $I=48.21$, $HVSNR=12.4$;图 9(b)中, $I=108.68$, $HVSNR=25.7$.采用本系统提出的选择原则,安装光源位置和光源方向角,得到的图像亮度提高 2.25 倍,视觉信噪比提高 2.07 倍。

3 结论

分析了水下光学监控系统的特点,指出了常用照明系统不适合水下光学监控系统.提出了水下监控系统照明光源方向角的选择原则:在满足监控区域要求的前提下,照明光源的方向角应该选取散射角较大的方向.在视场角为 45° 时,光源方向角应为 67.5° .根据监控范围的边界点和光源方向角,确定光源的安装位置.研究结果已应用于某大型国际赛事的水下安保工作中,获取的图像亮度为 108.68,视觉信噪比为 25.7,视觉效果良好,为人工监控提供了良好条件,对于利用计算机进行图像处理及模式识别等工作奠定了基础.研究结果可以指导水下照明光源的设计和实际安装,减少大量试验费用,达到最佳照明效果.在实际应用中还可以考虑光源强度的选择问题。

参考文献

- [1] WEIDEMANN A, FOURNIER G R, FORAND L, *et al.* In harbor underwater threat detection/identification using active imaging[C]. *SPIE*, 2005, **5780**: 59-71.
- [2] CELLA U, CHIFFINGS T, GANDELLI A, *et al.* Advanced monitoring systems for biological applications in marine environments[C]. *SPIE*, 2006, **6416**: 64160T-1.
- [3] CHUNG W, CRESPI V, CYBENKO G. Distributed sensing and UAV scheduling for surveillance and tracking of unidentifiable targets[C]. *SPIE*, 2005, **5778**: 226-235.
- [4] JAFFE J S. Enhanced extended range underwater imaging via structured illumination[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(12): 12328-12340.
- [5] ZHU Cai-xia, YAN Ya-dong, YU Wen-de, *et al.* Underwater low light level imaging system [J]. *Ship Science And Technology*, 2007, **29**(6): 56-58.
朱彩霞, 闫亚东, 余文德. 水下微光成像系统[J]. 舰船科学技术, 2007, **29**(6): 56-58.
- [6] LIU Guang-rong, HUANG Rui, JIN Wei-qi, *et al.* Recent development in underwater imaging technique [J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(6): 732-737.
刘广荣, 黄睿, 金伟其, 等. 水下探测光电成像技术及其进展[J]. 光学技术, 2004, **30**(6): 732-737.
- [7] ZHANG Li, SUN Chuan-dong, HE Jun-hua. Impact of light source angle on imaging quality of underwater imaging systems [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, **31**(4): 579-583.
张利, 孙传东, 何俊华, 等. 光源角度配置对水下成像图像质量影响的研究[J]. 应用光学, 2010, **31**(4): 579-583.
- [8] ZHANG Jian-sheng. The development and measurement of ship wake optical specialty [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2001.
张建生. 尾流的光学特性研究与测量[D]. 西安:中国科学院西安光学精密机械研究所, 2001.
- [9] SUN Chuan-dong, CHEN Liang-yi, GAO Li-ming, *et al.* Water optical properties and their effect 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.
- [10] ZHENG Cheng-dong, WENG Yan-sheng, LIU Xi-zhan. The optical monitor system of anti-phobic raid underwater[C]. *SPIE*, 2009: 73824M1-7.
- [11] TELEM G, FILIN S. Photogrammetric modeling of underwater environments [J]. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010, **65**(5): 433-444.
- [12] SUN Jing-hua, SHANG Shou-ting, SANG En-fang, *et al.* Theoretical analysis of the contrast of image under water [J]. *Journal Harbin Institute of Technology*, 2004, **36**(4): 460-462.
孙晶华, 尚寿亭, 桑恩方, 等. 水下影像衬度的理论分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, **36**(4): 460-462.
- [13] XU Lu-an, YE Mao-dong, ZHANG Qi. New method to evaluate image quality [J]. *Computer Engineering and Design*, 2004, **25**(3): 418-420.
徐鲁安, 叶懋冬, 章琦. 一种新的图像质量评价方法[J]. 计算机工程与设计, 2004, **25**(3): 418-420.
- [14] WANG Ti-sheng, GAO Xin-bo, LU Wen, *et al.* A new method for reduced-reference image quality assessment [J]. *Journal of Xidian University*, 2008, **35**(1): 101-104.
王体胜, 高新波, 路文, 等. 一种新的部分参考型图像质量评价方法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2008, **35**(1): 101-104.

Lighting Pattern of Underwater Optical Monitoring System

ZHANG Fa-quan¹, WANG Guo-fu¹, YE Jin-cai¹, LIU Qing-hua¹, CHEN Liang-yi²

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

(2 *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

Abstract: A method to determine directional angle of light source and installation location was proposed. Using transmission characteristics of underwater rays of light and considering transmission distance, volume scattering function, scattering angle and the small volume unit, the illuminating effect of various directional angle of the light source were analyzed. The selection principle of directional angle of the light source was proposed. It was that when meeting the requirements of the monitoring area, directional angle of the light source should be chosen to make the scattering angle maximum. When the view field angle was 45° , directional angle of the light source should be 67.5° . According to the boundary of the monitoring area and directional angle of the light source, the installation location of the light source was determined. The real results show that the system can meet the requirements of monitoring and has good effect.

Key words: Ocean optics; Underwater Illumination; Volume scattering function; Scattering angle; Directional angle