



DOI: 10.12086/oe.2018.170553

基于彩色 CCD 相机的船舶夜航 光环境亮度测量

黄 成, 朱金善*, 李志荣, 朱景林

大连海事大学航海学院, 辽宁 大连 116026

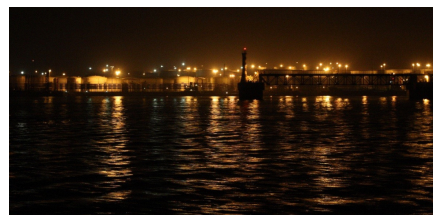
摘要: 为了更好地测量船舶夜航光环境, 从而为评价船舶夜航光环境、减小对船舶夜航安全的影响奠定基础, 提出了一种利用彩色 CCD 相机测量海上光环境亮度的方法: 以相机成像原理为基础推导亮度与相机参数的关系式, 设计色度标定实验拟合出数字图像三刺激值与标准 RGB 的关系式, 亮度标定实验拟合出关系式中的未知参数, 然后确定亮度测量公式。选取大连新港油轮码头水域对测量公式进行实例验证, 结果表明该方法测量船舶夜航光环境亮度是可行的, 并且具有较高精度。

关键词: 光环境; 船舶夜航; 彩色相机; 亮度测量; 海上光污染

中图分类号: TH741

文献标志码: A

引用格式: 黄成, 朱金善, 李志荣, 等. 基于彩色 CCD 相机的船舶夜航光环境亮度测量[J]. 光电工程, 2018, 45(7): 170553



Brightness measurement of ships navigation at night based on color CCD camera

Huang Cheng, Zhu Jinshan*, Li Zhirong, Zhu Jinglin

Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China

Abstract: In order to measure the light environment of the ships navigation at night better, so as to lay the foundation for the evaluation of the light environment of the ships navigation at night and reduce the impact on the safety of the ship's navigation at night, a method of measuring the brightness of the sea light environment by a color CCD camera was proposed. Based on the principle of imaging, the relationship between brightness and camera parameters was deduced and the chromaticity calibration experiment was used to fit the relationship between the three-stimulus value and the standard RGB. The brightness calibration experiment fits out the unknown parameters in the formula and then the brightness measurement formula was determined. The port of Dalian Newport cruise terminal was chosen to verify the measurement formula. The results show that the method can measure the brightness of the light environment of the ships navigation at night, which has high precision.

Keywords: light environment; ships navigation at night; color camera; brightness measurement; light pollution at sea

Citation: Huang C, Zhu J S, Li Z R, *et al.* Brightness measurement of ship navigation at night based on color CCD camera[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(7): 170553

收稿日期: 2017-10-19; 收到修改稿日期: 2018-04-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51309043)

作者简介: 黄成(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事水上交通安全保障的研究。E-mail: 18042680940@163.com

通信作者: 朱金善(1971-), 男, 教授, 主要从事航海技术的教学与研究工作。E-mail: zjinshan888@126.com

1 引言

随着照明技术的快速发展与广泛应用,船舶夜航光环境发生了巨大的变化。滨海城市景观灯光亮化进程的加快、海上夜间作业船舶的日益增多以及跨海大桥夜景灯光的滥用等,致使这些水域及其附近的船舶夜航光环境质量越来越差,进而形成海上光污染^[1-2]。作为船舶夜间通航环境的重要组成部分,良好的光环境是保障船舶夜航安全的重要因素之一。

目前由于缺乏相关指导和控制海上光环境评价的法律法规,导致许多船舶通航水域附近的光环境受到严重污染,从而造成船舶夜航安全无法得到保障。因此,为减轻海上光污染对船舶夜航安全的影响,制定一套船舶夜航水域光环境评价标准已成为迫在眉睫的工作,而标准制定的前提则是对船舶夜航光环境进行科学、精确的测量。目前对于光环境测量的研究大多集中在生活居住区和道路照明^[3-5],测量工具多为传统的亮度计、照度计及色度计,这些工具在测量视野广阔的区域亮度时需要逐点测量,耗时费力且精度不高。虽然数码成像式亮度计能便捷准确地测量出光环境的亮度分布,但由于其昂贵的价格导致普及性较低^[6-7]。彩色 CCD 相机能获取视场内所有光源的基本光度、色度信息,并且具有测试范围广、携带轻便、使用简单和性价比相对较高等优点^[8],在陆上光电研究方面已得到广泛应用^[9-10]。因此,本文拟通过实验模拟变化的光环境,利用光度学、色度学原理对彩色 CCD 相机进行色彩校正,从而拟合出亮度测量公式,并通过实例验证利用彩色 CCD 相机测量船舶夜航光环境的可行性。

2 海上光环境对船舶夜航安全的影响

2.1 海上光污染的概念及来源

海上光污染是指海滨城市夜间照明、海上灯光捕鱼等作业照明所产生的逸散光、反射光和眩光等对人、海洋生物造成干扰或负面影响的现象^[1]。

海上光污染主要发生在海上或与之相连接且可供海船航行的水域,其污染源主要有海滨城市的夜景灯光、渔船的诱鱼灯光、船舶的锚泊灯光、码头作业照明、桥梁照明以及海上工程作业照明等^[11],其影响对象包括船舶夜航安全和海洋动植物,本文的研究对象是船舶夜航安全。

2.2 对船舶夜航安全的影响

海上光环境对船舶夜航安全的影响主要包括对信号灯的可识别性和船舶驾驶人员视觉绩效的影响。

1) 信号灯的可识别性

如果一个正常视力的夜航船舶驾驶员要在复杂的光环境中识别一个目标,那么该目标必须与视场环境存在一定的亮度差异,在光度学中定义亮度对比度 C 为描述这种差异的物理量:

$$C = \frac{\Delta L}{L_b} = \frac{L_o - L_b}{L_b}, \quad (1)$$

式中: L_o 为物体亮度; L_b 为背景亮度; ΔL 为实际亮度差。

物体与光环境背景亮度实际的亮度对比度 C 与临界对比度 C_{cr} 的比值为可见度水平(visibility level, 用 V_L 表示)^[2]:

$$V_L = \frac{C}{C_{cr}} = \frac{\Delta L}{L_{cr}}. \quad (2)$$

同等条件下, V_L 越大,目标的可见水平越高,也就是越容易看到。一般来说,当对比度 C 小于 -0.13 或大于 1.3 时,视觉工效较高, V_L 较高,目标容易被识别。当对比度 C 处于 -0.13~1.3 之间时,视觉工效较低, V_L 较小,目标不易被发现^[2]。

船舶号灯的亮度通常都是确定的, V_L 的大小主要与夜航船舶所处光环境的背景亮度有关。因此,在一定天气条件下,当光环境的背景亮度接近于信号灯的亮度时,亮度对比度 C 将会接近于 0,此时驾驶人员将会难以识别他船号灯和助航灯标。

2) 对驾驶人员视觉绩效的影响

光环境内的失能眩光则会导致视场内目标的可见度降低,目前失能眩光公认的评价方法为^[12]

$$G_R = 27 + 24 \lg \left(\frac{L_{vl}}{L_{ve}^{0.9}} \right), \quad (3)$$

式中: L_{vl} 为眩光源产生的等效光幕亮度, L_{ve} 为环境产生的等效光幕亮度。

由此可见,无论是对信号灯的识别性的影响,还是对船舶驾驶人员视觉绩效的影响,都涉及光环境中亮度的测量。值得注意的是,海上光环境中的色彩波段差异也会影响信号灯的识别性和驾驶人员的视觉绩效,但这部分影响可通过亮度测量中的色度标定试验在测量多组数据后进行拟合予以减弱。因此,亮度的测量和精度的提高是后续评价船舶夜航光环境和治理海上光污染的重要环节。

3 彩色 CCD 相机测量光环境原理

3.1 成像式亮度计测量原理

成像式亮度计的测量原理如图 1 所示。

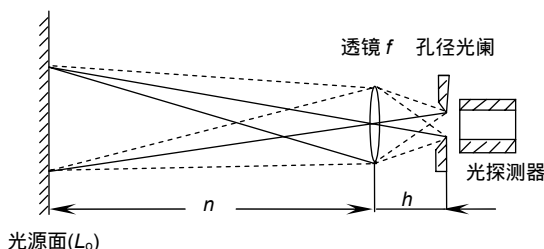


图 1 成像式亮度计的结构原理图

Fig. 1 Structure diagram of image-luminance meter

当视场内某一目标的光线经光探测器探测后在其表面成像。根据几何光学和光度学原理可知，当成像系统满足一定的光学精度后，目标在探测器表面的照度 E 与目标自身亮度 L_0 有如下关系：

$$E = \frac{\pi \tau}{4F_m^2} \left(1 - \frac{f}{n}\right)^2 L_0, \quad (4)$$

式中： E 为探测器表面照度， L_0 为目标亮度， τ 为光学系统的透射率， f 为透镜焦距， n 为透镜与目标距离(测量距离)， F_m 为相对孔径数。

与成像式亮度计测量原理类似，彩色 CCD 相机也是通过测量视场区域的照度进而推导出视场内的亮度分布。由于船舶在夜间航行时距离光源的距离一般远大于相机的透镜焦距，因此可将上式简化为

$$E = \frac{\pi \tau}{4F_m^2} L_0. \quad (5)$$

3.2 彩色 CCD 相机测亮度原理

彩色 CCD 相机在正常曝光情况下所拍摄图像中任一点的灰度值 $D(x, y)$ 与该点的曝光量 $H(x, y)$ 存在如下关系：

$$D(x, y) = v \lg H(x, y) + m, \quad (6)$$

式中： v 为反差系数， m 为常数。

此外，在照相机正常曝光的前提下，数字图像中某一点的相机曝光量 $H(x, y)$ 与目标在探测器表面的照度 $E(x, y)$ 有如下关系：

$$H(x, y) = E(x, y) \times T, \quad (7)$$

式中： T 为相机的曝光时间，即快门速度。

根据式(5)、式(6)、式(7)可以得出，彩色 CCD 相机拍摄照片图上某一点的灰度值 $D(x, y)$ 与目标亮度 L_0 存在如下关系式：

$$D(x, y) = v \lg \left(\frac{T}{F_m^2} \times L_0(x, y) \right) + v \lg \left(\frac{\pi \tau}{4} \right) + m, \quad (8)$$

式中： $D(x, y)$ 为图像灰度值， F_m 为相对孔径数， T 为曝光时间， $L_0(x, y)$ 为目标亮度， τ 为透射率。

一般相机在正常曝光时其反差系数 v 和透射率 τ 是固定不变的，因此，可将式(8)简化为

$$D(x, y) = v \lg \left(\frac{T}{F_m^2} \times L_0(x, y) \right) + w, \quad (9)$$

$$\text{式中} \quad w = v \lg \left(\frac{\pi \tau}{4} \right) + m,$$

$$\text{进而} \quad L_0(x, y) = \frac{F_m^2}{T} \times 10^{\frac{D(x, y) - w}{v}}. \quad (10)$$

因此，在给定一台彩色 CCD 相机的前提下，当获取大量的灰度值 $D(x, y)$ 和对应亮度 $L_0(x, y)$ 后，便可通过数据拟合出公式中其他两个常数 w 、 v 。灰度值又受数字图像中的色彩波段差异的影响，即与彩色分量三刺激值有关，在确定两者的关系后可通过色度标定试验减弱这种影响。

3.3 图像灰度与三刺激值的关系

国际照明委员会(CIE)规定 1931CIE-XYZ 色度学系统中 Y 刺激值的颜色匹配函数 $\bar{y}(\lambda)$ 与光谱光视效率函数 $V(\lambda)$ 一致。即该系统中 Y 刺激值只表示颜色的亮度，不表示色度； X 、 Z 刺激值则表示颜色的色度，不表示亮度。 Y 刺激值与图像中 R 、 G 、 B 的关系为

$$Y = -1.7392R + 2.7671G - 0.0279B. \quad (11)$$

上节提到的数字图像中的灰度值 D 和 1931CIE-XYZ 系统中的 Y 刺激值表现形式类似，文献[13]指出，数字图像的灰度值与三刺激值 R 、 G 、 B 有如下关系：

$$D = 0.3R + 0.59G + 0.11B. \quad (12)$$

因此，可以通过测量图像中的 RGB 间接获取数字图像中的灰度值 D 。但数字图像中的 RGB 与 1931CIE 中的 RGB 并不相同，图像中的 RGB 与相机本身的设计有关。因此，在使用彩色 CCD 相机测量船舶夜航光环境亮度时需要对其进行色度标定来拟合出两者的关系式。

4 色彩校正

4.1 色度标定

所谓色度标定，即确定数字图像中的三刺激值(I_r , I_g , I_b)与 1931CIE 中标准(R , G , B)的关系，从而减弱测量数字图像中灰度值 D 时色彩波段差异的影响。

实验使用尼康 D3000 相机、日本 Topcon BM-7A 色度亮度计、标准二十四色卡以及可调节电压的白炽灯作为实验器材，具体器材布置如图 2 所示。

为了保证实验不受其他外界光线干扰，实验全程都在暗室下进行。实验开始前将白炽灯和彩色 CCD 相机先预热 30 min，调整相机镜头使被测画板刚好处于相机中心，将曝光和白平衡程序调至自动模式，图像分辨率为 L 档(高画质档)，感光度 ISO 为 100，曝光时间 T 设置为 2 s，光圈数 F 为 5。调整色度亮度计的视场角为 1° 。

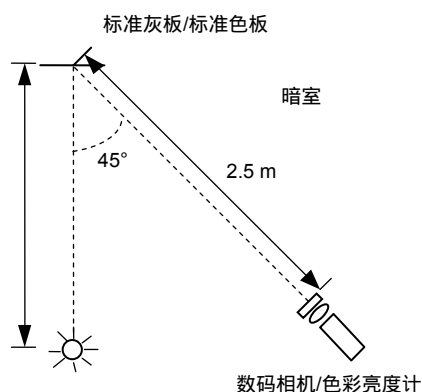


图 2 实验仪器和设备相对位置图(俯视)

Fig. 2 The relative positions of laboratory instruments and equipment (vertical view)

一切准备就绪后，为最大程度消除彩色 CCD 相机中的色彩三刺激值与 1931-RGB 系统光谱三刺激值不一致的影响，分别使用相机和亮度色度计以相同位置和方向对标准色板或灰板进行测量，记录亮度色度计测量的刺激值 XYZ 和色品坐标 (x, y) 。完成 5 组测量数据(每组数据包含对 12 种颜色的标定)后，利用图像处理软件获取图像三刺激值 (I_r, I_g, I_b) ，同时将色度亮度计测量的 XYZ 转换至 RGB。然后使用 SPSS 非线性回归分析各组数据进行拟合得出以下关系式：

$$\begin{cases} R = 0.000367 I_r^{1.940215} \\ G = 0.000413 I_g^{1.733599} \\ B = 0.002294 I_b^{0.960423} \end{cases}, \quad (13)$$

其中： R 刺激值的拟合优度 $R_2=0.991870$ ； G 刺激值的拟合优度 $R_2=0.997427$ ； B 刺激值的拟合优度 $R_2=0.987962$ 。从拟合优度可以看出拟合精度较高，可以进行后续处理。

4.2 亮度标定

所谓亮度标定，即使用彩色 CCD 相机和亮度色度计同时测量一个目标获取其亮度，从而通过大量测

量数据拟合得出式(10)中的 w 、 v 常数。

由于标准白炽灯的亮度较大，近距离测量时亮度表现不均匀，与船舶夜航光环境中的亮度分布差异较大。为了尽可能使亮度分布符合船舶夜航光环境的实际情况，实验选取可调节亮度的液晶显示器，实验同样在黑暗环境下进行，将彩色 CCD 相机或色度亮度计置于屏幕显示器的正前方 3 m 处，设置图像分辨率为 L 档，感光度、光圈数 F 以及曝光时间 T 均为自动选择。

调节屏幕多档亮度，利用彩色 CCD 相机和色度亮度计进行测量，测量多组数据后，剔除明显错误数据后利用统计学分析软件 SPSS 拟合式(10)，得出结果如下：

$$L_o(x, y) = \frac{F_m^2}{T} \times 10^{\frac{D(x, y) - 16.598}{-4.967}}. \quad (14)$$

上式的拟合优度 $R_2=0.934383$ ，精度较高，满足测量船舶夜航光环境的需要。

5 实例验证

本节将选取大连新港油轮码头水域光环境作为研究对象，利用彩色 CCD 相机和色度亮度计分别测量该水域光环境的亮度，检验彩色 CCD 相机测量船舶夜航光环境的可行性。在彩色 CCD 相机标定和色度亮度计参数调整以后，拍摄的图像如图 3 所示。



图 3 彩色相机拍摄的数字图像($F=5.6$, $T=1/15$ s)

Fig. 3 Digital image photographed by color camera ($F=5.6$, $T=1/15$ s)

从图 3 可知，该水域的光污染问题比较严重，相邻两个像素点亮度干扰较大。因此，为保证测量精度，将图片放大后进行区域切割，分别计算各区域的平均亮度，最终结果如表 1 所示。通过表 1 可知，利用彩色 CCD 相机和亮度计测量同一海域光环境后得出的测量值具有较好的一致性，最大误差仅为 6.38%。国内一级亮度计的测量误差允许范围为 5%，二级为 10%^[14]，可见使用彩色 CCD 相机测量船舶夜航光环境亮度的精度较高，符合测量要求。

表 1 彩色 CCD 测量值 L_c 与亮度计测量值 L_l Table 1 Color CCD measured value L_c and luminance meter measured value L_l

截图亮度值	区域 a	区域 b	区域 c	区域 d
CCD 值 $L_c/(\text{cd}\cdot\text{m}^{-2})$	55.58	58.61	57.84	51.40
亮度计值 $L_l/(\text{cd}\cdot\text{m}^{-2})$	58.13	56.51	61.78	48.76
误差/%	-4.39	3.53	-6.38	5.41

6 结 论

本文根据照相机成像原理,推导出亮度测量的理论公式,通过开展色彩校正实验,在很大程度上消除了彩色 CCD 相机与 1931-RGB 系统光谱三刺激值曲线不一致所带来的误差,并得出精度较高的测量公式;在实地测量同一目标后,结果表明彩色 CCD 相机测量值和亮度计的实测值吻合度较好,且精度较高;该方法不仅适用港口水域,还可广泛应用于桥区水域、航道及灯光捕鱼的渔区等其他船舶通航水域光环境的测量,并可为后续船舶夜航光环境的评价、海上光污染的治理以及相关法规的制定提供技术支持。

实验中发现镜头组的光学畸变会对测量造成一定的误差,在后续研究中可利用相关的图像处理技术校正后再进行数据处理以提高测量精度。尽管该方法已达到国内二级亮度计的测量精度,但本文实验条件有限,测量时灯具的选择和布置与海上实际情况存在一定差异,后续可选取空旷且外界干扰较小的试验场地对该方法进一步改进与完善。

参考文献

- [1] Weng J J, Zhou Y. Analysis of impact of light pollution at sea upon ships navigation safety at sea and countermeasures[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2013, **37**(3): 549–552.
翁建军, 周阳. 海上光污染对船舶夜航安全的影响及对策分析[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2013, **37**(3): 549–552.
- [2] Zhu J S, Sun L C, Dai R, et al. Sea light pollution and some amending proposals for the current international regulation for preventing collisions at sea[J]. *Navigation of China*, 2006(2): 29–33.
朱金善, 孙立成, 戴冉, 等. 海上光污染及对现行《国际海上避碰规则》的修改意见[J]. *中国航海*, 2006(2): 29–33.
- [3] Dang R, Wang L X, Liu G. Research on measurement method of road lighting in residential areas[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2015, **26**(3): 76–79, 92.
党睿, 王立雄, 刘刚. 居住区道路照明检测方法研究[J]. *照明工程学报*, 2015, **26**(3): 76–79, 92.
- [4] Dang R, Ma J, Liu G. Research on the new technology of measurement about urban residential areas lighting[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2011, **22**(2): 16–20.
党睿, 马剑, 刘刚. 城市居住区照明检测新技术研究[J]. *照明工程学报*, 2011, **22**(2): 16–20.
- [5] Li M Y, Qu X H, Geng X, et al. Explore the classification and control values of light pollution monitoring[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2013, **29**(2): 51–54.
李岷岷, 曲兴华, 耿欣, 等. 光环境污染监测分类与控制值探索[J]. *中国环境监测*, 2013, **29**(2): 51–54.
- [6] Gu B, Zhan Q X, Zhu Z Q. Research on measurement of luminance distribution using a digital cameras[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2003, **14**(1): 15–18, 23.
顾冰, 詹庆旋, 祝志强. 利用数码相机测量亮度分布的实验研究[J]. *照明工程学报*, 2003, **14**(1): 15–18, 23.
- [7] Zhou G, Ma Y C, Mou T S. Measuring surface light source luminance by using digital imaging device[J]. *Optical Instruments*, 2006(3): 12–16.
周钢, 马鲲鹏, 牟同升. 数码成像法测量面发光体亮度[J]. *光学仪器*, 2006(3): 12–16.
- [8] Yu W J, Guo Z Y, Liao Q L, et al. Research on luminance distribution measurement using a digital camera[J]. *Journal of China Jiliang University*, 2014, **25**(3): 273–278.
俞文杰, 郭子杨, 廖启栗, 等. 数码相机亮度分布测试研究[J]. *中国计量学院学报*, 2014, **25**(3): 273–278.
- [9] He Y, Weng J, Hu Y K, et al. Testing sky luminance distribution by fish-eye lens digital cameras[J]. *Journal of Chongqing University*, 2010, **33**(7): 129–134.
何荣, 翁季, 胡英奎, 等. 用鱼镜头数码相机测试天空亮度分布[J]. *重庆大学学报*, 2010, **33**(7): 129–134.
- [10] Cai H Y, Yang G, Li X M, et al. Mean height of long distance burst measurement based on double high speed line scanning CCD[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, **42**(5): 1–6.
蔡怀宇, 杨光, 李秀明, 等. 双线扫描 CCD 测量远距离闪光点平均高度[J]. *光电工程*, 2015, **42**(5): 1–6.
- [11] Huang C, Zhu J S. Screening of light environment evaluation indices for ship night navigation[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, **38**(5): 804–809.
黄成, 朱金善. 船舶夜航光环境评价指标筛选[J]. *应用光学*, 2017, **38**(5): 804–809.
- [12] Hirning M B, Isoardi G L, Garcia-Hansen V R. Prediction of discomfort glare from windows under tropical skies[J]. *Building and Environment*, 2016, **113**: 107–120.
- [13] Wang R H. *Digital Image Processing*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
王润辉. 数字图像处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [14] Yi B, Mi H J, Zhao H W. A new method of DSC's imaging luminance measurement based on HDR image processing[J]. *Optical Technique*, 2012, **38**(2): 191–196.
易斌, 米红菊, 赵宏伟. 基于 HDR 图像处理的数码相机成像亮度测量方法[J]. *光学技术*, 2012, **38**(2): 191–196.

Brightness measurement of ships navigation at night based on color CCD camera

Huang Cheng, Zhu Jinshan*, Li Zhirong, Zhu Jinglin



Digital image photographed by color camera

Overview: With the continuous improvement of the industrialization and urbanization of human society, the light pollution at sea was increasingly affecting the safe navigation of ships at night. In order to better measure the light environment of ships navigation at night, and evaluate the light environment to reduce the impact of light pollution at sea upon ships navigation at night. Making foundation for the safety of the ship's night navigation and laying the foundation for the urgent need to choose a measurement tool to measure light pollution at sea. Aiming at the limitations of current light environment measurement tools, this paper proposes a method of using color CCD camera in combination with digital image processing technology to measure the brightness of the sea light environment. Firstly, starting from the principle of a color CCD camera, combining photometry and colorimetry the theoretical theory analyze the feasibility of measuring brightness and determine the photometric parameters that need to be corrected. Secondly, the relationship between brightness and camera parameters was derived based on the principle of camera imaging. The digital image processing software was used to extract the brightness and color information from photos. The Chroma calibration experiment fits the relationship between the tristimulus value of the digital image and the standard RGB. The luminance calibration experiment fits the unknown parameters in the relational expression and then determines the luminance measurement formula. Finally, the measurement formulas of the waters of the Dalian Xingang oil tanker terminal are validated by examples. For a wide range of water CCD camera shooting, in order to avoid the occurrence of a large measurement error, the captured images are divided into regions. These regions are subjected to brightness and chromaticity calibration experiments, and the brightness of each region is measured separately. The brightness values obtained by the standard brightness meter and the color CCD camera were compared and analyzed. According to the analysis results, comparing the accuracy of the domestic standard luminance meter, the error of the method meets the standard of the second luminance meter and is close to the standard of the first luminance meter. The results show that this method is feasible for measuring the light environment brightness of the ships navigation at night exhibiting high accuracy. This method can be used not only to measure the nighttime light environment of ships in port waters but also to measure the brightness values of offshore light environments in other areas such as fishing areas and marine engineering work vessels, which puts forward some problems in the experiment and lays the foundation for follow-up research.

Citation: Huang C, Zhu J S, Li Z R, *et al.* Brightness measurement of ships navigation at night based on color CCD camera[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(7): 170553

Supported by National Natural Science Foundation of China (51309043)

* E-mail: zjinshan888@126.com