

基于偏振的水下目标深度信息获取方法

赵泓扬, 姚文卿

(常州工学院电子信息与电气工程学院, 江苏 常州 213002)

摘要: 随着三维技术在许多相关领域应用日益广泛, 目标深度信息精确获取变得日益重要。针对水下应用领域, 提出了一种基于偏振的水下目标深度信息获取方法, 该方法先通过暗原色先验知识对图像进行背景区域划分, 使用背景区域光强计算出后向散射光的偏振度, 结合光强和偏振度计算出各像素点的后向散射光强, 利用水体光强衰减公式求得各通道的深度信息, 进行融合处理得到水下目标深度信息。实验结果表明, 该方法能精确地获取水下目标的深度信息, 且精度和效率优于基于暗原色先验的去雾方法。

关键词: 图像处理; 深度信息; 暗原色先验; 偏振度

中图分类号: TN911.74 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)08-0043-05

Polarization-Based Depth Information Acquisition of Underwater Target

ZHAO Hong-yang, YAO Wen-qing

(School of Electronic Information & Electronic Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China)

Abstract: With the increasingly wide application of three-dimensional technology in many related fields, it becomes more and more important to accurately acquire the target depth information. A method for acquiring underwater target depth information based on polarization is proposed. Firstly, the background region of image is divided based on dark channel prior, then the polarization of backscattered light is calculated by using the light intensity of background region. The backscattered light intensity of each pixel is calculated in combination of the light intensity and polarization, and the depth information of each channel is obtained with the light intensity attenuation formula of water body, thus acquiring the depth information of underwater target through fusion processing. The experimental results show that the proposed method can accurately acquire the depth information of underwater target with higher accuracy and efficiency than that of the method using dark channel prior.

Key words: image processing; depth information; dark channel prior; polarization

0 引言

传统的机器视觉是将立体的三维景物投影成平面的二维图像, 在这个成像的过程中损失了深度信息, 使得重构的三维景物不是唯一的, 从而使机器视觉的发展受到了限制。因此, 基于图像的深度信息获取具有重要的现实意义, 将会大大推动机器视觉的发展。

目前深度信息获取大致分为两种: 一种是通过三

维成像获得深度信息, 例如激光雷达深度成像、立体视觉技术法^[1-2], 立体视觉中的双目立体视觉由于直接模仿了人和许多动物通过双眼获得景物的深度信息的方式, 得到了更为深入的研究, 但这类方法存在严格的匹配要求; 另一种是基于二维图像的深度信息获取技术, 例如基于多幅图像的去雾方法, 借助晴天和雾天场景的两幅图像作为参考图像来计算场景各点的深度比关系^[3-4], 这种方法需要涉及不同天气条件下获得的多幅场景图像, 因此时效性比较差, 文献[5]提出基于暗原色先验的去雾方法, 获取场景信息。上述方法能实现单幅图像获取深度信息, 但是求解过程相对复杂, 因此实时性相对较差。

在水下场景中, 深度信息对于水下目标检测、跟踪

收稿日期: 2014-12-19

修回日期: 2015-01-23

基金项目: 江苏省光谱成像与智能感知重点实验室开放基金(11301008);

江苏省高校自然科学研究面上项目(15KJ510004)

作者简介: 赵泓扬(1979—), 男, 山东潍坊人, 硕士, 讲师, 研究方向为信号处理。

和地形测绘有着重要的作用,然而上述方法应用在水下时,由于光在水体中传播时存在着严重的吸收和散射,目标信息无法到达采集设备,使上述方法存在很大误差。本文利用水下后向散射光的偏振特性,间接求取目标的距离信息,获取场景的深度图。

1 水下偏振成像

1.1 水体散射模型

由于水体中存在着高吸收和高散射作用,使得光在水体中传播经历严重的衰减。基于水体中散射效应的水体散射模型,主要有前向散射和后向散射两种。光在水体中的散射以 Mie 散射为主,如图 1 所示。

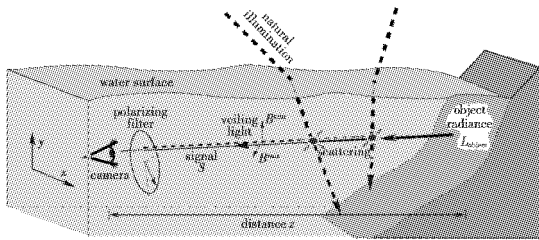


图 1 水下场景模型

Fig. 1 Model of underwater scene

图 1 中,自然光线从大气中经过水面折射进入水体中,由于水体中存在颗粒杂质,使得水体中传输光线被散射,偏振态发生变化成为部分偏振光。部分偏振光经过滤镜成为线偏振光,成像装置获取目标的偏振图像。

1.2 深度信息获取原理

从图 1 中可以看出,通过图像采集装置获取的图像信息 I^{total} 主要由两部分组成:目标景物的辐射 L^{object} 经过衰减后的直接透射光强 D 和水体散射产生的后向散射光强 B 所包含的信息^[6-7],即

$$I^{\text{total}} = D + B \quad (1)$$

直接透射光强为

$$D = L^{\text{object}} e^{-\beta z} \quad (2)$$

式中: z 为目标距离采集装置镜头的距离; β 为光线在水体中的散射系数。

后向散射光强为

$$B_{(x,y)} = B_{\infty} (1 - e^{-\eta r(x,y)}) \quad (3)$$

式中: B_{∞} 为无穷远背景的后向散射光强^[4-6]; $B_{(x,y)}$ 为目标图像各像素点的后向散射光强; η 为水体的衰减系数。

水下成像过程中的后向散射光包含大量偏振信息,利用后向散射光的这个偏振特性来弥补水下成像过程中光线衰减的不足^[8]。在偏振成像过程中,偏振成像系统获取的目标图像偏振信息可以分解成两个垂直方向的偏振信息的和,即

$$I_{(x,y)}^{\text{total}} = I_{(x,y)}^{\perp} + I_{(x,y)}^{\parallel} \quad (4)$$

式中: $I_{(x,y)}^{\perp}$ 表示垂直于入射面的偏振光强; $I_{(x,y)}^{\parallel}$ 表示平行于入射面的偏振光强。

由式(1)可知,后向散射光强 B 也可以分解成相互垂直的两个方向后向散射偏振光强,即

$$B_{(x,y)} = B_{(x,y)}^{\perp} + B_{(x,y)}^{\parallel} \quad (5)$$

式中: $B_{(x,y)}^{\perp}$ 表示垂直于入射面的后向散射光强; $B_{(x,y)}^{\parallel}$ 表示平行于入射面的后向散射光强。

水下成像过程中,目标的反射偏振光强包含的信息相比后向散射光可以忽略,综合式(1)、式(4)、式(5)可以得出

$$\begin{cases} I^{\perp} = B^{\perp} + D/2 \\ I^{\parallel} = B^{\parallel} + D/2 \end{cases} \quad (6)$$

后向散射光偏振度(DOP)表示为

$$p = \text{mean}[(B^{\parallel} - B^{\perp}) / (B^{\parallel} + B^{\perp})] \quad (7)$$

综合式(1)~式(7)可得

$$\begin{cases} I^{\perp} = B(1 - p)/2 + D/2 \\ I^{\parallel} = B(1 + p)/2 + D/2 \end{cases} \quad (8)$$

对式(8)进行运算,得出目标偏振图像的每一像素点的后向散射光的光强,即

$$B(x,y) = \frac{(I^{\parallel} - I^{\perp})}{p} \quad (9)$$

综合式(1)~式(9)可以求得目标深度信息,即

$$Z_{(x,y)} = -\ln(1 - B_{(x,y)}/B_{\infty})/\eta \quad (10)$$

2 深度信息获取

2.1 基于暗原色的背景区域划分

暗原色先验(dark channel prior)是根据对大量户外无雾图像的统计观察结果而进行的图像去雾方法,可以计算雾天图像的深度图。由于光线在水下传播中的衰减,水下图像的背景光可以用来估计光线衰减传播过程中的散射因子,因此水下成像模型可以模拟简化为雾化模型,参照暗原色先验算法可计算水下视觉深度信息(目标距离摄像机的距离)。

水下成像模型可表述为

$$I_{\lambda}(x) = J_{\lambda}(x)\rho_{\lambda}(x)\alpha_{\lambda}^{r(x)} + B_{\lambda}(1 - \alpha_{\lambda}^{r(x)}) \quad (11)$$

式中: λ 为颜色通道; $I_{\lambda}(x)$ 为在点 x 处得到的图像; $J_{\lambda}(x)$ 为水下目标光强; $\rho_{\lambda}(x)$ 为反射率; α_{λ} 为波长衰减因子; $r(x)$ 为水下场景深度; $B_{\lambda}(x)$ 为水下环境光。

对图像 $I_{\pi}(y)$ 定义暗原色为

$$I_{\text{dark}}(x) = \min_{\pi \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in \Omega_x} I_{\pi}(x)) \quad (12)$$

式中: $I_{\text{dark}}(x)$ 即图像 I 的强度值接近于 0 的暗原色; I_{π} 为 I 的 R,G,B 三通道中的一个通道; Ω_x 为以 x 为中心的一块区域。通过计算,求取的暗信道值可以近似为

$$\begin{aligned} \min_{\pi \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in \Omega_x} I_{\pi}(x)) &= J_{\text{dark}}(x)\rho_{\text{dark}}(x)\alpha_{\lambda}^{r(x)} + \\ &B_{\text{dark}}(1 - \alpha_{\lambda}^{r(x)}) \approx B_{\text{dark}}(1 - \alpha_{\lambda}^{r(x)}) \end{aligned} \quad (13)$$

式中, $J_{\text{dark}}, \rho_{\text{dark}}$ 以及 B_{dark} 分别为式(11)中对应变量的暗信道的值。

通过对两幅相互垂直方向的偏振图像进行暗原色处理,采用迭代比较算法求出暗原色处理后像素值最大的6%区域作为背景区域^[9],如图2所示,其中,背景区域为红框所标记的区域。

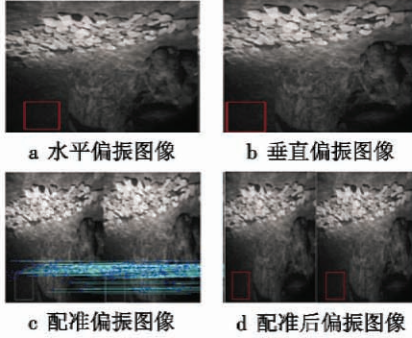


图 2 偏振图像配准

Fig. 2 Registration of polarized image

2.1.1 后向散射光的偏振度获取

由于两幅相互垂直方向的偏振图像是同一偏振成像设备不同时刻所获取的偏振图像,所以两幅图像之间存在着细微的差别,导致对应位置上是不同点的像素信息,对下文的偏振深度信息获取产生较大的影响。

本文先采用基于 SIFT 的配准方法^[10-11],对两个不同方向的偏振图像进行配准,保证对应位置偏振信息的误差降到最低程度,如图2所示。

利用式(7)对两幅偏振图像选出的背景区域进行计算,计算出目标背景区域的后向散射光的偏振度。

2.1.2 图像像素后向散射光强计算

偏振成像设备获取的图像中包含有后向散射光强 B 和经衰减后的直接透射光强 D ,两者相互并列存在,不能利用简单的相加减求出后向散射光强。本文是利用后向散射光强 B 与后向散射光强偏振度 p 之间的关系,结合式(8)、式(9)得 $B_{(x,y)} = (B_{(x,y)}^{\perp} - B_{(x,y)}^{\parallel}) / p_{\text{scat}} = (I_{(x,y)}^{\perp} - I_{(x,y)}^{\parallel}) / p_{\text{scat}}$,然后求出目标图像中各像素的后向散射光强 $B_{(x,y)}$ 。

2.2 粗深度图像获取

水体中分布大量的颗粒物,会在各个方向上都造成后向散射光,为了便于计算,后向散射光的总和 B 为

$$B = \int_p B(\mathbf{r}) d(\mathbf{r}) = B_{\infty} (1 - e^{-\eta z}) \quad (14)$$

式中: η 为水体的衰减系数; z 为目标与相机的距离; B_{∞} 为无穷远的后向散射光强度即背景区域光强度。

依据式(3),计算 R,G,B 通道深度信息为

$$Z_{(x,y)}^i = -\ln(1 - B_{(x,y)}^i / B_{\infty}^i) / \eta \quad (15)$$

式中, i 分别对应 R,G,B 三个通道,对图像进行运算(具体介绍见后文),求得 $Z_{(x,y)}^R, Z_{(x,y)}^G, Z_{(x,y)}^B$,利用

$$Z_{(x,y)} = (Z_{(x,y)}^R + Z_{(x,y)}^G + Z_{(x,y)}^B) / 3 \quad (16)$$

求得目标的深度信息 $Z_{(x,y)}$,比较粗糙,需要进行优化求取更加精确的深度信息,如图3所示。



图 3 粗糙深度图

Fig. 3 Rough depth map

2.3 深度图像优化

上述实验得到的实验结果存在着严重的区块效应,本文使用软抠图的方法对其进行修正。软抠图方程与水下成像模型相似,类似于

$$I = F\alpha + B(1 - \alpha) \quad (17)$$

式中: F 和 B 分别为前景和背景的光强; α 为前景的不透明度,可以发现水下成像模型中透射率的分布就是式中 α 的分布。因此,可以通过软抠图^[12]的方法来优化目标粗糙深度图。假设优化后的深度信息为 $Z_{(x,y)}^*$,将 $Z_{(x,y)}^*$ 和 $Z_{(x,y)}$ 分别写成向量形式 Z^* 和 Z ,把代价函数最小化,即

$$E(Z^*) = (Z^*)^T L Z^* + \lambda (Z^* - Z)^T (Z^* - Z) \quad (18)$$

式中,等号右边的第一项为平滑项,第二项为加入权重 λ 的数据项。 L 为抠图 Laplace 矩阵,其元素定义为

$$L(x,y) = \sum_{(x',y') \in w} \left(\delta_{xy} - \frac{1}{|w|} \left(1 + \frac{(I_x - u)^T (I_y - u)}{\sum_x + \frac{\epsilon}{|w|} U_3} \right) \right) \quad (19)$$

式中: I_x 和 I_y 为输入图像 I 在第 x 行和第 y 列的像素色彩值; δ_{xy} 为克罗内克函数; u 和 \sum_x 分别为在区域 w 内色彩矩阵的均值和协方差; U_3 为 3×3 的单位矩阵; ϵ 为调整参数; $|w|$ 为区域 w 内的像素数目。

最优的 Z^* 可以通过求解稀疏线性系统而得到,即

$$(L + \lambda U) Z^* = \lambda Z \quad (20)$$

式中: U 为与 L 大小相等的单位矩阵;将 λ 设置为很小的值就能使得 Z^* 和 Z 相关。经过软抠图优化后的图像如图4所示。



图 4 优化后的深度图

Fig. 4 Optimized depth map

2.4 算法流程

整个算法的流程如下所述。

1) 基于暗原色先验知识处理非偏振图像,选取其中暗原色值最大的6%像素区域作为背景区域。

2) 据1)中的背景区域,作为 0° 偏振图像、 90° 偏振图像的背景区域,依据式(7)计算出后向散射光的偏振度。

3) 用后向散射光的偏振度,以及 0° 偏振图像与 90° 偏振图像光强差,依据式(9)计算出非偏振图像中各像素点的后向散射光强。

4) 算出非偏振图像的背景区域光强平均值,将其作为背景区域的后向散射光强 B_∞ 。

5) 用3)中图像各像素点的后向散射光强和4)中背景区域的后向散射光强,依据式(15)计算出R,G,B通道的目标深度信息。

6) 对5)的各通道深度图进行平均,得到目标深度图。

7) 用软抠图法对6)中得到的粗糙深度图像进行修正,得到优化后的深度图像。

3 算法实验及结果

本文的目的是获取基于水下偏振图像的目标的深度信息,传统的深度信息获取方法是采用暗原色先验知识,获取的目标细节信息存在部分缺失的现象。下面几组实验分别采用本文基于偏振的方法和文献[5]的基于暗原色先验的方法来获取目标深度信息。

为了进行直观的对比,下面给出了本文基于偏振深度信息获取方法和基于暗原色先验的方法的实验结果,如图5所示。其中,图5a列为水平偏振图像,图5b列为垂直偏振图像,图5c列为本文基于偏振的深度信息获取方法,图5d列为文献[5]基于暗原色先验的深度信息获取方法。

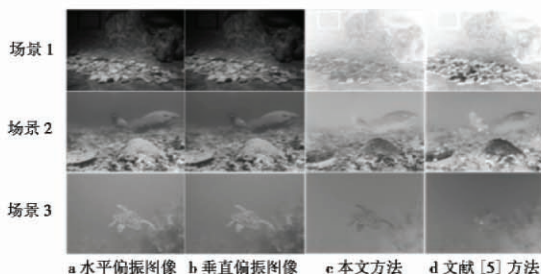


图5 水下目标深度信息对比

Fig. 5 Comparison of acquired depth information of underwater target

从图5中可以看出,本文方法得到的深度图比由文献[5]方法得到的深度图更加细致,即本文方法得到的深度信息较多,且本文方法处理图像的效率高于

文献[5]方法。文献[5]方法得到的深度信息存在较多的区块,使目标的局部信息丢失,不利于后续偏振图像的解析。利用本文方法得到的偏振深度信息可直接应用于水下目标检测、跟踪和地形测绘。

为了直观地比较通过本文方法与文献[5]方法得到的深度信息,本文选取图像性能比较指标中的信息熵、平均梯度和标准差对获取的深度图像进行性能优劣的比较,如图6所示。

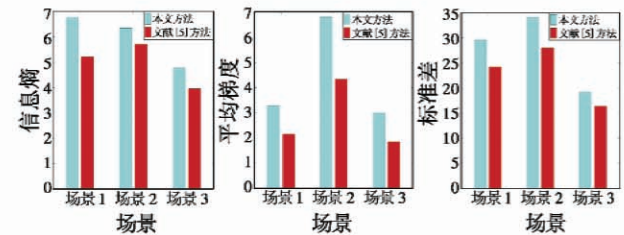


图6 水下目标深度信息性能对比

Fig. 6 Performance comparison of acquired depth information of underwater target

信息熵值越大表明深度图像的内容越丰富,效果越好,信息熵值越小,深度图像的信息含量就越少,质量较低。

平均梯度实际上是指图像清晰度,反映图像细节的反差,以及图像中纹理变换特征。平均梯度越大,图像的层次越多,则图像就越清晰。

标准差反映图像中目标与背景对比度的大小。标准差越大,图像的灰度值越离散,表现出的视觉效果越好。

为了进一步体现本文方法执行效率的优劣,将本文方法和文献[5]方法对实验中的3个场景分别进行深度图像处理,处理所需时间见表1。

表1 水下目标深度获取时间对比表

Table 1 Time comparison of acquiring depth information of underwater target

场景	时间/s	
	本文方法	文献[5]方法
1	7.838 276	11.496 211
2	3.904 498	8.158 421
3	4.522 862	9.256 652

对比图6中通过本文方法和文献[5]方法处理得到深度图像的3个比较指标,本文方法处理后深度图像的信息熵、平均梯度和标准差均大于文献[5]方法处理后的实验结果,反映出本文方法校正后的深度图像目标深度信息比较丰富,层次清晰,视觉效果好。

从表1中可以看出,本文方法在处理水下偏振图片时,执行效率相比于文献[5]方法提升了近一倍,所以本文方法更适用于延时小的应用场景。

4 结束语

本文提出了一种基于偏振的水下目标深度信息获取方法,该方法将偏振信息应用在目标深度信息获取之中,提高了获取的精度,通过实验对比,表明该算法性能好且执行效率高。

参考文献

- [1] OAKLEY J P, SATHERLEY B L. Improving image quality in poor visibility conditions using a physical model for contrast degradation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1998, 7(2):167-170.
- [2] JOHANNES K, NEUBERT R, CHEN B. Deep photo: model-based photograph enhancement and viewing [C]//*Siggraph Asia*, Singapore; *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(5):1-10.
- [3] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Removing weather effects from monochrome images [C]//*Proceedings of CVPR*, Kauai, Hawaii, IEEE Computer Society, 2001:186-193.
- [4] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Chromatic framework for vision in bad weather [C]//*Proceedings of IEEE CVPR*, South Carolina, IEEE Computer Society, 2000:598-605.
- [5] HE K M, SUN J, ZHOU X O. Single image haze removal using dark channel prior [C]//*Proceedings of IEEE CVPR*, Miami, FL, IEEE Computer Society, 2009:1956-1963.
- [6] FATTAL R. Single image dehazing [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3):1-9.
- [7] SCHECHNER Y Y, KARPEL N. Clear underwater vision [C]//*Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference*, 2004:536-543.
- [8] SCHECHNER Y Y, NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Instant dehazing of images using polarization [C]//*Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference*, 2001:325-332.
- [9] ZHU P, ZHU H, QIAN X M, et al. An image clearness method for fog [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2004, 9(1):124-128.
- [10] GHOSHAL S, CHATTERJEE P, BISWAS B, et al. A novel method for automatic image registration based on wavelet and near fuzzy set [C]//*2013 Annual IEEE India Conference (INDICON)*, 2013:1-6.
- [11] JOGLEKAR J, GEDAM S, MOHAN B K. Image matching using SIFT features and relaxation labeling technique: a constraint initializing method for dense stereo matching [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(9):5643-5652.
- [12] LEVIN A, LISCHINSKI D, WEISS Y. A closed form solution to natural image matting [J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2008, 30(2):228-242.
- (上接第11页)
- [3] YOON M G. Relative circular navigation guidance for three-dimensional impact angle control problem [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2010, 23(4):300-308.
- [4] 朱战霞, 王建培. 一种攻击地面固定目标的变系数比例导引律 [J]. *飞行力学*, 2000, 18(4):46-49. (ZHU Z X, WANG J P. A gain variable proportional guidance law for stationary target [J]. *Flight Dynamics*, 2000, 18(4):46-49.)
- [5] RYOO C K, SHIN H S, TAHK M J. Energy optimal waypoint guidance synthesis for antiship missiles [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(1):80-95.
- [6] SANG D, MIN B M, TAHK M J. Impact angle control guidance law using Lyapunov function and PSO method [C]//*SICE Annual Conference*, Kagawa University, Japan, 2007:2253-2257.
- [7] LEE J I, JEON I S, TAHK M J. Guidance law to control impact time and angle [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, 43(1):301-310.
- [8] YUN J, RYOO C K. Integrated guidance and control law with impact angle constraint [C]//*The 11th International Conference on Control, Automation and Systems*, Gyeonggi-do, 2011:1239-1243.
- [9] LEE Y, RYOO C, KIM E. Optimal guidance with constraints on impact angle and terminal acceleration [C]//*AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*, Austin, USA, 2003. doi:10.2514/6.2003-5795.
- [10] JEON I S, LEE J I, TAHK M J. Guidance law to control impact time and angle [C]//*International Conference on Control and Automation*, Budapest, Hungary, 2005, 2:852-857.
- [11] SIOURIS G M. *Missile guidance and control systems* [M]. New York: Springer, 2004:181-207.
- [12] 吴受章. *最优控制理论与应用* [M]. 北京:机械工业出版社, 2008:59-75. (WU S Z. *Optimal control theory and application* [M]. Beijing: China Machine Press, 2008:59-75.)