

基于激光扫描的颜色恢复方法

阚凌雁 杨宇 于佳 刘惠萍 王金城

(中国海洋大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要 线结构光扫描法是一种常用的三维探测方法,它可以应用于水下和空气中进行目标的探测。在目前线结构光扫描三维重建理论的基础上,研究了同时获取三维信息和颜色信息的方法。红、绿、蓝激光作为三色光源,依据颜色混合原理,进行相应颜色空间变换,用于水下物体的三维真彩色恢复。结果表明,物体的颜色恢复到人眼的视觉效果,并且目标物体的三维信息重建精度达到毫米量级。

关键词 图像处理; 结构光扫描; 三维重建; 颜色混合; 颜色空间变换; 颜色恢复

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.1202010

Method of Color Restoration Based on Laser Line Scanning

Kan Lingyan Yang Yu Yu Jia Liu Huiping Wang Jincheng

(College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract Linear structured light scanning is a common method for three dimensional (3D) detection, which is used to detect the targets both in water and air. A method for achieving simultaneously 3D and color information is proposed based on the line scanning system. The true color and 3D information of underwater object can be reconstructed based on the principle of color mixing and color space transformation, red, green, and blue are used as three colors light sources. Experiments demonstrate that the targets can be 3D reconstructed with true color texture at millimeter scales.

Key words image processing; linear structured light scanning; three dimensional reconstruction; color mixing; color space transformation; color restoration

OCIS codes 100.3020; 100.3010; 010.1690; 140.3300

1 引 言

线结构光扫描法是一种基本的水下三维探测方法。该方法的优点是光源的能量集中,可以减少水下后向散射的影响^[1],具有较远的探测距离和较高的重建精度^[2]。Roman 等^[2]应用线光扫描重建出分辨率较高的水下考古遗址观测图;Yang 等^[3]同样利用单色线结构光进行了物体的三维重建,得到物体的三维信息。

目前水下物体线结构光扫描使用单色激光光源,获取单色图像,这在一定程度上不能反映物体在水下的真实颜色信息,而颜色信息作为一种反应物

体特性的重要信息,对于探测和观察水下物体起到重要指导作用^[4]。因此水下物体颜色的获取和复原对于科研、海洋生物探测等有着重要意义^[5-6]。

本文在线结构光扫描方法^[3]的基础上,提出了颜色空间转换的颜色恢复方法。实验中红绿蓝三种线结构光依次扫过目标物体,电荷耦合器件(CCD)记录扫描视频;进而建立以 3 个激光波长为三原色的激光颜色空间模型,根据颜色混合原理,得到三激光混合颜色空间的图像,再将其转换到 sRGB 空间进行显示。经过颜色空间转换后,水下物体的颜色恢复到人眼的视觉效果,成为彩色三维信息。

收稿日期: 2014-04-30; 收到修改稿日期: 2014-07-25

作者简介: 阚凌雁(1987—),女,硕士研究生,主要从事色度学方面的研究。E-mail: wind1357377@126.com

导师简介: 王金城(1955—),男,教授,硕士生导师,主要从事全息术与三维成像等方面的研究。

E-mail: hololab@ouc.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

2 三维重建与颜色恢复原理

2.1 三维重建

激光扫描系统的基本结构图如图 1 所示。

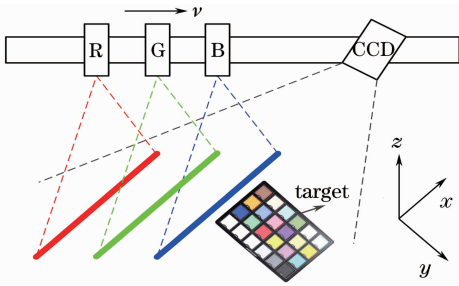


图 1 激光扫描系统

Fig. 1 Laser scanning system

线结构光扫描三维重建方法已经比较成熟,例如在文献[3]已详细介绍此方法,并已重建出单色物体三维形貌。其基本的过程包括相机标定、线光中心提取、坐标转换、三维重建。三维重建的关键公式为

$$\begin{cases} X = \frac{x - a_i}{a_{i+1} - a_i} (c_{i+1} - c_i) + c_i \\ Y = vt \\ Z = \frac{z - b_j}{b_{j+1} - b_j} (d_{j+1} - d_j) + d_j \end{cases}, \quad (1)$$

式中 (x, z) 是特定点的像素坐标, (X, Y, Z) 是特定点的世界坐标, (a_i, b_j) 是某个定标点的像素坐标, (c_i, d_j) 是世界坐标中某点的坐标,线性导轨的扫描速度是 v 。三维重建的步骤可以总结为:1) 读取特定某一点的像素坐标;2) 寻找它最近的 4 个定标点;3) 在像素坐标中计算比例;4) 通过比例利用

表 1 sRGB 和激光颜色空间模型三原色以及白场的色度坐标

Table 1 Chromaticity coordinates of three primary colors and white field for sRGB and laser color space

Chromaticity coordinates	sRGB				Laser space		
	R	G	B	White field	R	G	B
x	0.6400	0.3000	0.1500	0.3127	0.7137	0.3473	0.1771
y	0.3300	0.6000	0.0600	0.3290	0.2863	0.6500	0.0184
z	0.0300	0.1000	0.7900	0.3583	0.0000	0.0026	0.8045

1) 1931CIE XYZ 三刺激值与 sRGB 的三刺激值矩阵转换关系^[7],此关系可以查到

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{sRGB} \\ G_{sRGB} \\ B_{sRGB} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

2) 激光 RGB 颜色空间模型与 1931CIE XYZ 矩阵转换需要计算,根据文献[8]关系如下

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3292 & 0.3783 & 0.2675 \\ 0.1243 & 0.8684 & 0.0074 \\ 0.0000 & 0.0076 & 1.2714 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{laser} \\ G_{laser} \\ B_{laser} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

3) 由(3)式和(4)式相等得到激光 RGB 与

(1)式进行坐标转换;5) 沿着激光扫描方向数据累加重建三维物体。

2.2 颜色恢复

在色度学中,颜色混合是色度学的理论基础,任何一种颜色可以由红、绿、蓝三种原色按照不同的比例混合而成,颜色匹配公式为

$$C = R(R) + G(G) + B(B), \quad (2)$$

式中 C 代表待匹配的颜色, R, G, B 分别代表红、绿、蓝三原色的数量。红、绿、蓝所占比例不同,混合出的颜色也不同。

sRGB 颜色空间^[7]是惠普与微软于 1996 年一起开发的用于显示器、打印机以及因特网的一种标准色彩空间,其三原色和白场坐标如表 1 所示,绝大多数的数码生产厂商都使用 sRGB 作为显示、数码相机、数码摄像机等的标准。实验中以激光作为颜色混合的三原色,而激光三原色与 sRGB 三原色不同,构成的色域也会有差别。为解决颜色上的差别,需要进行颜色空间的变换。激光器的红(650 nm)、绿(550 nm)、蓝(405 nm)三原色的色品坐标如表 1 右边所示;白场是确定三原色比例的关键,将 3 个激光经过扩束准直后垂直照射在标准白上,以 0/45 的方式用 pr650 读出白场色度坐标,调节激光功率直到测量值接近 D65 的色度坐标,此时激光功率比就可以确定了。由白场确定三原色激光比例进而建立激光 RGB 颜色空间与 sRGB 的空间转换关系。激光 RGB 颜色空间模型与标准 sRGB 颜色空间具体的转换关系如下:

sRGB 颜色空间三刺激值之间的关系:

$$\begin{bmatrix} R_{sRGB} \\ G_{sRGB} \\ B_{sRGB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.8757 & -0.1128 & 0.2215 \\ -0.0858 & 1.2627 & -0.1925 \\ -0.0070 & -0.1481 & 1.3573 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{laser} \\ G_{laser} \\ B_{laser} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

在 CCD 采集图像的过程中,需要进行 CCD 的标定。在激光比例(此比例为调节白场时激光功率比)不变的条件下,调节 CCD 的参数响应值,使 CCD 三通道的值都接近于 1,此时三个激光匹配出的就是激光颜色空间的白场。激光扫过色盘等目标物体时,物体反射系数不同,CCD 的值不同,都是小

于1的值。根据颜色匹配公式,物体的颜色就可以匹配出来。并且 CCD 的值为激光 RGB 颜色空间的三刺激值。转换成 sRGB 的三刺激值,将(5)式计算得到的 sRGB 颜色值转换成显示数值(0~255)。

然而空间颜色转化的方法在水下实际应用时,要考虑水下衰减系数的影响,根据常用的水下衰减模型比尔定律:

$$I = I_0 \exp(-cz), \quad (6)$$

式中 I_0 、 I 分别为水下初始位置和光传播到距离为 z 的光能量, c 为衰减系数, z 为水深。当 c 和 z 较大时图像颜色失真较大,需要进行颜色衰减补偿;而当 c 和 z 较小时,例如本实验中在清水中探测深度为 20 cm,图像颜色没有本质的失真,因此可以忽略衰减的补偿。

虽然忽略了衰减的补偿但是本实验仍然进行了一定的激光功率调节,在空气调节三激光的功率,激光扫过色盘灰度色块中的白色色块时,CCD 记录的 RGB 值最大,在水下时调节三激光的功率仍然使 CCD 记录的 RGB 值到最大,此时激光在水下扫描就类似于在空气中。再经过颜色空间转换,恢复出物体真彩色。

3 实验与处理

实验在水池中进行,扫描系统安装在线性导轨上,扫描系统由红绿蓝三种激光和 CCD 组成,红绿蓝三种激光波长分别是 650、550、405 nm,功率分别为 0.116、0.065、0.206 mW,功率比为 1:0.560:1.776,空气中激光线度为 2 mm 左右,激光束的扫描速度为 1.72 mm/s。CCD 是 Imi Tech 公司的 Amazon 系列 IMx-7050G,像素是 2448 pixel × 2048 pixel,帧率为 15 frame/s。目标物体放在水下,目标物体尺寸大约是 6 cm × 7 cm。线性导轨距离物体上方为 60~70 cm,物体在水中深度大约为 20 cm,红绿蓝三种线结构光垂直于目标物体,并且三种线结构光平行,实验示意图如图 1 所示。

实验得到的视频经过一系列的处理最终得到需要的结果,图像处理的具体过程:

1) 视频处理。CCD 采集的视频通过软件 Adobe After Effects 7.0 输出序列图像,序列图像可以利用中值滤波法^[9-10]去噪;

2) 标定。三维标定得到像素坐标和世界坐标^[3]。颜色标定,实验中把 R、G、B 三激光器的功率比调节为:1.000:0.560:1.776;

3) 中心提取。利用(7)式提取绿结构光的中心

线:

$$x' = \frac{\sum_x I_x \cdot x}{\sum_x I_x}, \quad (7)$$

式中 x 是水平方向的像素数, I_x 是相应像素点的光能量, x' 是水平方向线结构光的中心像素。绿激光中心提取结果如图 2 所示;

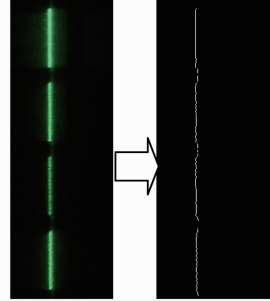


图 2 中心提取图像

Fig. 2 Center extracting image

4) 颜色变换。由序列图像得到激光 RGB 颜色空间的三刺激值,再经过(5)式调整转换成 sRGB 空间的三刺激值,最后在 sRGB 空间转换成二进制(0~255)。如图 3(a)为某时刻相机拍摄示意图像,图 3(b)为 CCD 的记录图像,图 3(c)为三个激光合成的彩色纹理图。彩色纹理图像的值是在 sRGB 空间(0~255)的值;

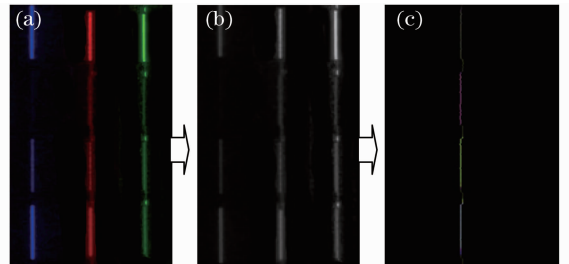


图 3 彩色纹理图像

Fig. 3 Color texture images

5) 三维重建。按 2.1 中三维重建步骤,由(1)式得到 RGB 三色激光扫描目标的三维数据。目标物体上每一点的三维数据,对应于第 4 步中得到的 RGB 颜色数据。彩色三维数据用 Matlab 中的函数 surf 显示,结果如图 5 所示。

4 结果和讨论

图 4 是用佳能-EOS550 相机拍摄的样品原图,其中图 4(a)是水下原图,图 4(b)是空气中的原图,图 5 是线光扫描颜色重建结果,其中图 5(b)和(c)是不同角度的两幅图像。重建结果中小海螺尺寸为

5.9 cm × 3.8 cm × 2.7 cm, 实际尺寸 5.74 cm × 3.65 cm × 2.59 cm, 重建精度达到毫米量级。CCD 分辨率、扫描速度的均匀性、激光光束宽度、导轨稳定性都会影响三维重建的精度, 提高 CCD 分辨率、减小光束宽度可以提高重建的精度。三维重建精度在 x 、 z 轴方向(图 1)主要受相机分辨率、导轨稳定

性影响, y 轴方向受 CCD 分辨率、扫描速度的均匀性、光束宽度影响。将图 4(b) 色盘进行编号, 将 sRGB 颜色空间转化到 Lab 空间进行色差计算, 计算图 5(a) 颜色恢复图像与色盘标准值的色差, 如表 2 为色差计算结果。

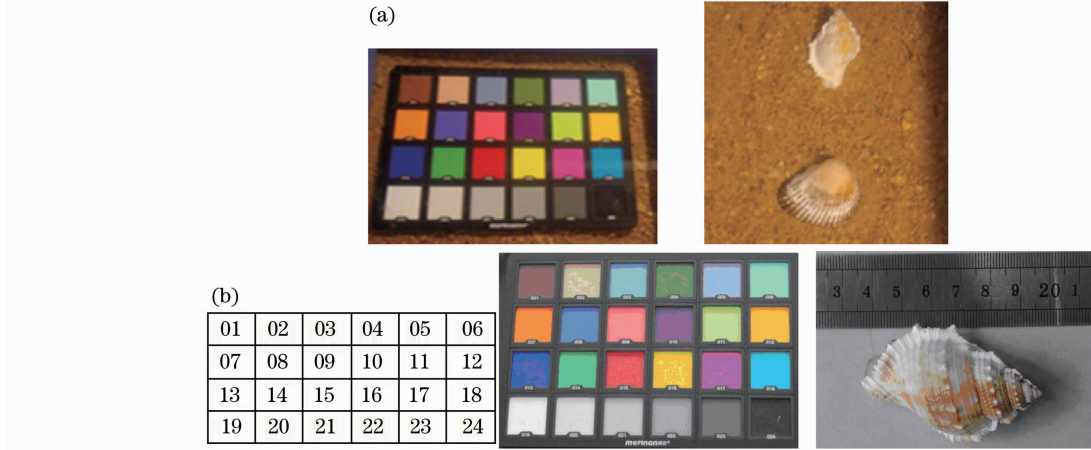


图 4 (a) 色板、贝壳水下图像; (b) 色板、贝壳空气中图像

Fig. 4 (a) Underwater images of color plate and shells; (b) images of color plate and shell in air

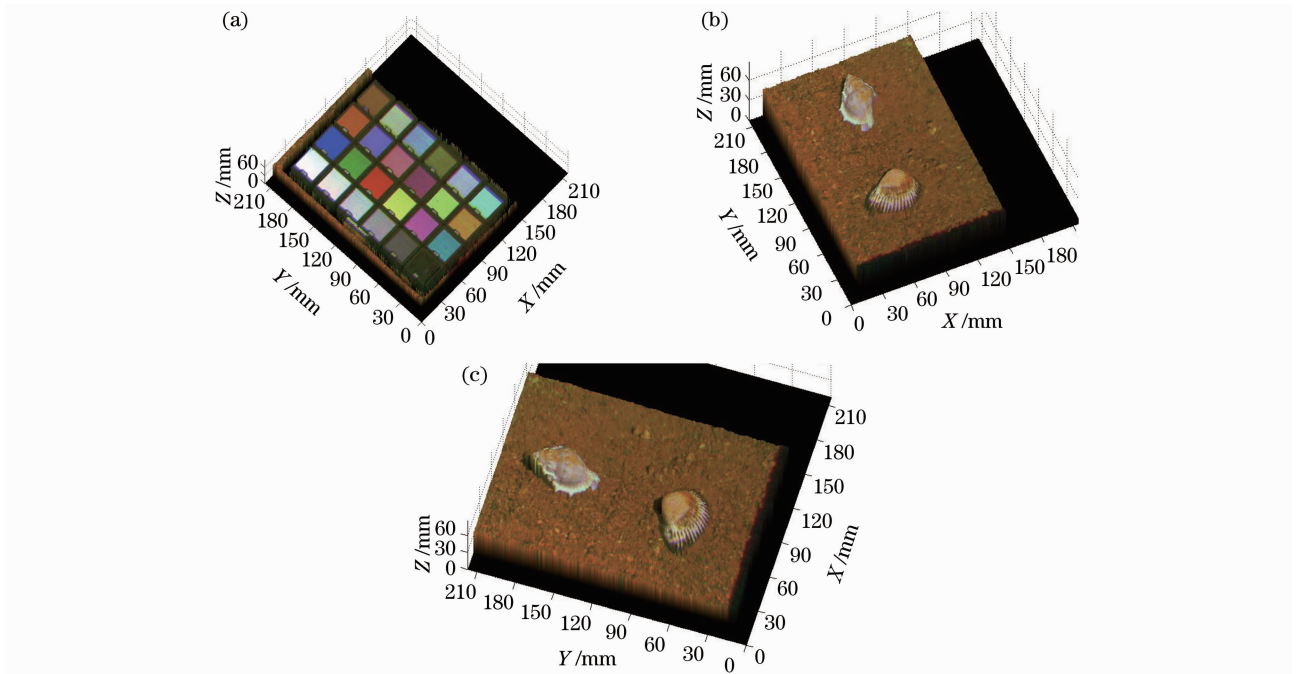


图 5 三维颜色重建结果

Fig. 5 Results of three dimensional color restore images

表 2 色盘颜色恢复图像与色盘标准值色差

Table 2 Color difference of the restored color plate

Sequence number	Color difference $\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$					
01~06	15.3	27.3	6.6	13.3	24.4	9.2
07~12	25.2	8.8	21.6	25.8	2.2	33.5
13~18	25.4	12.7	10.6	23.2	6.2	8.3
19~24	1.0	1.7	5.1	2.0	6.4	8.1

从表 2 数据可知,色盘 19~24 号色块的色差较小,说明白色恢复比较准确,其他色块色差较大,产生较大色差的主要原因是荧光效应以及线结构光能量的均匀性引起个别色块色差较大。

基于激光线扫描颜色空间变换的颜色恢复方法,颜色恢复之后相比于恢复之前色差有所降低。但是仍然存在误差和局限,例如水的吸收和散射、CCD 本身的颜色特性等都会影响颜色恢复结果。下一步工作将测定三个波长的激光在水中的衰减,在不同水深进行颜色重建以及减少色差,以及测定 CCD 的光强响应特性。

5 结 论

提出了一种基于激光线扫描颜色空间变换的颜色恢复方法,通过实验证明,该方法可以将水下物体的真彩色恢复出来,颜色恢复之后相比于恢复之前色差有所减少;并且目标物体的三维信息重建到毫米量级。

参 考 文 献

- 1 F Remondino, S E Hakim. Image-based 3D modelling: A review [J]. The Photogrammetric Record, 2006, 21(115): 269-291.
- 2 C Roman, G Inglis, J Rutter. Application of structured light imaging for high resolution mapping of underwater archaeological sites[C]. OCEANS 2010 IEEE-Sydney, 2010.
- 3 Y Yang, B Zheng, H Zheng, *et al.*. 3D reconstruction for underwater laser line scanning[C]. OCEANS-Bergen, 2013MTS/

- IEEE, 2013.
- 4 Sun Jianfeng, Liu Di, Ge Mingda, *et al.*. Image pre-processing algorithm of underwater target for streak tube imaging lidar[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0714002.
孙剑峰, 刘 迪, 葛明达, 等. 条纹管激光雷达水下目标图像预处理算法[J]. 中国激光, 2013 (7): 0714002.
- 5 J S Jaffe, K D Moore, J Mclean, *et al.*. Underwater optical imaging: status and prospects[J]. Oceanography, 2001, 14(3): 66-76.
- 6 D M Kocak, F M Caimi F M. The current art of underwater imaging with a glimpse of the past and vision of the future[J]. Marine Technology Society Journal, 2005, 39(3): 5-26.
- 7 Liao Ningfang, Shi Junsheng, Wu Wenmin. An Introduction to Digital Color Management System[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009.
廖宁放, 石俊生, 吴文敏. 数字图文图像颜色管理系统概论 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.
- 8 Liu Haoxue, Miao Hongtao. Calculatin of CRT's color and its color management [J]. Journal of Beijing Institute of Graphic Communication, 2003, 11(4): 3-7.
刘浩学, 苗红涛. 显示器的颜色计算和色彩管理[J]. 北京印刷学院学报, 2004, 11(4): 3-7.
- 9 Chen Xiaoqing, Ma Junguo, Zhao Hongzhong, *et al.*. Target recognition algorithm based on two-dimensional wavelet transform for laser imaging radar[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(4): 041001.
陈晓清, 马君国, 赵宏钟, 等. 基于二维小波变换的激光成像雷达目标识别算法[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(4): 041001.
- 10 Lou Shuai, Ding Zhenliang, Yuan Feng. Iterative image restoration algorithm based on contourlet transform[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(10): 2768-2773.
娄 帅, 丁振良, 袁 峰. 基于 Contourlet 变换的迭代图像复原算法[J]. 光学学报, 2009 (10): 2768-2773.

栏目编辑:张浩佳