

文章编号: 0258-7025(2010)08-2010-05

水下线结构光自扫描三维测量技术

解则晓 李绪勇* 辛少辉 徐 尚

(中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要 为了对水下物体进行高速度、大范围的三维测量,提出了水下线结构光自扫描三维测量技术。采用振镜将激光面反射到被测空间,激光面与被测物体相交形成光条并被摄像机拍摄,根据像面上光条中每一点的位置计算出该点由于折射产生的偏移大小并加以补偿。再利用考虑折射后的光平面水中部分在振镜坐标系下的方程,求出物体表面的三维坐标。实验结果表明,所提出的水下自扫描系统模型及水下三维测量方法可行,在深度为 0.5~1 m,测量高度为 0.5 m,测量宽度为 0.6 m 的空间内测量精度达到 0.7 mm。

关键词 水下测量;视觉探测;线结构光自扫描;激光三角法;折射

中图分类号 TM930.12 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103708.2010

Underwater Line Structured-Light Self-Scan Three-Dimension Measuring Technology

Xie Zexiao Li Xuyong Xin Shaohui Xu Shang

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

Abstract In order to achieve three-dimension high-speed and large-scale measurement to underwater objects, an underwater line structured-light self-scan three-dimension measuring technology is presented. A galvanometer is adopted to reflect laser plane onto object's surface. The laser plane intersects the surface of object and a light stripe which is photographed by a camera is formed. According to the position of each point of light stripe on image, the offset caused by refraction is calculated and compensated. Then utilizing the equation of laser plane in water, accurate 3D coordinates of detected points are accurately calculated out. Experimental results show that the model of underwater self-scan system and underwater three-dimension measurement method are feasible. The measurement precision in the space of depth of 0.5~1 m, measuring height of 0.5 m and measuring width of 0.6 m achieves 0.7 mm.

Key words underwater measurement; vision detection; line structured-light self-scan; laser triangulation; refraction

1 引 言

水下物体形貌的三维精确测量在海洋工程领域中具有重要意义和应用价值。目前水下三维测量的技术主要有声纳探测技术^[1]、激光雷达技术^[2]、双目视觉技术^[3]及水下结构光技术等。其中水下结构光测量技术作为一种主动视觉^[4~7]探测手段,具有精度高、成本低和非接触测量等优点,适合在较近的距离对物体表面进行精确测量,且能够在环境光微弱

的深海工作,是当前水下探测技术的一个重要发展方向。

水下结构光测量系统密封在带有玻璃面窗口的密闭容器内。激光器发射的激光平面穿过玻璃面投射在水中的被测物体上,物体表面反射的光线从水中穿过玻璃面进入摄像机。由于水、玻璃和空气的折射率不同,激光及反射光线穿过玻璃面时会发生折射,使测量结果产生较大的误差,常规的结构光技

收稿日期: 2009-12-05; 收到修改稿日期: 2010-03-12

基金项目: 国家 863 计划(2009AA12Z33003)和国家自然科学基金(40976059)资助课题。

作者简介: 解则晓(1968—),男,博士,教授,主要从事逆向工程、光电测试技术和机器视觉等方面的研究。

E-mail: xiezexiao@ouc.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: lixuyong00@gmail.com

术^[8~10]难以直接应用。西班牙 A Coruña 大学的 Gonzalez^[11]提出了采用双摄像机线结构光系统,从水面上方探测水底地形的办法,通过导轨带动系统对水底地形进行扫描,在实际应用中会受波浪的影响且扫描装置较复杂。美国加利福尼亚大学的 Karl D. Moore^[12]及南京航空航天大学丁万山等^[13]研究了点结构光水下探测方法,每次测量只获取一个点的坐标,信息量较少,难以满足水下大范围测量的需要。为了克服现有的结构光水下测量技术的缺陷,实现对水下物体的大范围精确测量,获取完整的物体三维形貌数据,本文提出了水下线结构光自扫描三维测量技术。

2 系统结构

水下测量系统结构示意图如图 1 所示,由摄像机、激光器、振镜及其控制装置构成。摄像机采用日本 Watec 公司生产的 WAT-902B 型摄像机,分辨率为 768 pixel×576 pixel;镜头采用日本 Computar 公司生产的 8 mm 镜头;激光器功率为 30 mW,振镜采用北京世纪桑尼公司生产的 TS8720 系列,振镜控制板采用 ADLink 公司生产的 PCIS-DASK 系列。图 2 为水下测量实验的设备示意图,振镜将激光器发射的光平面反射到被测物体空间,激光平面经玻璃窗口的折射后与被测物体相交形成一条被物体表面调制的光条,此光条包含了物体表面的形状信息,摄像机透过玻璃面拍摄光条形成图像。通过分析像面光条上任一点在像面坐标系下的坐标便可计算出该点对应光线的传播路径,利用折射定律和激光三角法的原理计算出折射产生的偏移并加以补偿,求出该点精确的三维坐标。通过振镜的转动使光平面扫过被测物体,能够完整地获取视场内物体表面点的信息,从而实现对水下物体进行高速高精度大范围测量的目的,解决了目前水下测量领域中缺乏对各种物体、水底地形、泥沙横断面等进行精确、完整的三维测量手段的问题。

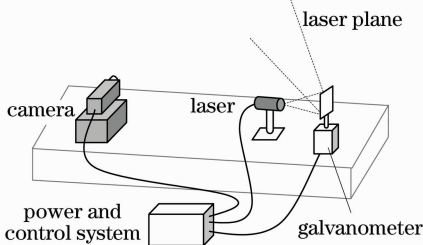


图 1 测量系统结构示意图

Fig. 1 Scheme of measurement system structure

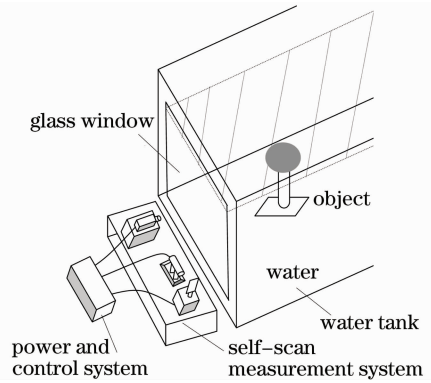


图 2 实验设备示意图

Fig. 2 Scheme of experimental equipment

3 系统模型与三维坐标求解

3.1 系统模型

水下测量系统模型如图 3 所示,摄像机模型为针孔成像模型,建立了如下三个坐标系:

- 1) 振镜坐标系 $O_v x_v y_v z_v$, z_v 轴垂直于玻璃面, y_v 与振镜转轴重合,建立右手直角坐标系。
- 2) 摄像机坐标系 $O x y z$, 原点 O 为摄像机光心, z 轴与摄像机光轴重合, x 轴, y 轴分别与 x_v 轴, y_v 轴平行, f 为摄像机焦距。
- 3) 摄像机像面坐标系 $O' X' Y'$, O' 为摄像机光轴与像面的交点。

定义玻璃面与空气交界面为玻璃面的上表面,玻璃面与水的交界面为玻璃面的下表面。为了求出在摄像机坐标系下被测点实际的三维坐标,建立了相面上点的二维坐标到实际点三维坐标的关系,及空气中光平面方程到水中光平面方程的变化关系。

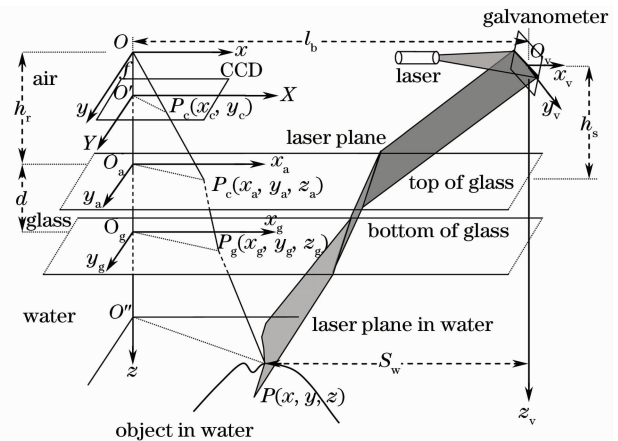


图 3 水下线结构光自扫描系统模型

Fig. 3 Underwater line structured-light self-scan model

3.2 摄像机视线的追踪

振镜反射的激光平面穿过玻璃面投射到被测物

体上形成光条,摄像机透过玻璃面拍摄到此光条形成的光条图像。采用重心法对光条图像进行亚像素中心提取,公式为

$$y_i = \frac{\sum_{j=n-k}^{n+k} [p(i,j) \times j]}{\sum_{j=n-k}^{n+k} p(i,j)}, \quad (1)$$

式中 y_i 为光条第 i 列精确的中心位置, j 为图像第 j 行像素, n 为光条粗略中心, k 为重心法模板宽度的二分之一, $p(i,j)$ 为点 (i,j) 的灰度值。然后,再利用文献[14]中的方法进行畸变校正,该方法能准确快速校正由摄像机镜头畸变引起的图像几何畸变,准确求解镜头的一阶径向畸变参数。

在图3中, $P(x,y,z)$ 为激光面与被测物体相交的光条上一点, $P_c(x_c, y_c)$ 为图像上 $P(x,y,z)$ 点的对应点。 OP 为光线从被测物体传播到摄像机的路径, P_a 和 P_g 为光线经玻璃折射时与玻璃面上表面及下表面的交点。设光线 OP_c 与轴线夹角为 α , 光线在玻璃面中的部分 P_aP_g 与玻璃面法线的夹角为 β , 光线在水中的部分 P_gP 与玻璃面法线的夹角为 γ , $O'P_c$ 与 X 轴夹角为 φ 。根据摄像机针孔成像模型, α, φ 可分别表示为

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\sqrt{x_c^2 + y_c^2}}{f}\right), \quad \varphi = \arctan\left(\frac{y_c}{x_c}\right) \quad (2)$$

式中 x_c 和 y_c 为 P_c 点在摄像机像面坐标系下的坐标, 再根据折射定律得到

$$\beta = \arcsin\left(\frac{n_a \sin \alpha}{n_g}\right), \quad \gamma = \arcsin\left(\frac{n_a \sin \alpha}{n_w}\right), \quad (3)$$

式中 n_a, n_g, n_w 分别为空气、玻璃和水的折射率。由几何关系可知

$$l_{OP} = h_r \tan \alpha + d \tan \beta + (z - h_r - d) \tan \gamma, \quad (4)$$

对于被测目标点 $P(x,y,z)$, 在 xOz 平面的投影有

$$x = l_{OP} \cos \varphi. \quad (5)$$

在 yOz 平面的投影有

$$y = l_{OP} \sin \varphi. \quad (6)$$

式中 h_r 为摄像机光心到玻璃上表面的距离, d 为玻璃面的厚度。

3.3 激光平面的求解

对于振镜反射的激光平面, 设空气中的光面与玻璃面上表面法线的夹角为 θ_a , 光面在玻璃中的部分与玻璃面上下表面法线的夹角均为 θ_g , 光面在水中的部分与玻璃面下表面法线的夹角为 θ_w , S_w 为 $P(x,y,z)$ 点到 y_vOz_v 面的距离。利用折射定律可以得到

$$\sin \theta_g = \frac{n_a \sin \theta_a}{n_g}, \quad \sin \theta_w = \frac{n_a \sin \theta_a}{n_w}, \quad (7)$$

再根据图3中激光面与系统模型的几何关系有

$$S_w = h_s \tan \theta_a + d \tan \theta_g + (z - h_r - d) \tan \theta_w, \quad (8)$$

式中 h_s 为振镜转轴到玻璃面上表面的距离。 θ_a 可以通过振镜的转角来求得。

3.4 三维坐标的求解

由图3可知, 对于摄像机坐标系原点与振镜坐标系原点在 x 轴方向上的距离, 即基线距 l_b 可表示为

$$l_b = S_w + x. \quad (9)$$

由(5), (6), (9)式可得

$$\begin{cases} x = [h_r \tan \alpha + d \tan \beta + (z - h_r - d) \tan \gamma] \cos \varphi \\ y = [h_r \tan \alpha + d \tan \beta + (z - h_r - d) \tan \gamma] \sin \varphi \\ z = \frac{l_b + h_r \cdot m + d \cdot n - h_s \tan \theta_a}{\tan \theta_w + \tan \gamma \cos \varphi} \end{cases} \quad (10)$$

式中 $m = \tan \theta_w + \tan \gamma \cos \varphi - \tan \alpha \cos \varphi$, $n = \tan \theta_w + \tan \gamma \cos \varphi - \tan \beta \cos \varphi - \tan \theta_g$ 。(10)式得到了水中被测点 $P(x,y,z)$ 的三维坐标。

4 实 验

首先对摄像机参数进行标定^[15], CCD摄像机焦距 $f = 8.484935$ mm; 主点位置为 $u_0 = 382.6$ mm, $v_0 = 287.4$ mm; 畸变系数 $k = 0.00135$ 。其次, 标定振镜系统结构参数^[16], 经标定得到基线距 $l_b = 279.26$ mm, 玻璃面厚度 $d = 12$ mm, 摄像机光心到玻璃面的距离 $h_r = 67.2$ mm, 振镜转轴到玻璃面距离 $h_s = 22.7$ mm。空气、玻璃和水的折射率为 $n_a = 1.0001$, $n_g = 1.6667$, $n_w = 1.3333$ 。

实验中系统测量的深度范围为 $0.5 \sim 1$ m; 在深度为 0.75 m 处测量高度约为 0.5 m, 宽度约为 0.6 m。将一个标准球(半径 30.06 mm)放置在水槽中如图4所示的8个位置并分别对其进行测量, 利用获得的球面上的离散数据拟合球, 根据点到拟合球面的最大距离来验证系统的测量精度。表1给出了不同位置下拟合球的半径值及点到拟合球面的最大距离。由表1可知, 在8个位置下测量数据拟合球的半径与实际标准球半径的误差不超过 0.3 mm, 表明该方法具有较好的系统精度。

标准球在位置1到位置6时点到拟合球面的最大距离与测量深度的关系如图5所示。可以看出在位置3的测量精度最高, 因为该点处在深度的中间位置(即景深的中间位置); 由中间位置向前(靠近相机)或向后(远离相机)精度都变低, 但在位置1的精度高于位置6的精度, 这是因为位置1距相机较近,

虽然在景深的边缘,图像较模糊,但该位置下的分辨率最高;而位置6的图像模糊同时分辨率也最低。

由表1可知,在各个位置上点到拟合球面的最大距离小于0.7 mm。另外,可以看出在位置3,7,8处对标准球测量结果的精度相近,表明系统在同一测量深度具有相同的精度。

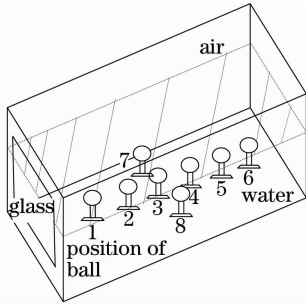


图4 标准球的放置位置

Fig. 4 Positions of standard ball

表1 拟合标准球的误差

Table 1 Error of fitting standard sphere

Positions of ball	Radius of fitted sphere /mm	Maximum distance of points to fitted sphere surface /mm
Position 1	30.342	0.416
Position 2	30.014	0.354
Position 3	30.127	0.323
Position 4	30.316	0.398
Position 5	30.241	0.503
Position 6	29.854	0.647
Position 7	29.936	0.334
Position 8	30.213	0.329

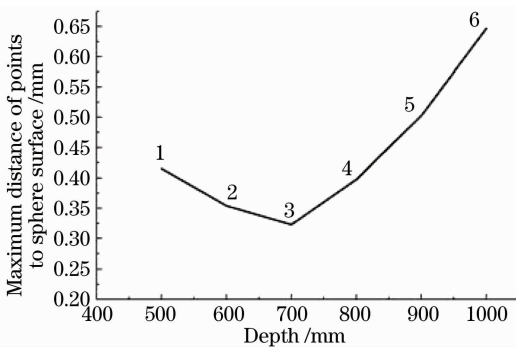


图5 点到拟合球面的最大距离-深度坐标

Fig. 5 Maximum distance of points to sphere surface-depth coordinate

利用本系统对如图6(a)所示的计算机机箱外壳进行测量,图6(b)为测量数据在surface软件里所展示的效果图。从图中可以看出,测量数据能够较好地反映出物体的特征信息,具有较好的分辨率。通过以上实验证实,该系统能够实现对水中物体形貌的三维精确测量。

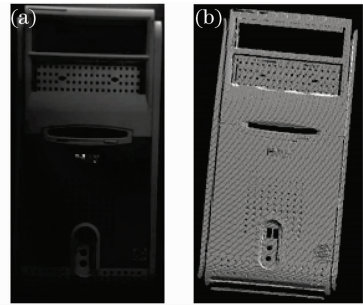


图6 (a)机箱实物图;(b)测量数据效果图

Fig. 6 (a) Chassis physical graphic; (b) measurement data effects picture

5 结 论

提出了基于激光三角法的水下线结构光自扫描测量系统。采用振镜作为扫描装置,通过算法补偿了折射造成的误差,实现了大范围自扫描三维测量。进行了标准球的测量实验,通过对不同位置下的测量数据进行拟合验证了系统精度,结果表明拟合球的半径都接近球的实际半径,且在不同的位置测量精度具有较好的一致性。实验结果表明该方法具有很好的精度,能够满足海底地形地貌的重构,水下结构物探伤,AUV导航等领域的需要。

参 考 文 献

- 1 Son-Cheol Yu. Development of real-time acoustic image recognition system using by autonomous marine vehicle[J]. *Ocean Engineering*, 2008, **35**(1): 90~105
- 2 He Duomin, Gerald. G. L. Seet. Divergent-beam lidar imaging in turbid water[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, **41**(1): 217~231
- 3 Lei Yanzhang, Zhao Huijie, Jiang Hongzhi. A three-dimensional measurement method by combining binocular and monocular vision systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1338~1342
- 雷彦章, 赵慧洁, 姜宏志. 一种单双目视觉系统结合的三维测量方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1338~1342
- 4 Chen Mingsong, Li Tiansong, He Zhiyi. Application research of range-gated technique in underwater laser imaging system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s1): 197~203
- 陈名松, 李天松, 何志毅. 距离选通在水下激光成像系统中的应用[J]. *中国激光*, 2008, **35**(s1): 197~203
- 5 Liu Xueming, Zhang Mingde, Sun Xiaohan. A new kind of underwater laser imaging system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(3): 206~210
- 刘雪明, 张明德, 孙小茜. 一种新型水下激光成像系统[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(3): 206~210
- 6 Sun Jian, Zhang Xiaohui, Ge Weilong *et al.*. Relation between imaging quality and gate-control signal of underwater range-gated imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2185~2190
- 孙健, 张晓晖, 葛卫龙等. 距离选通激光水下成像系统的门控信号对图像质量的影响[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2185~2190
- 7 Wu Di, Lü Naiguang, Ouyang Jing. A structured light three-

- dimensional measurement method based on unconstrained system configuration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 482~486
 吴迪, 吕乃光, 欧阳京. 基于无约束系统的结构光三维测量方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 482~486
- 8 Wu Qingyang, Su Xianyu, Xiang Liqun *et al.*. A new calibration method for two-sensor measurement system based on line-structure light[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 259~264
 吴庆阳, 苏显渝, 向立群等. 线结构光双传感器测量系统的标定方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 259~264
- 9 Wu Qingyang, Li Jingzhen, Su Xianyu *et al.*. An approach for calibrating rotor position of three-dimensional measurement system for line-structure light [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1224~1227
 吴庆阳, 李景镇, 苏显渝等. 线结构光三维测量系统中旋转轴的标定方法[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1224~1227
- 10 Liu Zhen, Zhang Guangjun, Wei Zhenzhong *et al.*. An accurate calibration method for line structured light vision sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3124~3128
 刘震, 张广军, 魏振忠等. 一种高精度线结构光视觉传感器现场标定方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3124~3128
- 11 Enrique Pen Gonzalez, Felix Sanchez-Tembleque Draz-Pache, Luis Pena Mosquera *et al.*. Bidimensional measurement of an underwater sediment surface using a 3D-scanner[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, **39**(3): 481~489
- 12 Karl D. Moore. Intercalibration method for underwater three-dimensional mapping laser line scan systems[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(33): 5991~6004
- 13 Ding Wanshan, Liu Yan. Optical measurement of object's surface three-dimensional shape in water[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 58~62
 丁万山, 刘艳. 水中物体的光学三维形貌测量的研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 58~62
- 14 Zhou Fuqiang, Hu Kun, Zhang Guangjun. Correcting distortion of camera lens with collinear points[J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2006, **42**(9): 174~177
 周富强, 胡坤, 张广军. 基于共线特征点的摄像机镜头畸变校正[J]. *机械工程学报*, 2006, **42**(9): 174~177
- 15 Xie Zexiao, Cheng Chuanjing, Jin Ming. A calibration method for vision sensor based on coplanarity [J]. *China Mechanical Engineering*, 2006, **17**(16): 1690~1693
 解则晓, 程传景, 金明. 基于共面法的视觉传感器的标定方法[J]. *中国机械工程*, 2006, **17**(16): 1690~1693
- 16 Xie Zexiao, Zhang Meifeng, Zhang Zhiwei. Full field of view laser scanning system[J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2007, **43**(11): 189~193
 解则晓, 张梅风, 张志伟. 全场视觉自扫描测量系统[J]. *机械工程学报*, 2007, **43**(11): 189~193