载人潜水器的深海地貌线结构光三维重建

丁忠军[1,2],赵子毅[1],张春堂[1],潘文超[1],刘雨萌[1]

(1. 青岛科技大学 自动化与电子工程学院,山东 青岛 266061;
2. 国家深海基地管理中心,山东 青岛 266061)

摘　要:针对深海环境下通过视觉方法难以实现地貌的大范围、高精度三维重建的问题,提出一种基于“蛟龙号”载人潜水器的线结构光法深海地貌三维重建视觉传感器的设计方案。根据线结构光三维重建的原理,首先改进了 Steger 算法,实现了快速、精准的激光条纹中心线提取;然后利用直接标定法求解出地形特征的二维空间坐标,并克服了图像畸变对重建的影响;再将获得的二维点云与多传感器数据融合,跟随潜水器坐标实时计算偏移量,并根据传感器位姿变化对图像矫正,最终获得地貌的三维点云数据。根据重建原理设计了视觉传感器的软硬件系统, 并搭建了实验模拟平台来验证方案的可行性。通过水下实验可以实现对模拟地貌的完整重建,精度达到 96.9%,符合重建要求。

关键词:三维重建; 线结构光; 数据融合; 视觉传感器

中图分类号:TN247　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.3788/IRLA201948.0503001

3D reconstruction of deep sea geomorphologic linear structured light based on manned submersible

Ding Zhongjun[1,2], Zhao Ziyi[1], Zhang Chuntang[1], Pan Wenchao[1], Liu Yumeng[1]

(1. College of Automation and Electronic Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China;
2. China National Deep Sea Center, Qingdao 266061, China)

Abstract: Aiming at the problem that it was difficult to achieve large-scale and high-precision 3D reconstruction of land form of geomorphology by visual method in deep-sea environment, a design scheme of line structured light 3D reconstruction vision sensor for deep-sea topography features based on Jiaolong manned submersible was presented. According to the principle of 3D reconstruction of linear structured light, firstly, the Steger algorithm was improved to extract the center line of laser fringes quickly and accurately, then direct calibration method was used to solve the 2D spatial coordinates of topographic features, and the influence of image distortion on reconstruction was overcame. Then, the obtained 2D point cloud was fused with multi-sensor data, and the offset was calculated in real time according to the coordinates of the submersible, and the image was corrected according to the change of sensor position and attitude. Finally, the 3D point cloud data of landform was obtained. According to the reconstruction principle, the hardware and software system of the vision sensor was designed, and an

收稿日期:2019-02-11; **修订日期**:2019-04-13

基金项目:国家重点研发计划“深海关键技术与装备”重点专项(2017YFC0306600)

作者简介:丁忠军(1974-),男,研究员,教授,博士,主要从事深海探测技术及装备研发方面的研究。Email:dzj@ndsc.org.cn

experimental simulation platform was built to verify the feasibility of the scheme. Through underwater experiments, the complete reconstruction of simulated geomorphology can be achieved, with an accuracy of 96.9%, which meets the reconstruction requirements.

Key words: 3D reconstruction; linear structured light; data fusion; visual sensor

0 引 言

对深海的地形地貌实现高精度三维重建，在潜水器路径规划、海底矿藏估计、地质勘查等领域有着重要的研究和实用价值[1]。目前常用的深海地形重建方法有多波束测深法、高分辨率测深侧扫声呐法、机器人水下立体摄影法等。深海环境复杂,传统的声学探测方法成像精度低且能耗大，而基于视觉方法的三维重建具有精度高、信息量丰富、抗干扰性好等优点;“蛟龙号”载人潜水器携带视觉传感器可以对地形地貌抵近测量,实现对热液口、结壳区等具有科研价值的目标区域精确重建，由此提出基于载人潜水器的线结构光法海底地貌三维重建视觉传感器的设计方案。

近年来，通过视觉方法对于单个物体的高精度三维重建算法已比较成熟,郑太雄[2]对各种基于视觉方法的三维重建研究工作进行了总结和分析,结构光法具有能耗低、抗干扰性强、实时重建等优点。目前市面上已有大量视觉三维重建的产品投入应用，华为 Mate20 pro 手机利用 3D 结构光可以实现目标建模和人脸识别功能。但在深海大范围长时序的地形地貌重建研究方面,国内的发展还不成熟,特别是在水下复杂环境中，目前还存在很多关键性问题未得到解决。

线结构光法三维重建是利用高亮度激光投射到物体表面发生偏折后，摄像头获取含有激光线的图片,通过图像处理算法提取激光条纹中心线后,再利用标定算法将激光线的中心坐标转换成真实的空间二维坐标，之后对目标连续拍摄并确定图像间的实际间距,可以得到实现重建的三维点云数据。在深海环境下,潜水器携带的能源有限,地形测量时应保证航行速度,但这会导致图像采集量减少,所以实现长时序、大范围的三维重建要求算法应简单快速才能满足实际应用条件。视觉传感器采集的地貌点云数据必须跟潜水器的实际航位匹配才能实现这一区域的重建，但潜水器的位置坐标主要通过与母船远程超短基线通讯来确定,这一过程存在较大的时延,且潜水器航行过程中会产生难以避免的姿态改变,这就需要通过多传感器数据融合来进行航位推算和偏移矫正，才能实现准确位置的重建。文中通过改进 Steger[3]算法,实现了快速亚像素级激光条纹中心线提取；设计了直接标定法进行图像坐标到空间坐标的转换,克服了水下图像畸变对重建精度的影响;基于“蛟龙号”的多传感器平台进行数据融合,根据潜水器姿态对图像进行偏移矫正与重组，实现大范围三维点云的获取；最后提出了视觉传感器的软硬件设计方案,并通过实验验证可行性。

1 激光中心线提取

1.1 提取原理

能够精确提取图像中激光条纹的中心线决定了重建结果的精度,算法的运算量决定了重建的速度。Steger 利用 Hessian 矩阵得到激光条纹的法线方向,再将法线方向的极值点确定为光条中心，由此获得了亚像素级的中心线,但算法的运算量太大,无法满足实际应用情况下的高频拍摄要求。文中使用高斯卷积递归的方法来获得 Hessian 矩阵,再通过泰勒级数展开求解法线方向条纹中心，可以大大减小运算时间。

在 Steger 算法中,图像上任意一点 $p(x,y)$的 Hessian 矩阵表示为：

$$H(x,y)=\begin{Bmatrix} r_{xx} & r_{xy} \\ r_{xy} & r_{yy} \end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix} \dfrac{\partial^2 g(x,y)}{\partial x^2} & \dfrac{\partial^2 g(x,y)}{\partial x\partial y} \\ \dfrac{\partial^2 g(x,y)}{\partial x\partial y} & \dfrac{\partial^2 g(x,y)}{\partial y^2} \end{Bmatrix}\otimes z(x,y) \quad (1)$$

式中：r_{xx} 表示图像 $z(x,y)$沿 x 的二阶偏导数；$g(x,y)$为二维高斯函数,其他参数类似。在求 Hessian 矩阵时，对图像中的每点都要进行多次二维高斯卷积计算,使算法运算量太大。二维高斯运算根据参考文献[4],通过递归迭代法可以大大减小运算量。

首先,对图像做一次前向递归。输入图像为 in[n],

图像的高斯卷积前向输出计算公式为：

$$w[n]=B\text{in}[n]+(b_1w[n-1]+b_2w[n-2]+b_3w[n-3])/b_0 \quad (2)$$

一阶微分和二阶微分的高斯卷积前向递归输出为 $w'[n]$ 和 $w''[n]$。然后根据输出结果再做一次后向递归，计算公式为：

$$\text{out}[n]=Bw[n]+(b_1\text{out}[n+1]+b_2\text{out}[n+2]+b_3\text{out}[n+3])/b_0 \quad (3)$$

一阶微分和二阶微分的高斯卷积后向递归输出为 $\text{out}'[n]$ 和 $\text{out}''[n]$。其中：

$$B=1-((b_1+b_2+b_3)/b_0) \quad (4)$$

$$b_0=1.578\,25+2.444\,13q+1.428q^2+0.422\,205q^3$$

$$b_1=2.444\,13q+2.856\,19q^2+1.266\,61q^3$$

$$b_2=-(1.428\,1q^2+1.266\,61q^3)$$

$$b_3=0.422\,220\,5q^3$$

$$q=\begin{cases}0.987\,11\delta_0-0.962\,20 & \delta_0\geqslant 2.5\\ 3.971\,56-4.145\,54\sqrt{1-0.268\,91\delta_0} & 0.5\leqslant\delta_0\leqslant 2.5\end{cases} \quad (5)$$

δ_0 为卷积窗口的尺寸。在计算 Hessian 矩阵时，首先确定高斯参数 δ_0，得到递归系数 q,B,b_0,b_1,b_2,b_3；然后，根据高斯函数的可分离性，先后对图像进行行方向和列方向上的递归卷积，利用高斯及其微分形式卷积的递归表达式计算 $r_x,r_y,r_{xx},r_{yy},r_{xy}$，得到 Hessian 矩阵。

Hessian 矩阵最大特征值对应的特征向量为光条的法线方向，表示为 (n_x,n_y)，以点 (x_0,y_0) 为基准点，对光条横截面上的灰度分布函数进行二阶泰勒展开，得到光条中心的亚像素坐标为：$(p_x,p_y)=(x_0+tn_x,y_0+tn_y)$。

其中：

$$t=-\frac{n_xr_x+n_yr_y}{n_x^2r_{xx}+2n_xn_yr_{xy}+n_y^2r_{yy}} \quad (6)$$

如果 $(tn_x,tn_y)\in[-0.5,0.5]\times[-0.5,0.5]$，即一阶导数为零的点位于当前像素内，且 (n_x,n_y) 方向的二阶导数大于指定的阈值，则该点 (x_0,y_0) 为光条的中心点。

1.2 提取效果

文中利用改进的 Steger 算法，在 Intel Core 2.80 GHz 的 PC 端，利用 Visual Stadio 2015 编写 C++程序进行验证。根据高斯函数的可分离性，图像的二维高斯卷积可以等效为一次高斯行卷积和一次高斯列卷积，文中分别进行了分离卷积算法和改进算法的激光条纹中心线提取实验。选取高斯参数 $\delta_0=4$，高斯卷积模板的大小取 $8\delta_0+1=33$，处理同一幅为 512 pixel×512 pixel 的图像，采用分离高斯卷积实现算法的卷积运算量为 8×33×512×512=69 206 016 次乘加；采用递归实现算法的卷积运算量为 8×8×512×512=16 777 216 次乘加，处理时间可以缩短 4.125 倍。经过试验，处理所需时间分别为 763 ms 和 152 ms，与计算结果较为相符。实验如图 1 所示，图 1(a)中向石块投射线激光，图 1(b)显示激光条纹中心线的提取情况，由此可知，改进 Steger 算法提取效果良好，大大减小了计算量，显著地提高了算法的速度。

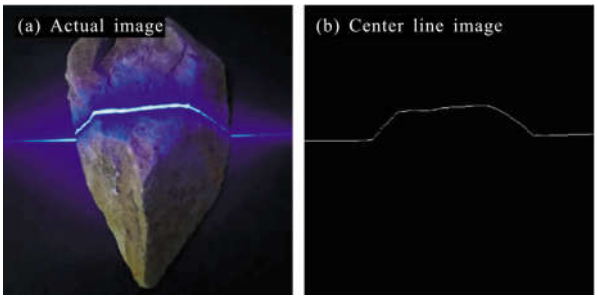

图 1 激光条纹中心线提取效果

Fig.1 Laser stripe center line extraction effect

2 结构光三维重构系统水下标定

2.1 标定原理

系统标定是为了将图像点通过激光与摄像机的几何位置关系，转换到真实空间中的三维坐标点以实现空间重建。三维重建系统的标定大多首先需要标定摄像机的内外参数获得平面单应，再结合多摄像机或激光线辅助确定投影方程，计算空间点和图像点的代数关系。但这种方法大多局限于实验室环境，标定过程繁琐，算法运行较慢，不适用于实际水下环境。

文中采用直接标定法，标定原理如图 2 所示。

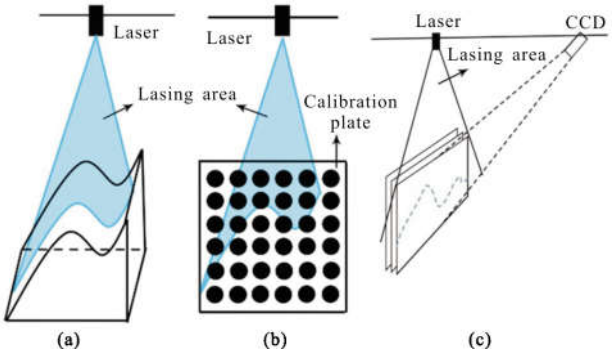

图 2 标定原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of calibration principle

图2(a)表示激光器由上而下发射的三角形激光面会在待测物体表面会形成结构光条纹,图 2(b)中将标定板放于激光器正下方,与激光面区域相重合,图 2(a)中结构光条纹会呈现在相对应的区域。图 2(c)表示当视觉传感器移动时,根据连续采集的图像间的实际距离间隔可以实现二维坐标到三维坐标的转化。

标定板上圆的实际尺寸和间距已知，以圆的圆心作为特征点,当标定板与激光面重合时,激光条纹被限制在激光平面上，使得图像坐标与空间三维坐标间存在一一对应的关系，摄像头拍摄到的标定面图像中,两相邻椭圆质心间对应的空间距离,即标定板上两特征点的实际间距。

直接标定法就是要建立联系图像坐标与已知坐标间的索引表,再根据交比不变性原理,使用非线性插值算法确定每个像素点的真实坐标。

2.2 插值算法

由于索引表只是确定了特征点与空间坐标的对应,其他点的三维坐标需要使用插值算法求得。透视投影模型是摄像机的非线性模型，利用其交比不变和消隐点的几何特性给出非线性插值公式。

图 3(a)中 T 是所求点,A、B、C、D 是标定板上相邻 T 点最近的四个特征点，其坐标分别为 $A(X_A,Y_A,Z_A)$、$B(X_B,Y_B,Z_B)$、$C(X_C,Y_C,Z_C)$、$D(X_D,Y_D,Z_D)$、$T(X_T,Y_T,Z_T)$,N 是 AB 的中点,坐标为 $N(X_N,Y_N,Z_N)$,M 是 AD 的中点,坐标为 $M(X_M,Y_M,Z_M)$;做 TE 垂直于 AB 交于点 $E(X_E,Y_E,Z_E)$,TF 垂直于 AD 交于点 $F(X_F,Y_F,Z_F)$,则所求 $X_T=X_F$,$Y_T=Y_E$。

图 3(b)中 a、b、c、d 是摄像头获取图像中 A、B、C、D 对应的像点,其坐标分别为 $a(x_a,y_a)$、$b(x_b,y_b)$、$c(x_c,y_c)$、$d(x_d,y_d)$、$t(x_t,y_t)$。由 a、b、c、d 四点可得到 p、q 两消隐点的坐标,ac、bd 相交于 o 点,po 的延长线与 ab 交于 n 点,pt 的延长线与 ab 交于 e 点;qo 的延长线与 ad 交于 m 点,qt 的延长线与 ad 交于 f 点;由此在二维图像中上述点坐标皆已知，根据交比不变性原理：

$$CR(A,F,M,D)=CR'(a,f,m,d)$$
$$CR(A,E,N,B)=CR'(a,e,n,b) \tag{7}$$

即

$$\frac{DF}{FM}/\frac{DA}{AM}=\frac{df}{fm}/\frac{da}{am}$$
$$\frac{BE}{EN}/\frac{BA}{AN}=\frac{be}{en}/\frac{ba}{an} \tag{8}$$

设 $FM=X$,$EN=Y$,则 $X_T=AM-X$,$Y_T=AN-Y$。

$$X=\frac{DM\times AM\times fm\times da}{DA\times df\times am-AM\times fm\times da}$$
$$Y=\frac{BN\times AN\times en\times ba}{BA\times be\times an-AN\times en\times ba} \tag{9}$$

由此,对于图 3(a)上的点 T,通过插值算法可以将该点的图像坐标 $t(x_t,y_t)$转化为空间中二维平面的实际坐标 $T(X_t,Y_t)$。T 点的第三维坐标再通过视觉传感器行进时采集的两幅图像间的实际距离获得。

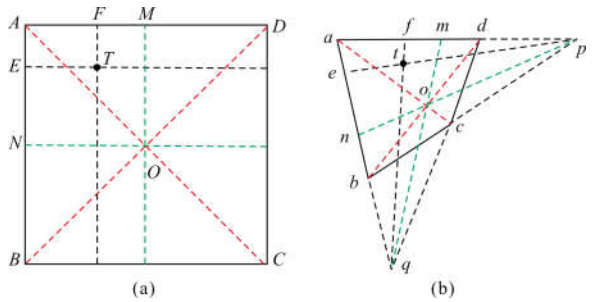

图 3 插值算法原理图

Fig.3 Interpolation algorithm schematic diagram

2.3 空间坐标转化

三维重建时首先需要确定坐标系，一般图像坐标系定义左上角为原点,横轴为 x 轴,纵轴为 y 轴。在文中,为了与传感器的数据融合方便,坐标系定义如图 4 所示。

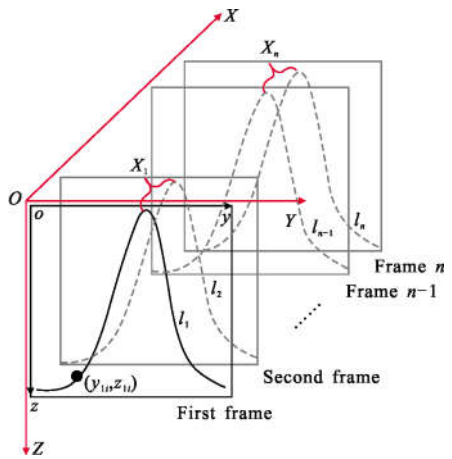

图 4 重建系统示意图

Fig.4 Schematic diagram of reconstruction system

定义图像坐标系为 oyz,左上角为原点,oy 为横轴,oz 为纵轴。从图像中通过改进的 Steger 算法提取的信息为表征地形起伏变化的激光条纹中心线 l_1,第一张图像组成激光线的点集为 $\{(y_{1i},z_{1i})|(y_{11},z_{11})$,

$(y_{12},z_{12})\cdots(y_{1n},z_{1n})\}$，将中心线 l_1 同标定板进行匹配后，可以将 l_1 上的二维像素坐标(y_{1i},z_{1i})转化为空间真实点坐标$(1,Y_{1i},Z_{1i})$。控制摄像头延垂直图像方向前进，拍摄处理后获得激光线序列$(l_1,l_2,\cdots,l_n)$，记录每次采集图像的间距 $X_1,X_2,\cdots,X_n$，设激光线 l_1 的 X 坐标为 $X_1=0$，则 l_1 上的激光线中心空间点坐标为(X_1,Y_{1i},Z_{1i})，l_n 上的空间点坐标为(X_n,Y_{ni},Z_{ni})，n 表示第 n 张图像，i 表示图像中第 i 个点。由此获得激光线的空间三维点云信息，并在之后与蛟龙号的传感器数据进行融合。

视觉传感器对目标区域的地形地貌在成像过程中，光线传播会通过水-玻璃-空气三种介质。光线通过不同介质时会发生折射现象，这会导致成像发生畸变。视觉传感器使用前在蛟龙号实验水池进行标定，实验水池可以根据传感器获取的数据对深海环境进行模拟，保证与实际海底应用时的折射率差异很小；直接标定法在标定时将视觉传感器和标定板都位于实验水池的水下环境，坐标转化时的标定面即摄像头拍摄的发生折射散射后的标定板，与获取目标图像所处环境一致，这样可以屏蔽畸变对成像的干扰。在实际应用过程中，标定时只需潜水器在实验水池中对标定板进行一次标定即可，节省了标定时间，降低了标定复杂度。

3 数据融合与矫正

3.1 多传感器数据融合

蛟龙号载人潜水器搭载视觉传感器实现对目标区域地形地貌的三维重建，需要根据潜水器的位置坐标将图像中的有效信息进行重组并矫正，才能得到精准的深海地形图。

蛟龙号的导航定位系统搭载了运动传感器、深度计、高度计、多普勒测速计程仪、远程超短基线定位声纳、GPS 等，通过这些传感器所提供的数据可以实现潜水器精准的导航定位和位姿确定，潜水器的综合显示平台与多传感器数据平台。

在讨论载人潜水器导航与定位问题时，也应规定坐标系，如图 5 所示。首先确定一个固定坐标系$(E-XYZ)$，其中，EZ 指向地心，水平面采用北东坐标系，原点可以为空间内任意一点。此外还要定义动坐标系$(O-xyz)$，动坐标系是与载人潜水器固联在一起，ox 轴与载人潜水器的主对称轴取向一致，x 轴方向的速度为 u，oz 轴垂直向下，z 轴方向速度为 w，oy 轴垂直于 oxz 平面，y 轴方向速度为 v。

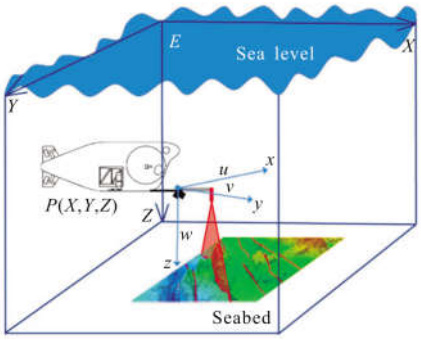

图 5 潜水器坐标系

Fig.5 Submersible coordinate system

由于潜水器作业过程中母船是随机移动的，没有相对固定的参考点，只能计算出每一时刻潜水器与母船的相对位置。所以要把载人潜水器的坐标转化到惯性导航坐标系中，潜水器的经纬度坐标(X_λ,Y_L)表示为：

$$X_\lambda=\left[X_O-\frac{360^\circ}{\cos\left(\frac{\pi}{180}Y_O\right)}\cdot\lambda\right]/\cos\left(\frac{\pi}{180}Y_O\right)$$

$$Y_L=Y_O-\frac{360}{R}\cdot L \tag{10}$$

式中：(X_O,Y_O)为母船的经纬度坐标；λ，L 为母船与潜水器的相对距离；R 为地球半径。

载人潜水器在航位估计之前，先确定起始位置，确定这时潜水器的经纬度坐标及深度值。这时潜水器在固定坐标系中的坐标为$(0,0,0)$，当航行时，位置坐标开始实时变化，记为(X_λ,Y_L,Z_D)。确定潜水器水平面内的精确位置坐标(X_λ,Y_L)主要是通过远程超短基线定位声纳，但是由于声波在水中的传输时延，无法得到实时信息，所以，在时延期间需要通过其他传感器对航位进行推算。

通过潜水器携带的多种传感器，可以确定潜水器沿动坐标系内二维速度分量为 u、v，航向角为 θ，纵倾角为 ψ，深度为 Z、高度值为 h。所有导航设备获取的数据都可能会有干扰噪声，所以使用卡尔曼滤波器进行数据滤波处理，剔除跳跃大的不准确数据后再进行航位推算。

设一次应答过程中声波在水中的传播时间为 $t=d\times T_S$，T_S 为系统的采样周期，声波传播共经过 d 个周期。假定在 $t_1=k\times T_S$ 时刻水声应答器向接收基阵发出

定位信号，k 表示 t_1 时刻前系统采样的周期数，由于传输时延，载人潜水器要在 $t_2=(k+d)T_S$ 才能接收到 t_1 时刻的位置信息(X_{t_1},Y_{t_1})。所以，在 t_2 时刻载人潜水器的位置估计为：

$$\begin{cases} X_{t_2}=X_k+\sum_{i=1}^{d}[u(m)\cos\theta(m)\cos\psi(m)-v(m)\sin(m)\cos\psi(m)]T_S \\ Y_{t_2}=Y_k+\sum_{i=1}^{d}[u(m)\sin\theta(m)\cos\psi(m)+v(m)\cos\theta(m)\cos\psi(m)]T_S \end{cases} \tag{11}$$

式中：i 表示上一次确定坐标后经过的采样周期。所以，定义在航行中的任意时刻 t，此时潜水器的经纬度坐标$(X_{\lambda t},Y_{Lt})$由上一次超短基线定位系统获得的位置坐标确定。

潜水器携带的温盐深传感器的深度测量精度是 0.01%，且可以实时测量，满足定深要求，数据经过预处理后可以直接确定深度 Z_{Dt}。所以通过多传感器的数据融合，可以确定任一时刻 t 潜水器的位置坐标$(X_{\lambda t},Y_{Lt},Z_{Dt})$，再将该坐标与视觉传感器获得的地形信息融合来实现三维重建。

在视觉传感器对地形开始扫描前，首先潜水器悬停定位，记录此时的三维坐标$(X_{\lambda 1},Y_{L1},Z_{D1})$并记为初始点。开始扫描时，将在初始点获取的图像标记为原点图像，其他时刻根据该时刻 t 潜水器坐标$(X_{\lambda t},Y_{Lt},Z_{Dt})$与初始点坐标的偏移量，将获取的地形点集$(1,Y_{ni},Z_{ni})$进行偏移，公式如下：

$$\begin{bmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \end{bmatrix}=T_t+\begin{bmatrix} 1 \\ Y_{ni} \\ Z_{ni} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} X_{\lambda t}-X_{\lambda 1} \\ Y_{Lt}-Y_{L1} \\ Z_{Dt}-Z_{D1} \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} 1 \\ Y_{ni} \\ Z_{ni} \end{bmatrix} \tag{12}$$

式中：T_t 为偏移矩阵。由此，则得到这一时刻下的三维点集(X_t,Y_t,Z_t)，将三维点集组合便是这一扫描范围内的三维点云坐标。

3.2 图像矫正

在深海作业环境下，载人潜水器携带视觉传感器进行移动扫描时，由于外部环境因素以及载人潜水器的自身因素，会导致在扫描过程中产生偏移、倾斜等姿态上的改变，会严重影响最终实验的精度，通过潜水器上的光纤陀螺和倾角仪等根据潜水器姿态对图像信息进行矫正可实现更精确的三维重建。在对地形进行扫描时，潜水器一般是在同一平面内航行，不进行俯仰升降操作，所以对重建精度影响最严重的是横摇产生的侧倾角，艏摇和转向产生的转向角。

侧倾矫正：当潜水器横摇时产生侧倾角，视觉传感器会跟随发生旋转，设图像的旋转中心是图像的中心点，坐标为(o_y,o_z)，设源图像上任意点坐标为(y,z)，旋转后目标图像对若在极坐标下将图像顺时针旋转 ϕ，根据坐标转换得：应点坐标为(y',z')。

$$\begin{cases} y'=r\cos(\alpha-\phi) \\ z'=r\sin(\alpha-\phi) \end{cases} \tag{13}$$

将其转化成矩阵表达形式为：

$$[1,y',z']=[1,y,z]\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \tag{14}$$

转向矫正：在潜水器艏摇或航行转向时，会产生转向角，图像在 oxy 平面的坐标信息已偏离原航线，需要矫正到正确位置。视觉传感器由一帧图像获取的地形三维坐标点为(X_t,Y_t,Z_t)，若在极坐标下将图像顺时针旋转 θ，根据坐标转换得：

$$\begin{cases} X_t'=r\cos(\alpha-\phi) \\ Y_t'=r\sin(\alpha-\phi) \end{cases} \tag{15}$$

将其转化成矩阵表达形式为：

$$[X_t',Y_t',1]=[X_t,Y_t,1]\begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{16}$$

则经过坐标转换后图像上的点坐标为：

$$\begin{bmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\times \left[T_t+\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix}\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}\right] \tag{17}$$

经过矫正，可以消除潜水器侧倾和转向时对图像的影响而造成三维重建的畸变。

4 视觉传感器设计

三维重建系统能够真正用于深海探测，需要实际的传感器设计方案。对此，设计采用 IDP Express

高速视觉平台，它包含 FPGA 板和一个高度封装摄像头，FPGA 板可搭载图像处理算法，摄像头可以以最快 2 000 帧/s 的速率拍摄分辨率为 512 pixel×512 pixel 的图像，使用 Nanoline Laser TM 的 Husky 线激光器，使用水密缆通过 PCI-E 总线与潜水器进行数据传输；传感器外壳使用钛合金材料，可以耐腐蚀耐高压。整体方案如图 6 所示。

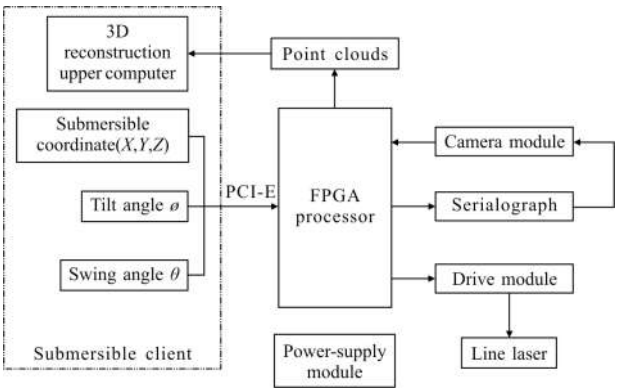

图 6 硬件系统设计方案

Fig.6 Design scheme of hardware system

同时，文中根据重建系统的激光中心提取、直接标定、数据融合的原理设计了 FPGA 处理器内的程序系统，程序流程如图 7 所示。

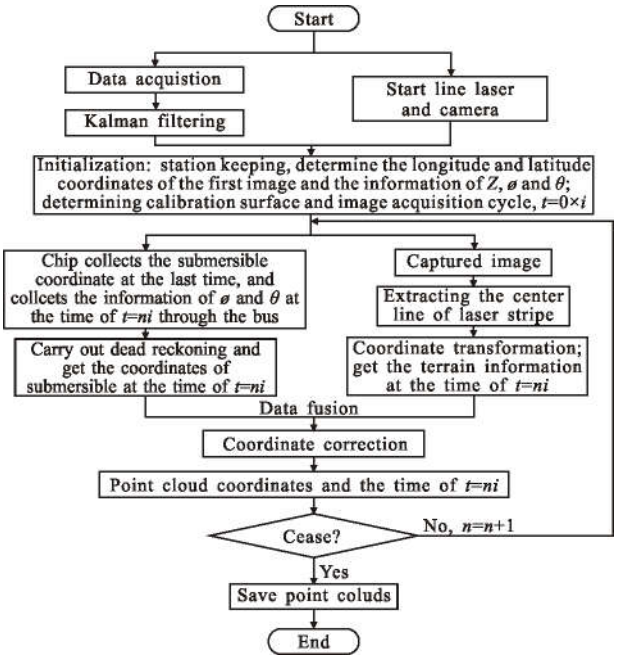

图 7 程序设计流程图

Fig.7 Programming flow diagram

5 实验模拟

5.1 实验平台

针对三维重建系统的设计，搭建了实验室环境下的模拟控制平台来进行仿真，由于蛟龙号的数据采集是用于实现大范围地形数据整合，文中主要验证重建原理的可行性。搭建平台如图 8 所示，模拟系统由视觉传感器和水下行进模拟器构成，并在水面添加玻璃模拟实际传感器应用环境。视觉传感器通过 NXP.i.MX7D 的核心板搭载 Linux 系统进行控制，驱动线激光器由上而下发射线结构光，同时控制无畸变摄像头定时拍摄，拍摄间隔 t 秒；在 Linux 系统下开发图像处理软件，对拍摄的照片进行预处理和激光线点云提取，通过标定转换，可以得到激光线上每个点真实的 X、Y 坐标，记录该二维点云和时间信息。

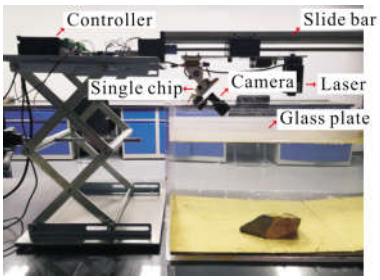

图 8 三维重建模拟平台

Fig.8 Simulation platform for 3D reconstruction system

水下行进模拟器由控制器驱动丝杆滑轨的步进电机转动，带动视觉传感器匀速行进与扫描；设定行进速度 v，可以得到两张照片的拍摄时的距离间隔 $Z_t=vt$，根据标定初始拍摄位置，即可得到每条激光点云的 Z 坐标，进而获得三维点云信息并储存在 SD 卡内，在 PC 端通过 MeshLab 软件进行三维重建，至此潜航器三维重构模拟系统构建完成。

5.2 实验结果

文中对石块进行测试，以 10 帧/s 的速度拍摄，整个石块扫描时长 15 s，t=0.1 s，v=10 mm/s，图像间隔 Z_t=1 mm，共获取 150 幅图像，将传感器获取的点云数据使用 MeshLab 进行重建，得到结果如图 9 所示。

使用游标卡尺测量实际石块的部分区域的长、宽、高，再与重建的结果相比较，以检测实验结果的精度。文中对重建精准度测试的试验共进行了15 次，试验测试结果如表 1 所示，图 9 显示了其中 3 次对

目标物体长宽高的测试结果图片。

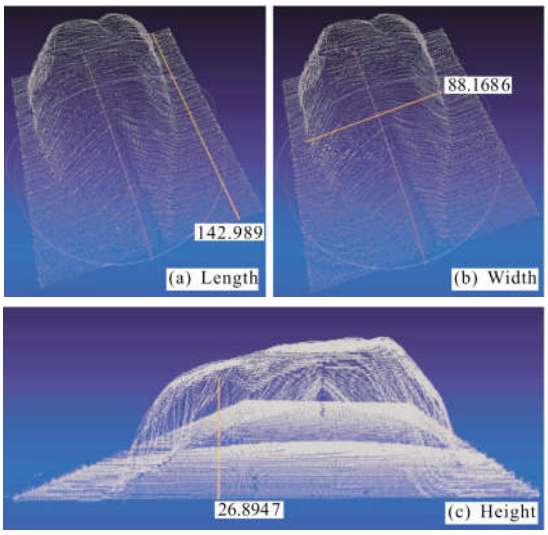

图 9 三维重建效果图

Fig.9 Results of 3D reconstruction

根据测试结果,对目标 X 轴方向重建的平均精确度为 96.3%, 对 Y 轴方向重建的平均精确度为 97.1%,对 Z 轴方向重建的平均精确度为 97.2%。可以发现,重建整体精度达到 96.9%,其中,基于直接标定法的 Y、Z 方向精度更高,X 轴方向由于是根据传感器运动速度与拍摄时间间隔确定的, 误差略大,但实验结果整体满足重建要求。对于文中的数据融合部分,“蛟龙号”载人潜水器预留有进行信息传输的水密接插口, 方便与携带的设备进行交互,多传感器平台可以直接将相关数据传输至控制器进行运算。目前“蛟龙号”潜水器仍处于大修阶段,暂无法进行海试,所以文中通过丝杠滑杆带动视觉传感器行进对航行进行模拟, 验证了设备的可行性,后期将会针对与潜水器的数据融合部分进行调试,并实现应用。

表 1 精度对比表

Tab.1 Accuracy comparison table

Test times	Length/mm			Width/mm			Height/mm		
	Test	Actual	Accuracy	Test	Actual	Accuracy	Test	Actual	Accuracy
1	142.989	138.69	0.969	88.169	86.58	0.982	26.893	26.35	0.979
2	125.961	121.87	0.966	86.413	83.97	0.971	30.457	28.86	0.945
3	115.433	112.24	0.972	80.462	78.26	0.972	12.483	12.28	0.983
4	78.296	75.81	0.967	71.533	69.16	0.966	24.553	23.69	0.964
5	55.069 5	51.98	0.941	44.099	42.61	0.965	34.233	33.88	0.990

6 结 论

文中提出了基于“蛟龙号”载人潜水器的深海线结构光三维重建的视觉传感器设计方案, 针对激光条纹中心线提取精度与速度难以兼顾的问题, 利用高斯迭代进行加速;针对水下标定复杂的难题,采用直接标定法,简化标定过程,克服畸变影响;并根据实际应用情况与蛟龙号多传感器平台进行数据融合与矫正,实现大范围高精度三维重建。另外,为了验证设计的合理性,搭建了模拟实验平台,验证了重建的可行了,经过实验发现,该模拟视觉传感器的三维重建精度可以达到 97.4%,满足实际应用要求。

参考文献:

[1] Dong Hui, Kong Qianqian, Wen Yanan, et al. Research on underwater target color three-dimensional reconstruction mehod [J]. ***Electro-optic Technology Application***, 2017, 32 (3): 46-48, 58. (in Chinese)

[2] Zheng Taixiong, Huang Shuai, Li Yongfu, et al. Key techniques for vision based 3D reconstruction: A review [J]. ***Acta Automatica Sinica***, 2018(11): 1-22. (in Chinese)

[3] Steger C. An unbiased detector of curvilinear structures [J]. ***IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence***, 1998, 20(2): 113-125.

[4] Young I T, Vliet L J V. Recursive implementation of the

Gaussian filter[J]. ***Signal Processing***, 1995, 44(95): 139-151.

[5] Wang Zongyi, Li Hongwei, Li Dianpu, et al. A direct calibration method for structured light [C]//Mechatronics & Automation, IEEE International Conference, 2005: 1283-1287.

[6] Liu Kaizhou, Zhu Puqiang, Zhao Yang, et al. Research on the control system of human occupied vehicle "Jiaolong"[J]. ***Chinese Science Bulletin***, 2013, 58(S2): 40-48. (in Chinese)

[7] Qu Y, Huang J, Zhang X. Rapid 3D reconstruction for image sequence acquired from UAV camera [J]. ***Sensors***, 2018,18 (1): 225-244.

[8] Sun Xingwei, Yu Xinyu, Dong Zhixu, et al. High accuracy measurement model of laser triangulation method [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2018, 47(9): 0906008. (in Chinese)

[9] Yang Hongfei, Xia Hui, Chen Xin, et al. Application of image fusion in 3D reconstruction of space target [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2018, 47(9): 0926002. (in Chinese)

[10] Zhan Kunfeng, Chen Wenjian, Li Wuseng, et al. Line laser 3D scene reconstruction system and error analysis [J]. ***Chinese Journal of Lasers***, 2018, 45 (12): 1204004. (in Chinese)