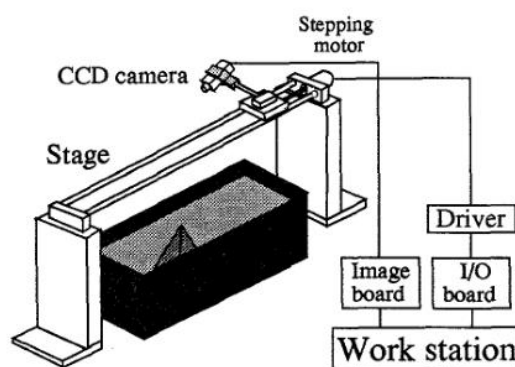


[1] Hideo SAITO, Hirofumi KAWAMURA, Masato NAKA JIMA. 3D Shape Measurement of Underwater Objects Using Motion Stereo. IEEE IECON 21st International Conference on, 1995.

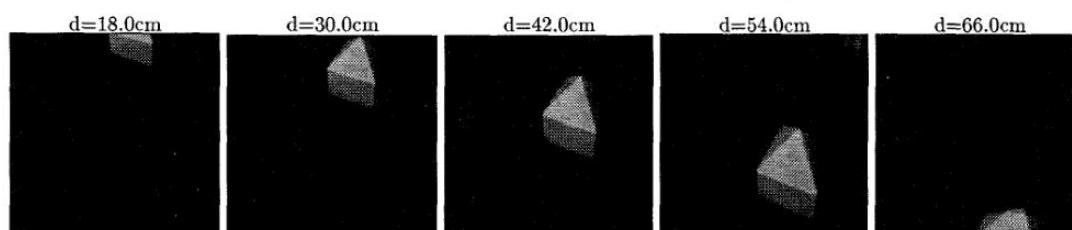
本文提出了一种利用在水面上运动的相机获得的运动的立体图像进行水下目标物的重建，但是该方法只能检测特征点明显的多面体，对于特征点较复杂的目标物重建还是有困难的。

本文的系统装置如下：

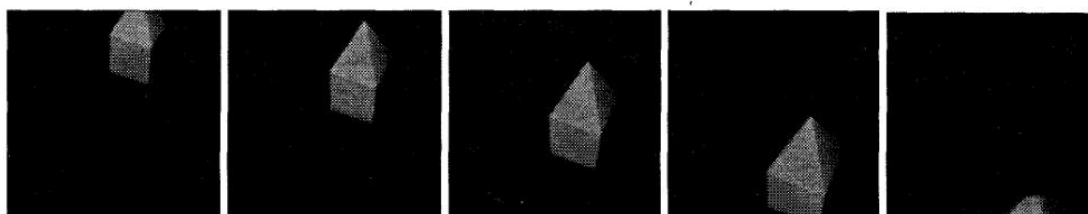


系统装置图

由于光在水中的折射使得在水中的扫描轨迹是非线性的，所以本文提出了一个运动轨迹方程：



水中扫描结果图



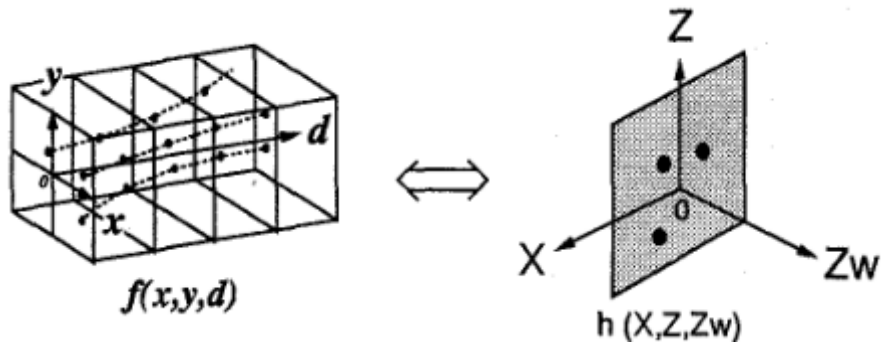
空气中扫描结果图

目标物体上特征点轨迹方程： L 为像平面到焦点的距离， N 为水体折射指数

$$X - \frac{x}{AL}Z - \frac{x(A-1)}{AL}Z_w - d = 0,$$

$$Y = (X - d)\frac{y}{x}$$

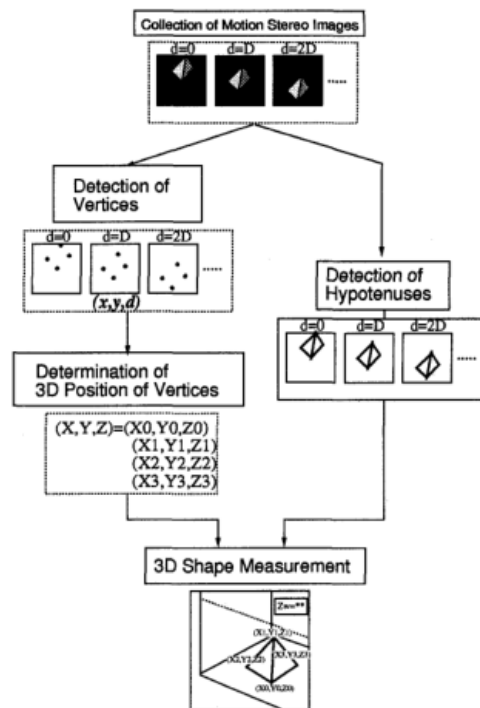
$$A = \sqrt{(N^2 - 1)\frac{x^2 + y^2}{L^2} + N^2},$$



移动立体空间

参数空间

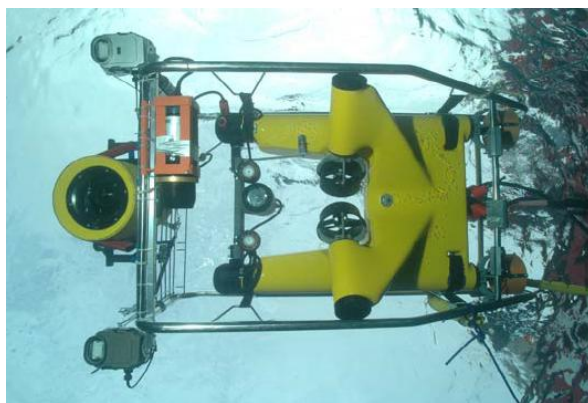
本文测量流程：



先采集运动的图像序列，然后检测多面体顶点和多面体斜边，然后确定顶点位置，最后进行 3 维模型的重建。

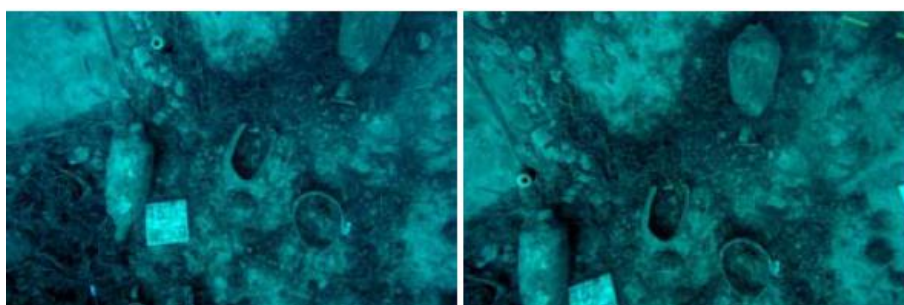
[2] P. Drap and J. Seinturier. Photogrammetry for virtual exploration of underwater archeological sites. International CIPA Symposium, 2006.

本文是一种单目立体视觉法的三维重建方法，通过单个摄像头拍摄一系列图片，然后利用不同图像的重叠部分进行重建。

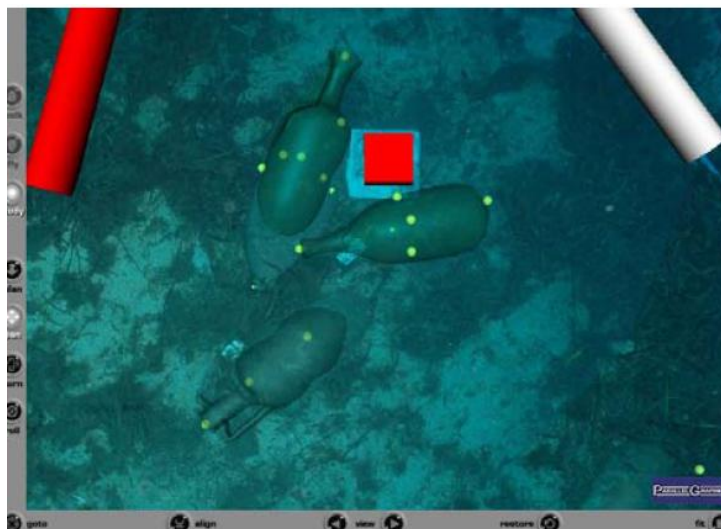


ROV 装置

同一条场景中，图像的重叠率为 60%，拍摄图像如下：



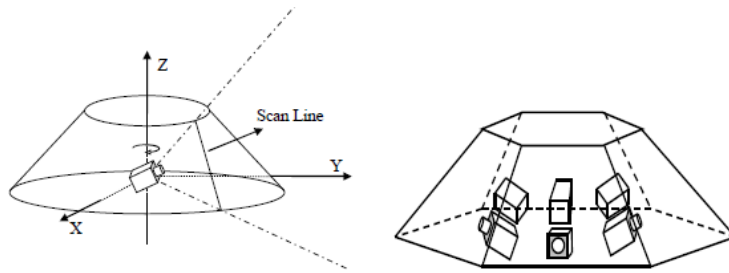
结合考古学的模型进行的水下瓦罐重建结果图：



[3] Coral Gables.A Multi-Camera Conical Imaging System for Robust 3D Motion Estimation, Positioning and Mapping from UAVs. AVSS, 2003

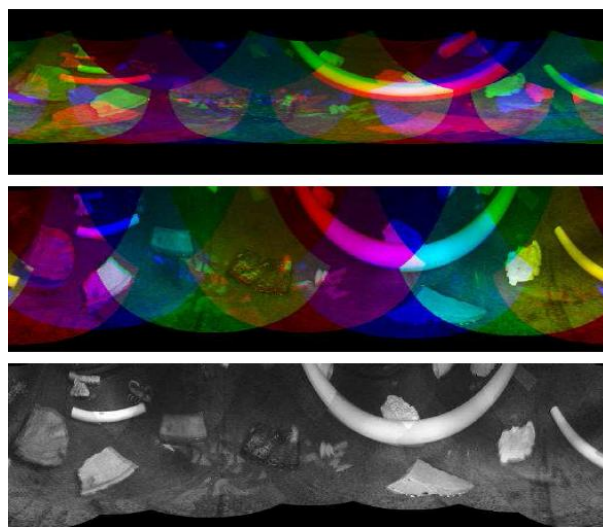
本文主要提出了一个锥形成像系统，通过该系统不仅可以从单一高分辨率的图像中获取大量的视觉信息，而且该系统视场角的扩大使得一些视觉算法的鲁棒性和正确性得到了提高，其中包括 3D 运动估计算法。同时该系统以后可应用到 2 维到 3 维的映射中。

利用重叠区域进行 3D 运动估计



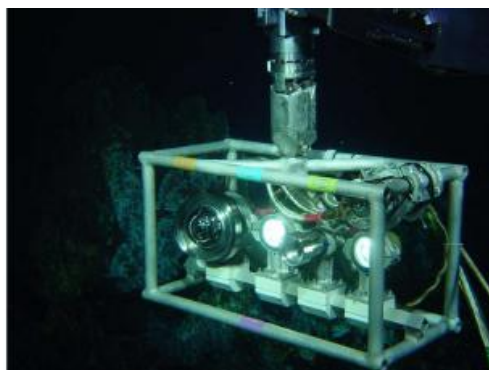
锥形成像系统

将多台摄像机组成锥形系统，通过校准矩阵调节摄像头之间的位置、角度关系。校准过程中，用 color coding 代表不同的相机的成像，如下图所示，最上面为未校准图像，中间为校准之后图像，最下面为灰度图像。



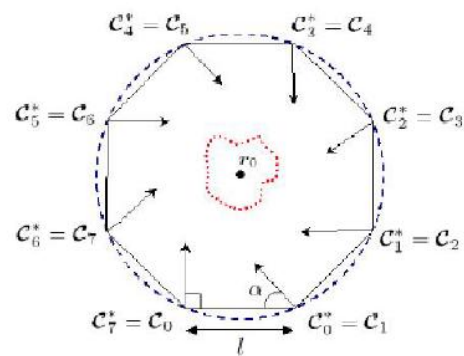
[4] V. Brandou and A. G. Allais. 3D Reconstruction of Natural Underwater Scenes Using the Stereovision System IRIS, Oceans 2007 - Europe, Vols 1-3 (Ieee), 2007 , P. 674-679.

本文提出了一种利用双目立体视觉法对水下小规模场景的重建法。文中对图像的获取方法做了改进，通过用视觉伺服或预编程的机械臂按照等间隔等角度里安放摄像机采集图像，该系统的测量精度与机械臂的摆放位置的精度有关。(只用了两幅图片)

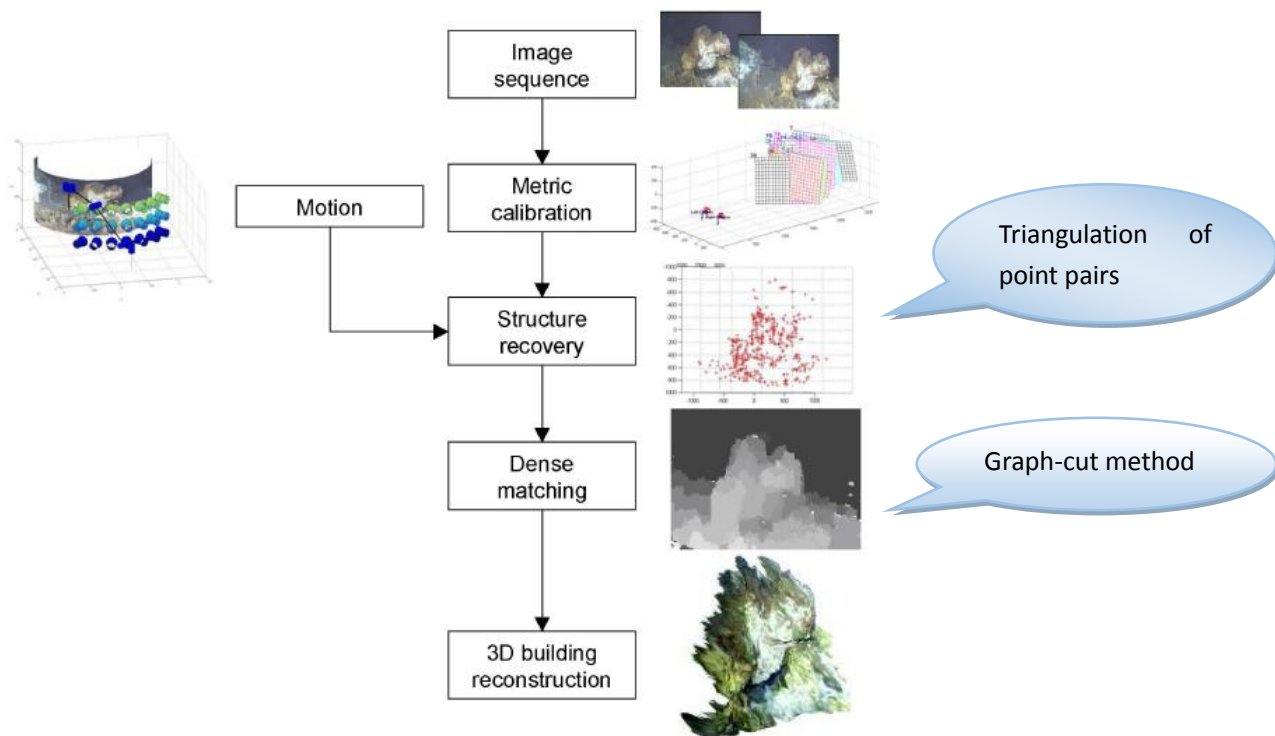


实验装置

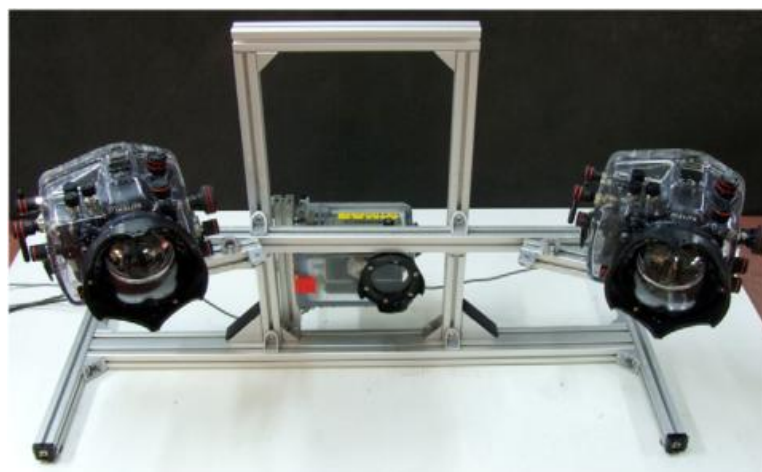
双目的摆放角度和运动轨迹如下：



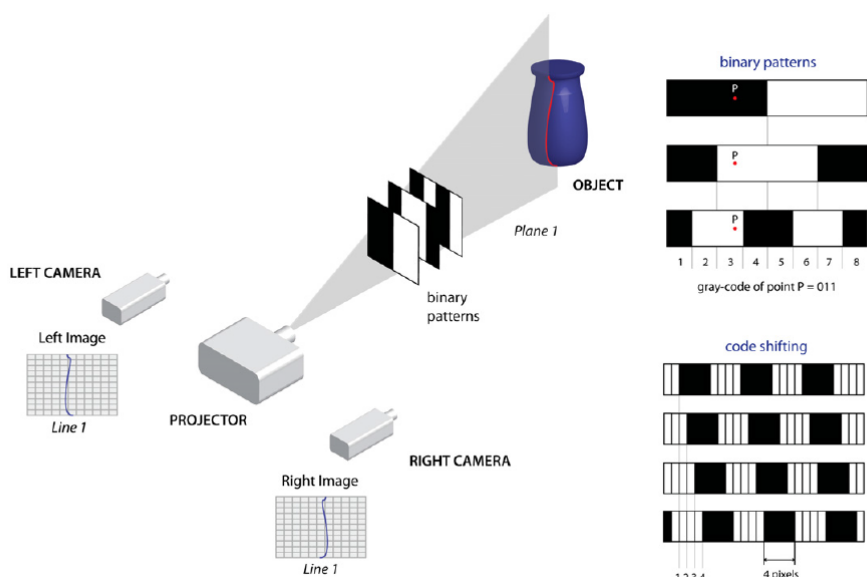
重建流程如下：



[5] E. Brunoa and G.Bianco, Experimentation of structured light and stereo vision for underwater 3D reconstruction. ISPRS, 2011.



实验系统装置



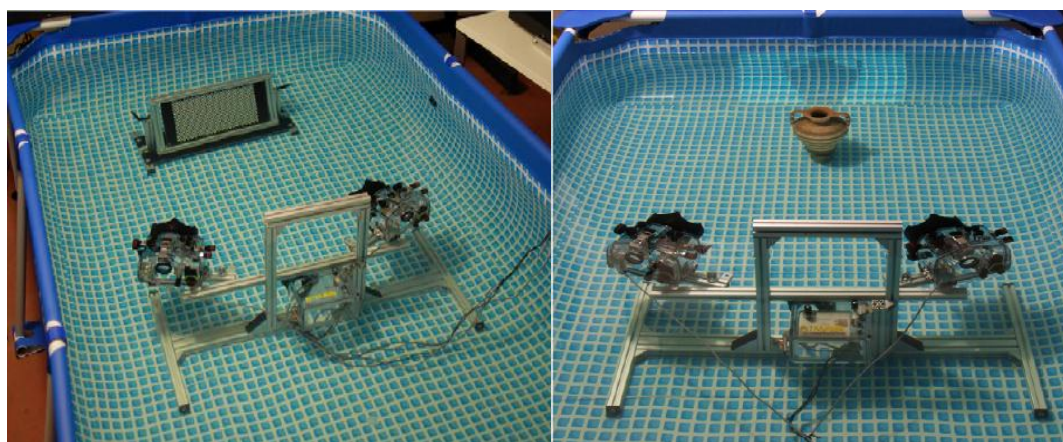
实验原理图

如上图，左侧为投影机和两台摄像机，激光发射器发射出宽度不同的激光条纹，所获取的图像中物体被这些黑白条纹编码（有点类似 Kinect 的 light-coding），然后将黑白条纹编码转换为二进制，编码技术为格雷码（Gray-code），编码可以帮助解决左右图像对之间的关键点匹配问题。右侧示例是将线光编码转换为二进制模式。

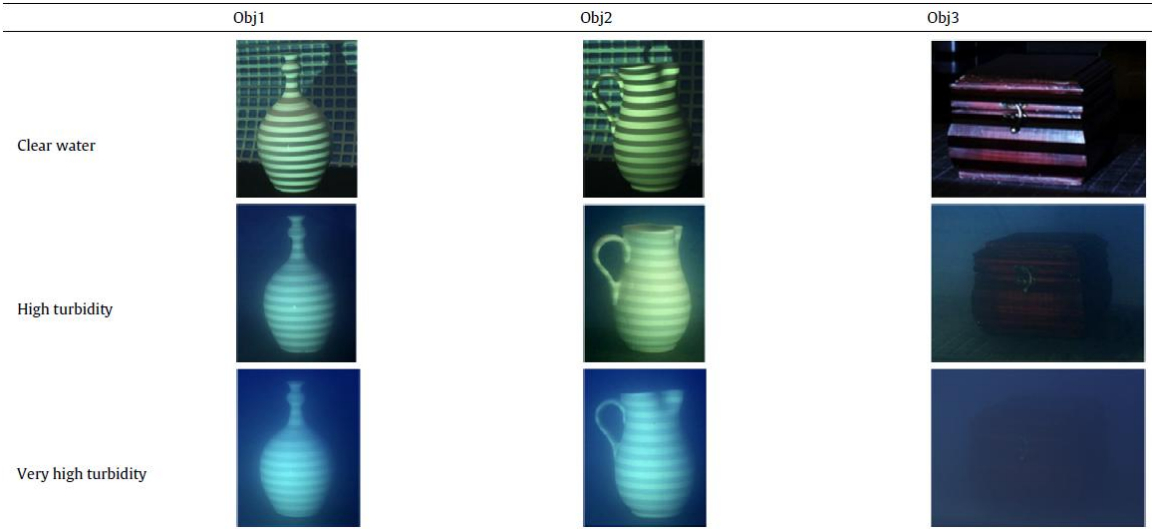
在这个实验中，同样用标定来获得摄像机的内参和外参，用三角测量法对目标进行三维重建。

论文实验如下：

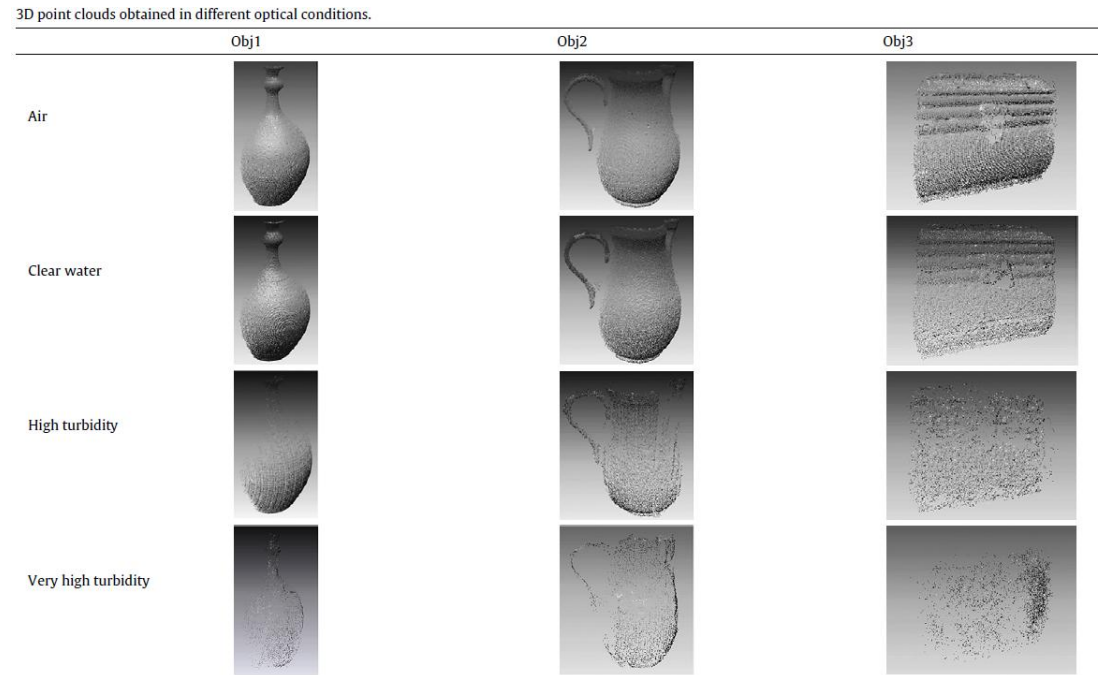
如下所示，左图为标定，右图为拍摄目标。



所获取的带有条纹的图像如下图所示：

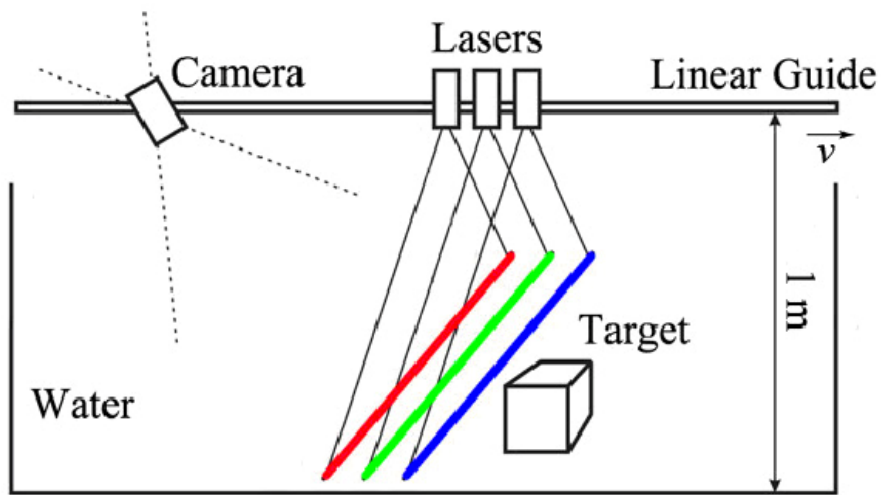


下面为作者的实验结果，分别在空气中、清水中、浑水中、非常浑浊的水中进行实验，受后向散射影像，效果越来越差。

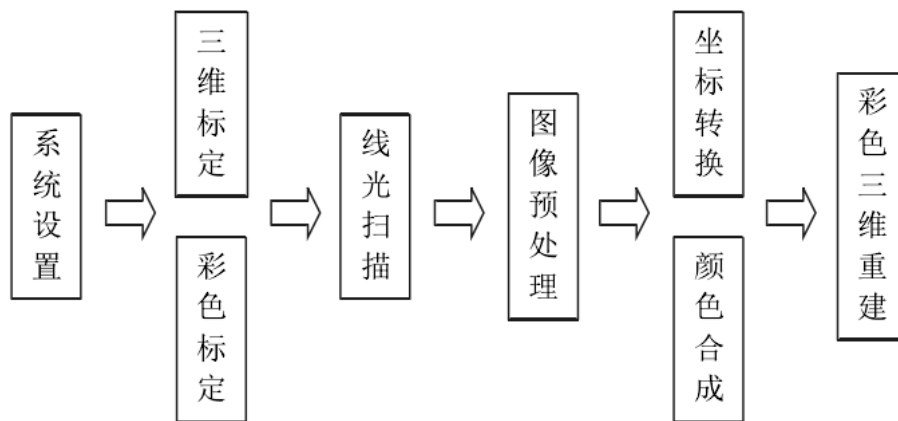


[6] Yu Yang, Bing Zheng et al. 3D color reconstruction based on underwater RGB laser line scanning system. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* , 2014, 6074-6077

[7] 《水下多通真彩色三维重建与颜色还原方法研究》

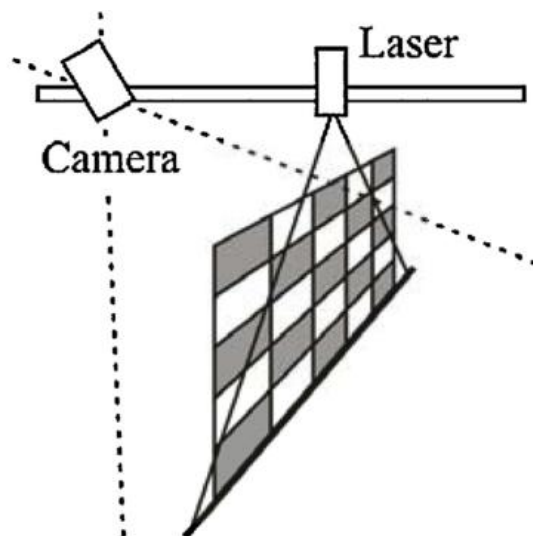


水下实验系统图



彩色三维重建流程图

相机标定:



根据距离斜率建立像素标定矩阵，建立于此像素标定矩阵对应的世界标定矩阵

$$\begin{bmatrix} (a_1,b_1) & (a_2,b_2) & \dots \\ (a_3,b_3) & (a_4,b_4) & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

(a)

$$\begin{bmatrix} (0,0) & (0,20) & \dots \\ (20,0) & (20,20) & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

(b)

(a) 像素标定矩阵；(b) 世界标定矩阵

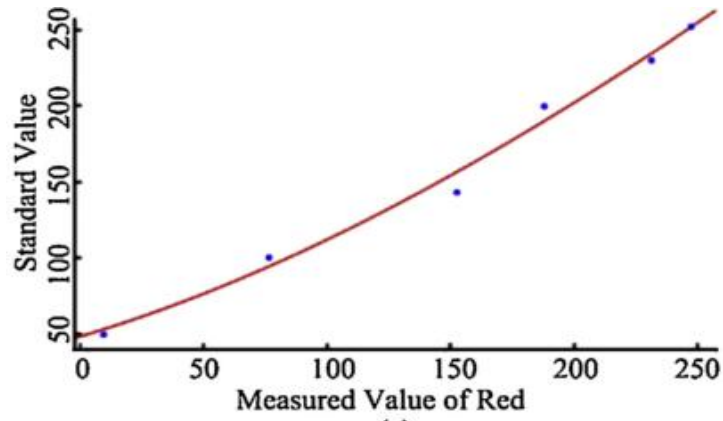
彩色标定：

利用数字相机记录下标准色板的扫描图像，根据 RGB 三基色的记录值和标准值，拟合出感光曲线，即建立 RGB 记录值与标准值之间的映射关系，此过程称为标定。

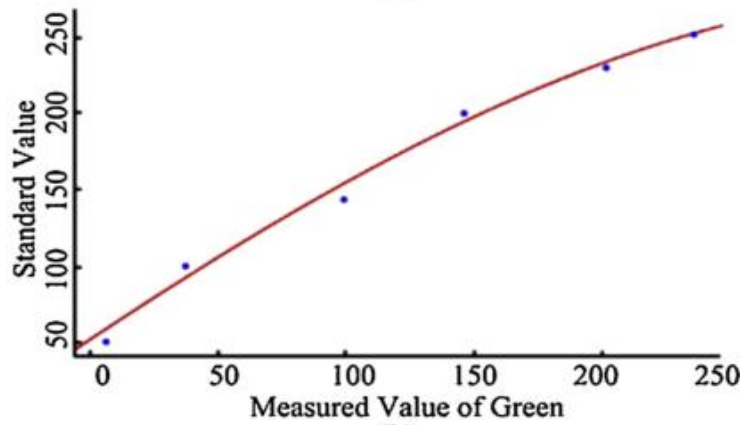


24 色标准色板

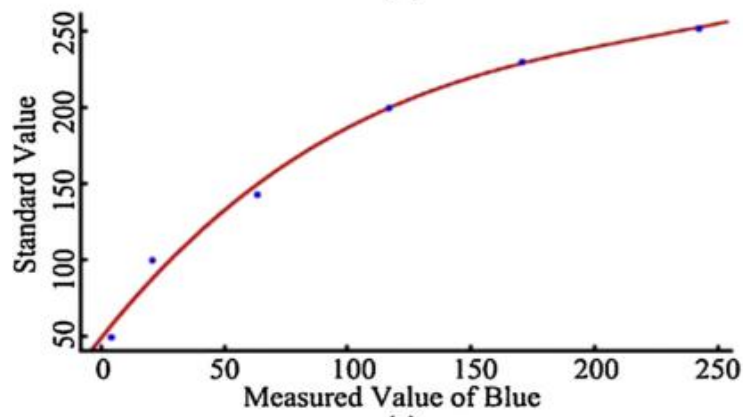
曲线拟合示意图



(a)



(b)



(c)

$$\left. \begin{aligned} R &= A_r r^3 + B_r r^2 + C_r r + D_r \\ G &= A_g g^3 + B_g g^2 + C_g g + D_g \\ B &= A_b b^3 + B_b b^2 + C_b b + D_b \end{aligned} \right\}$$

标定后可以确定各项系数。

线光扫描+图像预处理（中心线提取）

线光提取公式如下：类似于重心的计算方法（ I_x 为 x 像素处的光强值， x' 为

水平方向线光的重心点)

$$x' = \frac{\sum_x I_x \cdot x}{\sum_x I_x}$$

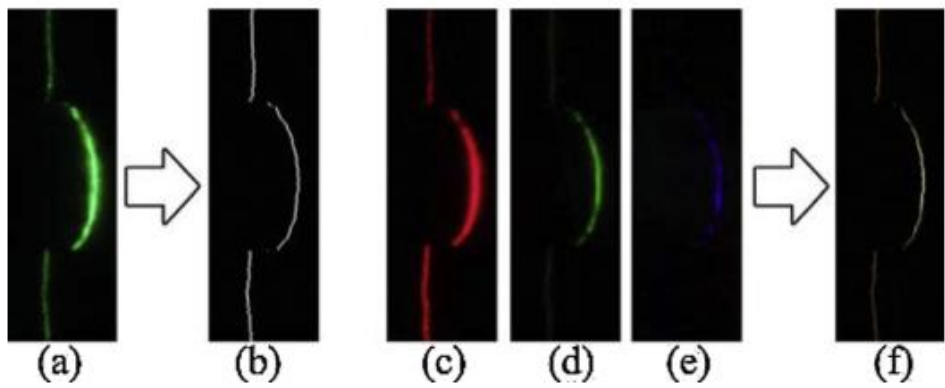
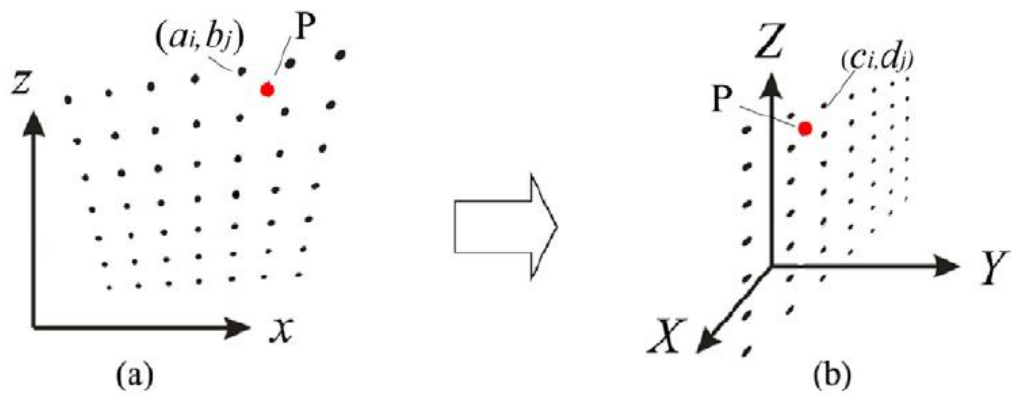


Image data processing: (a) original 3D data; (b) center extraction image; (c)original red data; (d) original green data; (e) original blue data; (f) final color data.

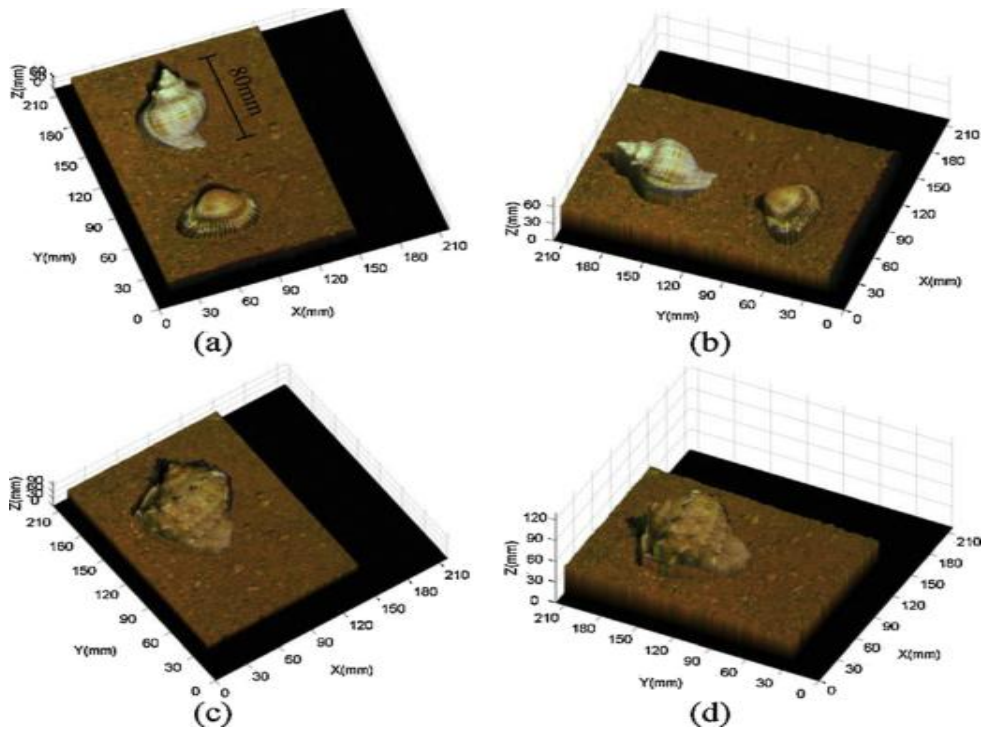
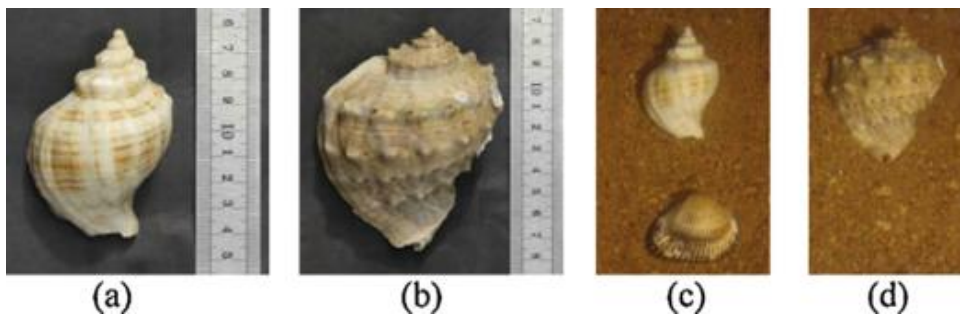
坐标变换

如图假设四个标定点中，左上角的标定点的像素坐标为 (a_i, b_j) ，相对应的世界坐标为 (c_i, d_j) 。P 点在 (a_i, b_j) 等四个标定之间的比例关系，同样对应于 P 点在 (c_i, d_j) 等四个标定之间的比例关系，由此可根据标定点的映射关系确定 P 点的三维世界坐标。计算如公式所示。



坐标映射关系图

$$\left. \begin{aligned} X &= c_i + \frac{x - a_i}{a_{i+1} - a_i} \times (c_{i+1} - c_i) \\ Y &= v \times t \\ Z &= d_j + \frac{z - b_j}{b_{j+1} - b_j} \times (d_{j+1} - d_j) \end{aligned} \right\}$$



三维重建步骤

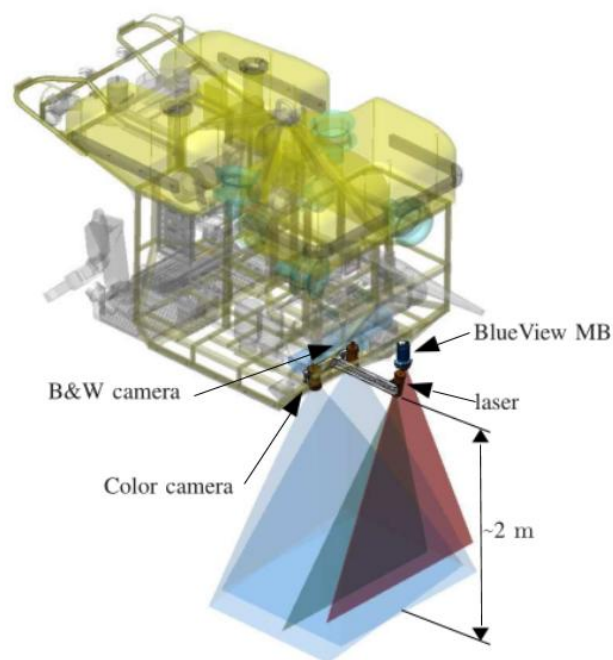
- (1) 对所有扫描图像进行激光线条的中心计算，得到新图像序列；
- (2) 读取 (1) 处理后的一张图像；
- (3) 按顺序，搜索图像上含有信息（值非 0）的、未被处理的某点，读取此点的像素坐标；

- (4) 在像素标定矩阵中，寻址距离此点最近的 4 个相邻标定点（如前文所述，假设数据点为 P ，则这四个相邻标定点需要满足以下条件：某一标定点距离 P 点最近，四个标定点包裹 P 点，或者与 P 点重合）；
- (5) 按照公式计算此点所对应的世界坐标；
- (6) 重复（3）-（5）步骤，遍历图像上所有有信息的点，进行坐标计算；
- (7) 重复（2）-（6）步骤，处理整个图像序列；
- (8) 将前面 7 步所得数据沿扫描方向累加，重建出三维图像。

[8] **Chris Roman and Gabrielle Inglis. Application of structured light imaging for high resolution mapping of underwater archaeological sites. OCEANS 2010 IEEE-Sydney.**

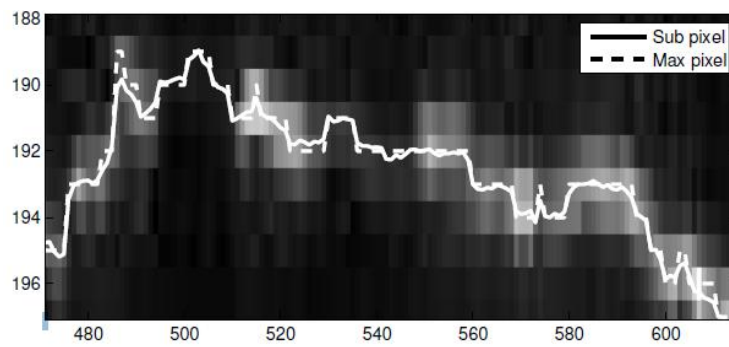
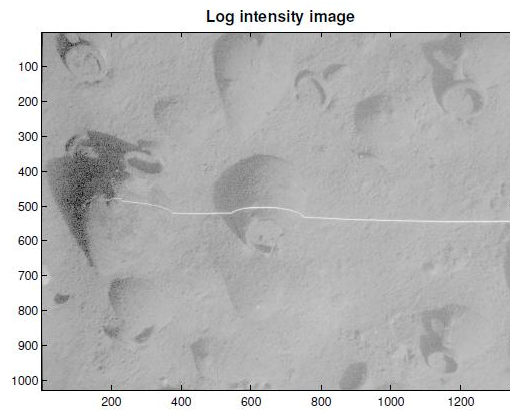
本文主要通过通过在 ROV 上搭载多波束法、立体视觉法、激光扫描法的三种探测设备进行水下遗址进行探测并重建，并进行比较，结构光的方法抗后向散射和抗衰减效果较好。

主要介绍了结构光步骤，包括相机和激光器之间的配准，得到转换矩阵，然后进行激光中心线提取，再利用转换矩阵恢复三维坐标，与杨宇师兄论文思路基本相似。其实验设备如下，激光条纹图像通过黑白相机（B&W）获得，基线距离 0.45m，距海底 2m。

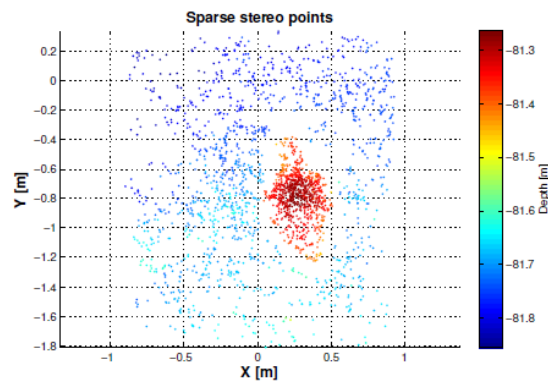
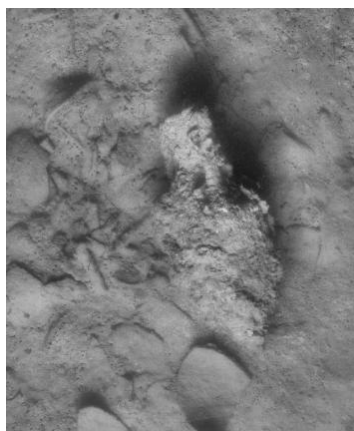


实验装置

获得线光图像，经过Initial threshold、Morphological operations、Extracted line、Line close up之后可以得到线光序列。

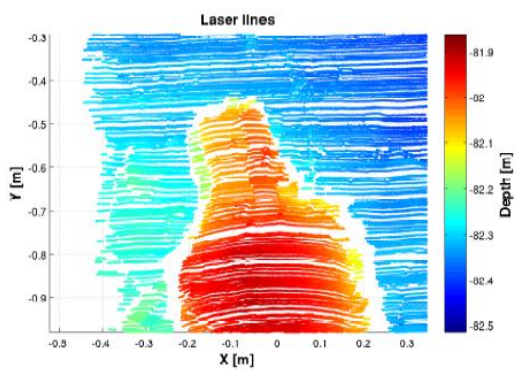
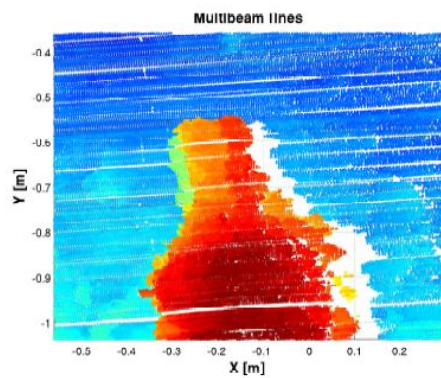


最终结果比较:



(a) Photo of the amphora
assembled from two still images

(b) Point cloud from two stereo pairs



(c)Multibeam scan lines.

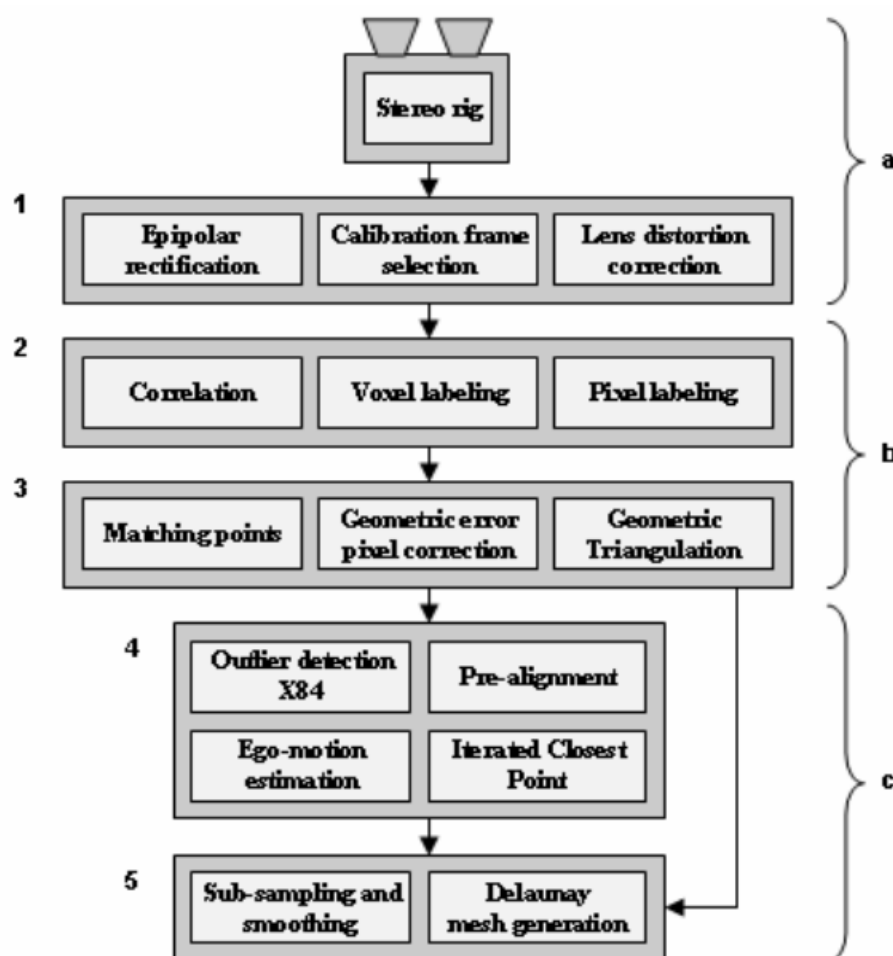
(d)Laser scan lines showing the clearest edge and handle details.

由实验结果图可以看出结构光法比双目立体视觉和多波束法重建出的图像具有更高的分辨率

[9] A. Leone, G. Diraco, C. Distante. Stereoscopic system for 3D seabed mosaic reconstruction. 2007 IEEE International Conference on Image Processing.

本文提出了一种同步立体视觉水下三维重建方法。并且针对同步的立体图片序列提出了一种给基于纵向差距评价的校准算法。（没太看明白，且讲的不够细）

本论文具体处理流程如下：



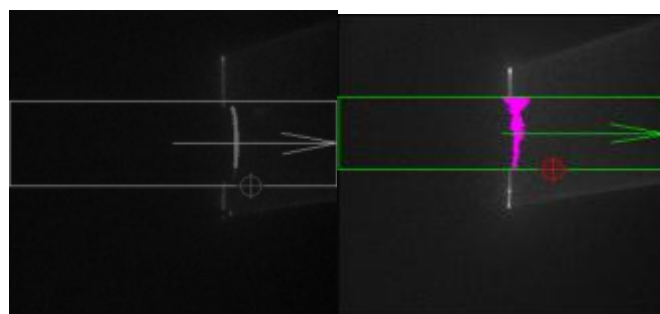
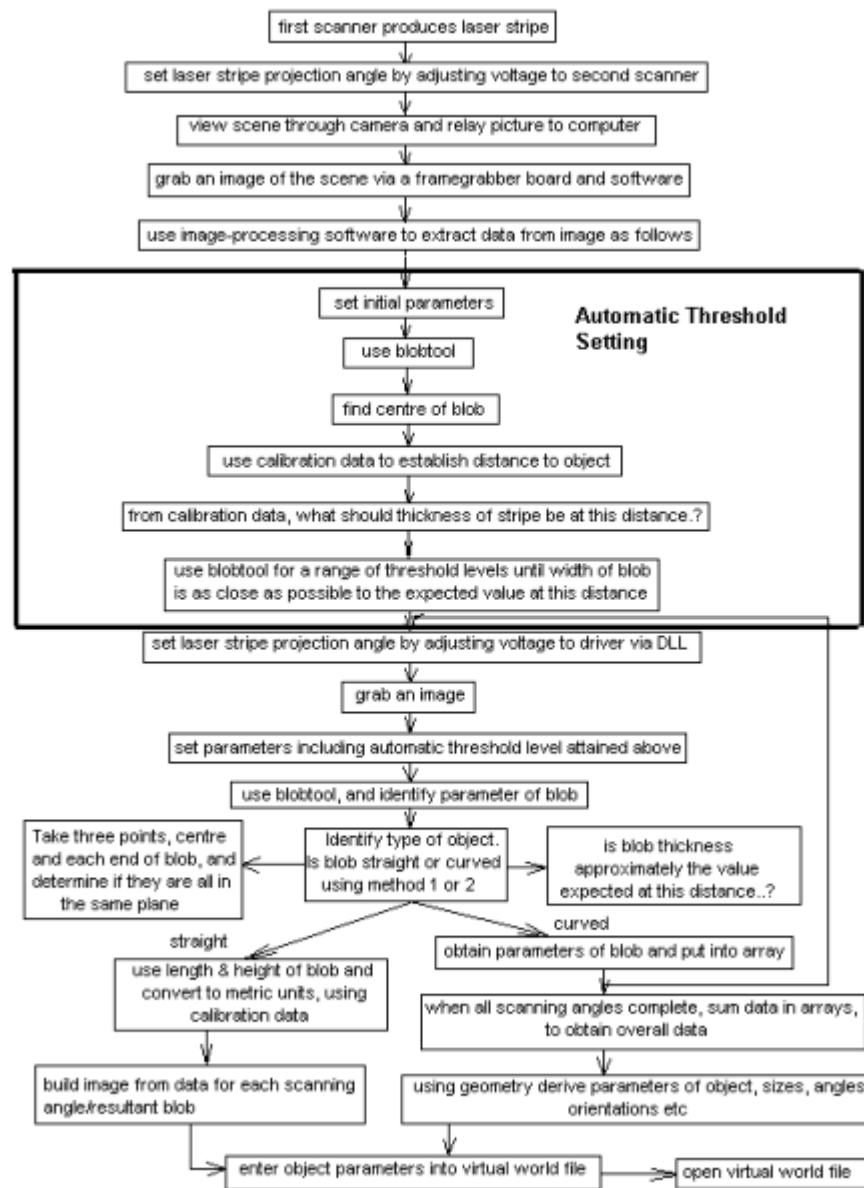
a.异步立体图片获取 b.深度信息的估计 c. 三维图像的拼接与重建

[10] Stephen Tetlow, John Spours. Three-dimensional measurement of underwater work sites using structured laser light. Meas. Sci. Technol. 10 (1999) 1162 - 1167.

本文突出了用单一条纹光进行水下目标物的三维探测方法，重点提出了一种根据离目标物体的距离来设置阈值通过条纹信息来获取目标物的范围形状等有

用信息。

流程图如下（做 PPT 时可以不贴此图）：



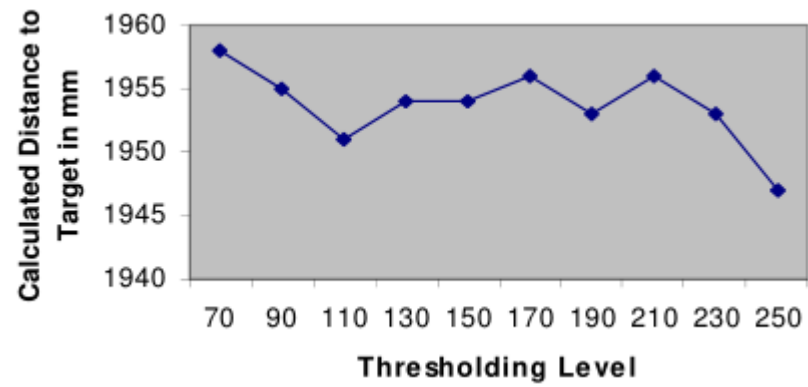
A.高阈值图

B.低阈值图

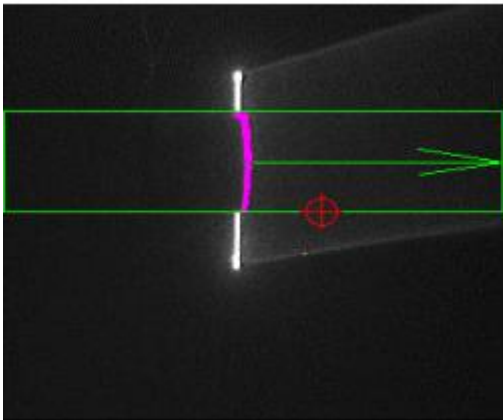
由该两张图片可以看出，当阈值设置太高时会导致条纹光的一些信息丢失；当阈值设置的太低时，条纹光就会变得不对称，因此要设置一个合适的阈值来提

取我们需要的信息。

可以根据离目标物的距离来设置阈值：



阈值与距离关系图



最优阈值的图片

本文实验结果：

Table 1. Example results in clear water for varying distances.

Parameter	Actual	1805 mm	2305 mm	2805 mm	3305 mm
Object rotated about the y axis	10°		8.5° (−1)	7° (−3)	7.2° (−3)
	20°		16.5° (−3)	18.6° (−1)	10° (−10)
Object rotated about the z axis	5°	6.5°	5.3°	5°	
	10°	7.7°	11.1° (+1)	11° (+1)	10.5° (+1)
	15°		16.5° (+2)	15.9° (+1)	
	20°		18.5° (−1)	17.8° (−2)	
Object distance		1804 (−1)	2245 (−60)	2804 (−1)	3294 (−11)
Object diameter	400	450 (+50)	408 (+8)	405 (+5)	412 (+12)
Object length	500	508 (+8)	505 (+5)	510 (+10)	515 (+15)

Table 2. Example results in water with turbidity of 0.2 NTU ($\alpha = 0.2 \text{ m}^{-1}$) for varying distances.

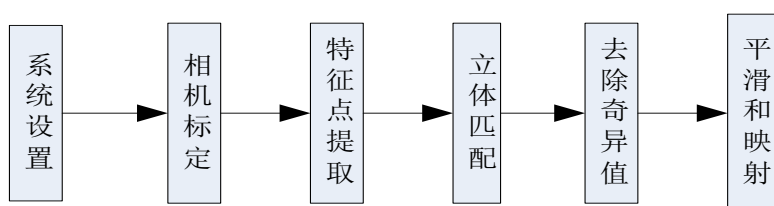
Parameter	Actual	1805 mm	2305 mm	2805 mm	3305 mm
Object rotated about the y axis	10°	3° (-7)	6° (-4)	3.1° (-7)	
	20°		18° (-2)	22° (+2)	7° (-13)
Object rotated about the z axis	5°	6.2° (+1)	3.9° (-1)	4.3° (-1)	4.06° (-1)
	10°	9° (-1)	8.6° (-1)	10.5° (+1)	10.8° (+1)
	15°	13.9° (-1)	16.5° (+2)	12.1° (-3)	11° (-4)
	20°	18.4° (-2)	20.1°	19.3° (-1)	15.6° (-4)
Object distance		1822 (+17)	2316 (+11)	2878 (+73)	3442 (+137)
Object diameter	400	410 (+10)	380 (-20)	415 (+15)	420 (+20)
Object length	500	515 (+15)	505 (+5)	485 (-15)	518 (+18)

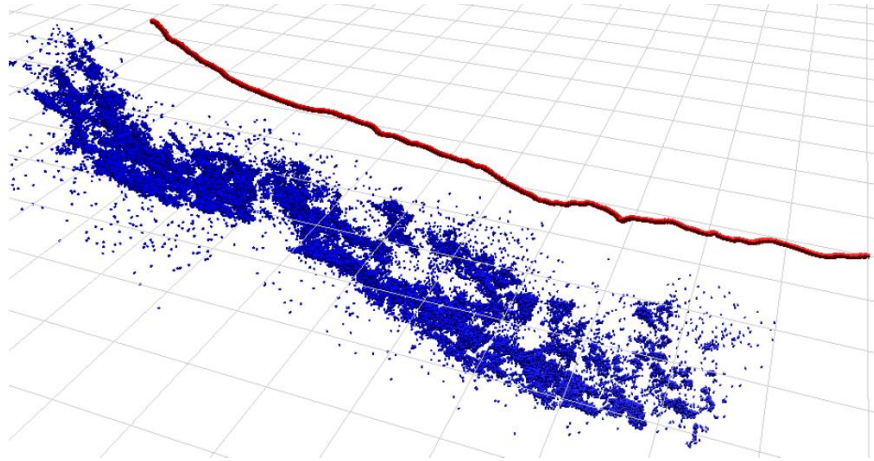
Table 3. Example results at 2805 mm distance for varying turbidity levels.

Parameter	Actual	0.05 NTU	0.2 NTU $\alpha = 0.2 \text{ m}^{-1}$	0.35 NTU $\alpha = 0.55 \text{ m}^{-1}$
Object rotated about the y axis	10°	7° (-3)	5.7° (-4)	6° (-4)
	20°	18.6° (-1)	23° (+3)	28° (+8)
Object rotated about the z axis	5°	5°	4.3° (-1)	6° (+1)
	10°	11° (+1)	10.5° (+1)	10.3°
	15°	15.9° (+1)	12.1° (-3)	15.8° (+1)
	20°	17.8° (-2)	19.3° (-1)	N/A
Object distance (mm)	2805	2805	2805	2805
Object diameter/width (mm)	400	405 (+1%)	415 (+4%)	442 (+11%)
Object length (mm)	500	510 (2%)	485 (-4%)	530 (+8%)

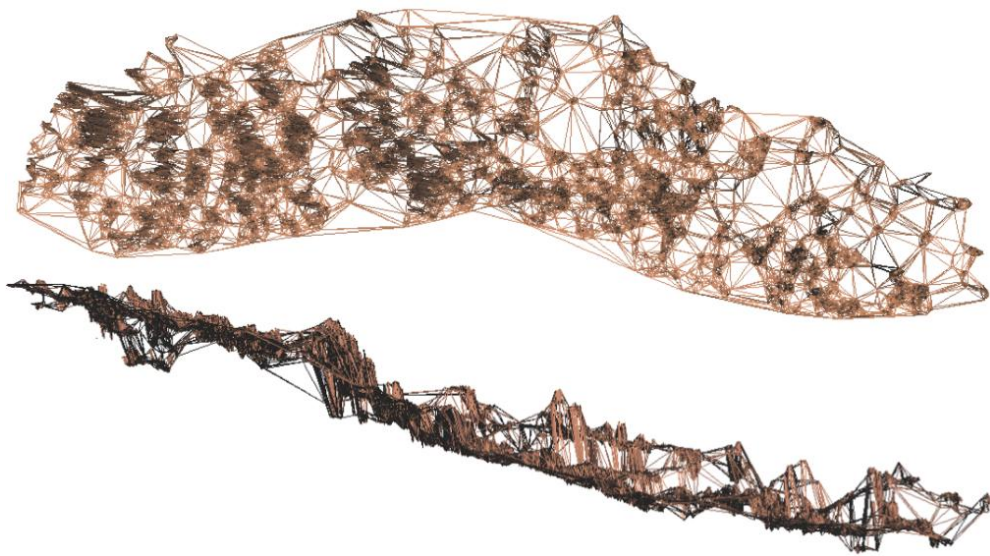
[11] Chris Beall, Brian J. Lawrence, Viorela Ila and Frank Dellaert. 3D Reconstruction of Underwater Structures. The 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.

本文通过一个可以手持也可以运载的宽基线的立体视觉平台获取立体图像序列，然后通过图像中特征点提取、匹配、平滑和映射等操作进行较大范围内水下环境的重建。

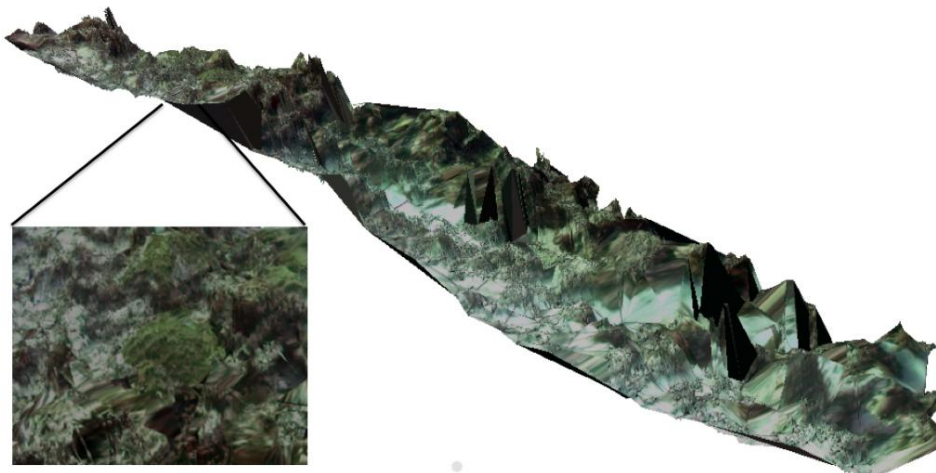




670 帧图像中 78887 个特征点点云



去除奇异值后顶部与侧面视图

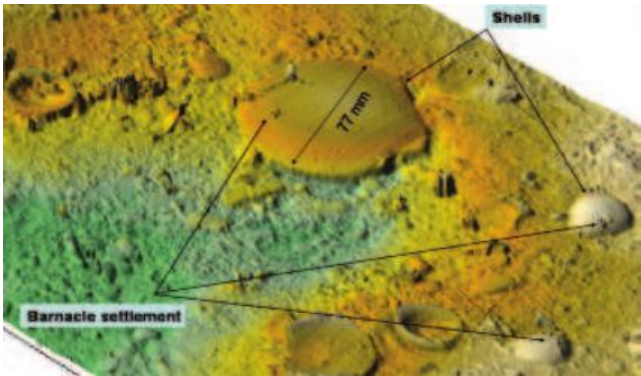


珊瑚重建结果图

由结果图看出虽然探测范围较大，但局部精度较低。

[12] Chau-Chang Wang, Da-jung Tang and Todd Hefner. Design, Calibration and Application of a Seafloor Laser Scanner. InTech,2011:495-522.

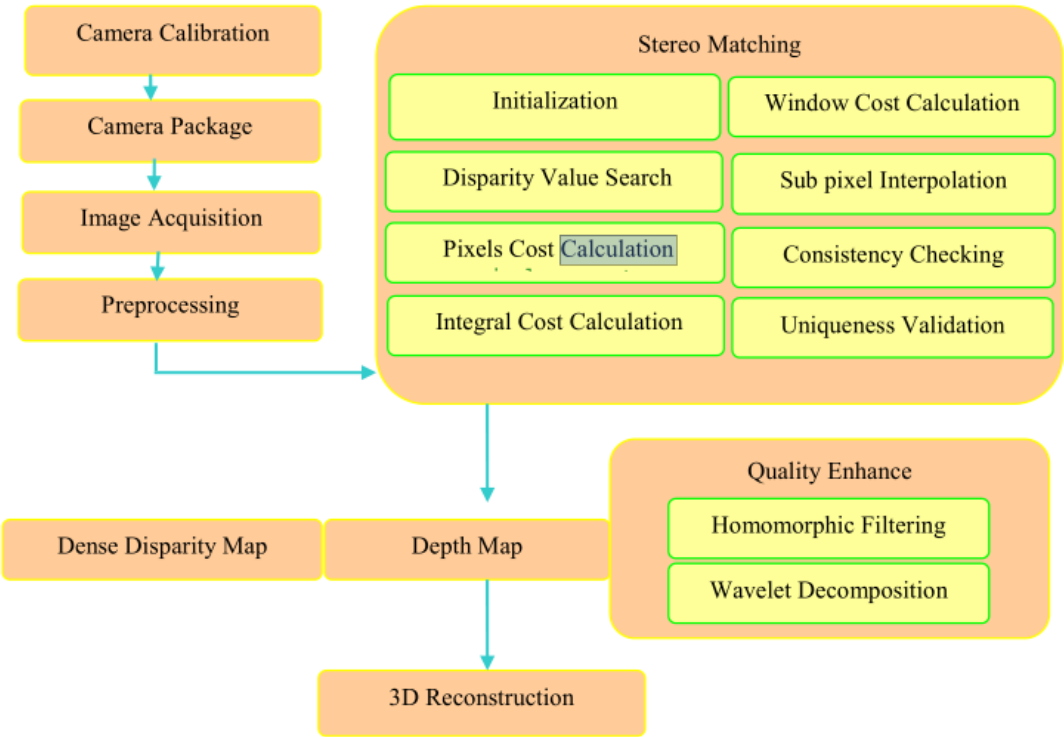
本文研究了以 CCD 作为接收器的水下激光扫描系统，并提出了一种非度量 CCD 相机标定方法，，且实现了水下目标物体的重建工作。



三维重建结果图

[13] Yanli Wu, Rui Nian. 3D Reconstruction Model of Underwater Environment in Stereo Vision System. Oceans - San Diego, 2013.

本文为双目立体视觉技术水下三维重建方法。



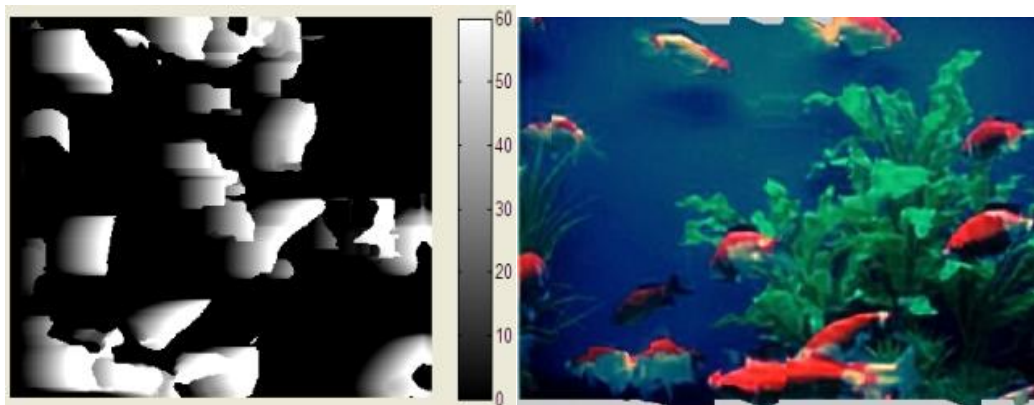
三维重建流程图

重建流程



左摄像机图

右摄像机图

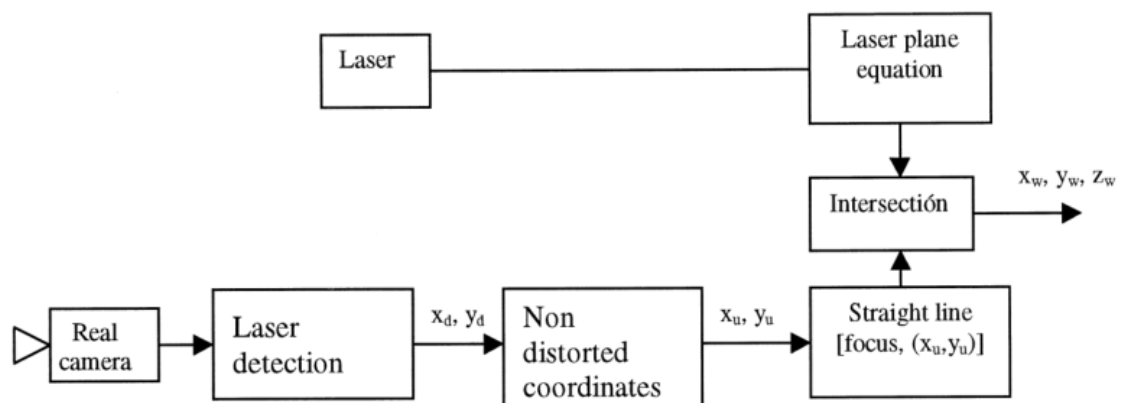


深度图

三维重建效果图

[14] M.A.G. Izquierdo, M.T. Sanchez,ect. Sub-pixel measurement of 3D surfaces by laser scanning. *Sensors and Actuators* 76 1999 1 – 8.

本文运用激光扫描法进行了水下三维重建，不同的是运用了亚像素的方法进行了激光条纹中心的提取算法。



三维重建流程图