

水下三维重建方法调研报告

1.陆上深度信息获取方法方法

通过查阅大量文献以及上网搜索，可以得出在陆地上深度信息获取的方法一共有以下几种，如图 1 所示：

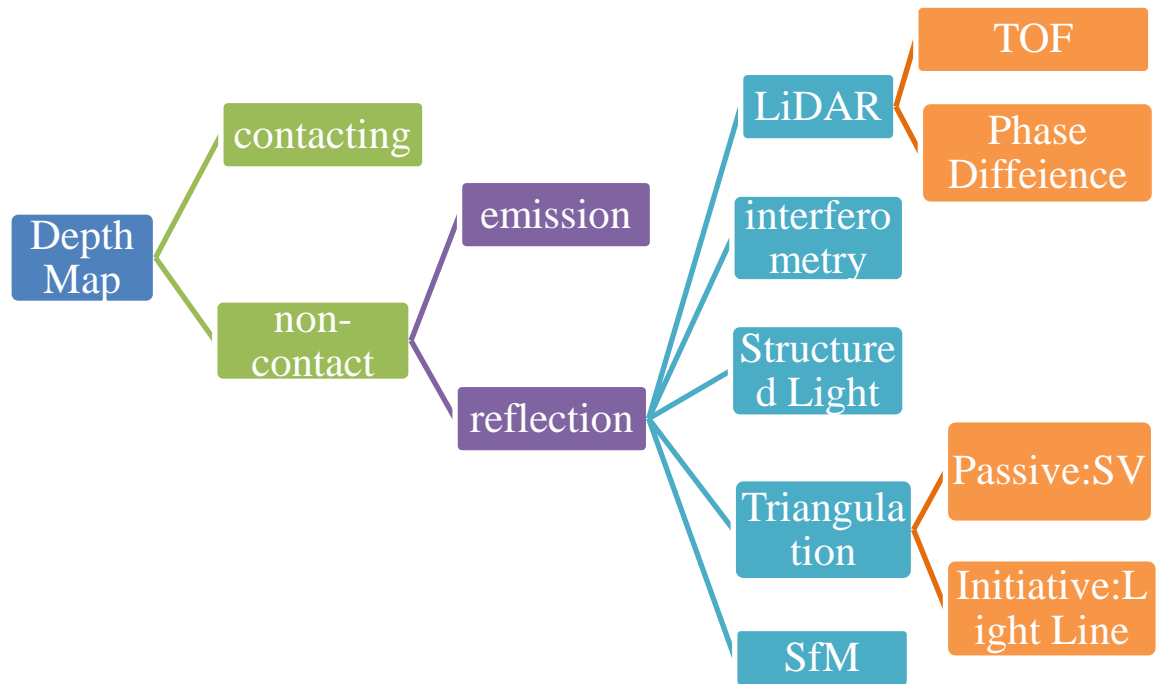


图 1：陆上深度信息获取方法

2.水下三维重建方法

这些方法中，只有几种在水下三维重建时是经常用到的，如图 2 所示：

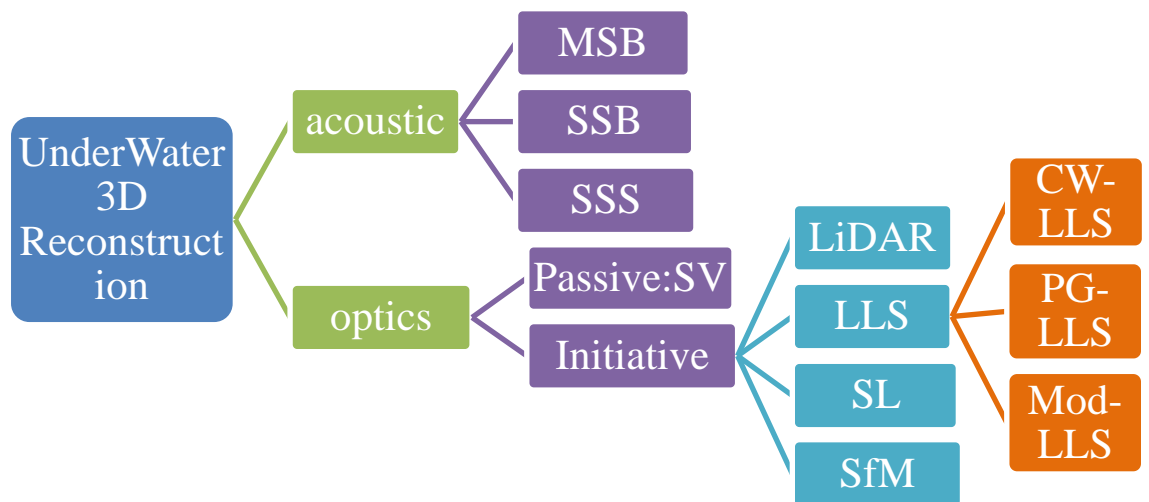


图 2：水下常用三维重建方法

3.水下三维重建方法原理

3.1. 声学方法

声学方法一般是以多波束测深系统^[1]为代表，多波束测深系统能够有效探测水下地形，得到高精度的三维地形图。其工作原理如下图：

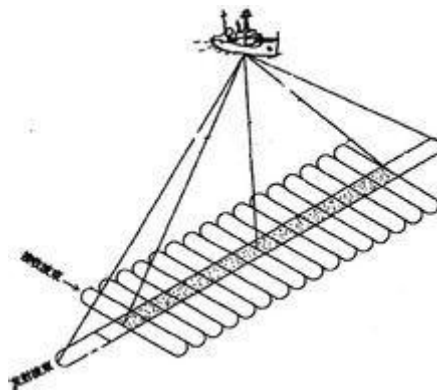


图 1 多波束声呐工作原理图

多波束测深系统的工作原理是利用发射换能器阵列向海底发射宽扇区覆盖的声波，利用接收换能器阵列对声波进行窄波束接收，通过发射、接收扇区指向的正交性形成对海底地形的照射脚印，对这些脚印进行恰当的处理，一次探测就能给出与航向垂直的垂面内上百个甚至更多的海底被测点的水深值，从而能够精

确、快速地测出沿航线一定宽度内水下目标的大小、形状和高低变化，比较可靠地描绘出海底地形的三维特征。

3.2. 激光雷达（LiDAR）

激光雷达主要是应用了距离选通法/时间脉冲法原理，距离选通法/飞行时间法是通过激光器像待测目标发射激光窄脉冲，然后由接收装置接收反射回来的光，通过计算发射光与反射光之间的时间差来计算目标距离。该方法中 CCD 快门可严格按照精确的时间控制当激光照到待测物体再反射回来时才将快门打开，这样就能将后向散射光与目标反射光分离开来，从而减小了散射光的影响。应用 TOF 原理三维重建流程如下：

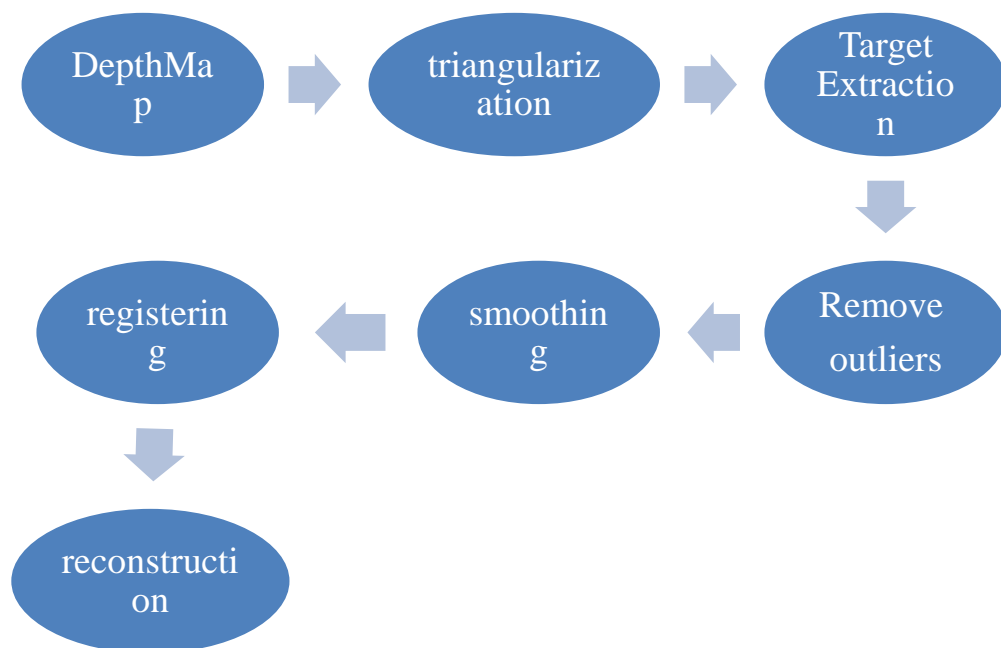


图 2 TOF 三维重建流程图

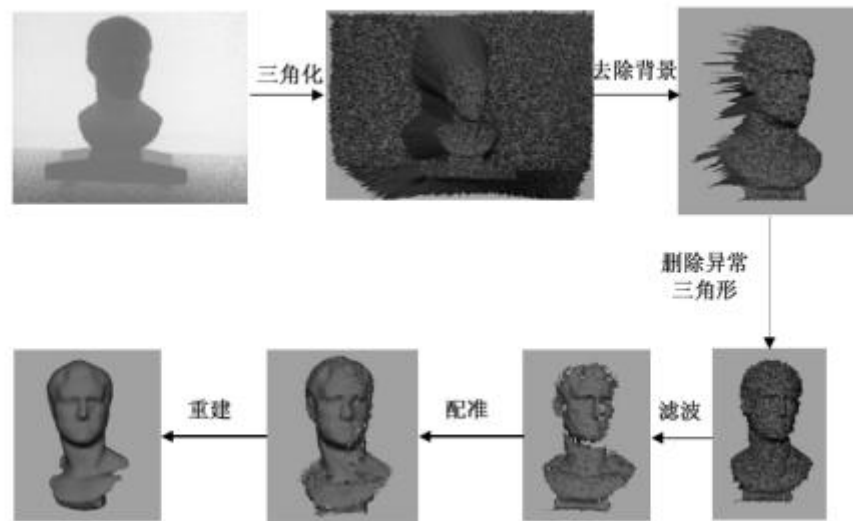


图 3 ToF 三维重建例图^[2]

三角化：为了去除原始数据中的冗余信息和噪声，需要对采集到的数据进行三角化。三角化采取为每个相邻点四元组增加三角面片的方法。

去除背景：去除大量无关背景。本文采用的是背景减法方法。

删除异形三角形：所谓异常三角形就是边长过大或者内角过小的狭长三角形。在删除异常三角形时，采取判断三角形边长 l 是否大于阈值 t 和两边的内角 α 是否大于 τ ，如果 $l > t$ 或者 $\alpha > \tau$ 就认为该三角形是异常三角形，将此三角形删除。

滤波：对网格做滤波处理得到平滑的网格，本文采用双边滤波的方法。

配准：在三维点云数据对齐中，运用最为广泛的是由 Besl 等提出的迭代最近点 (Iterative Closest Point, ICP) 算法。

重建：网格经过删除重叠区域并合并到一起后不能形成封闭的网格物体表面，所以需要进行网格的重建。泊松表面重建 (Poisson Surface Reconstruction) 的方法从整体上考虑点集，而不是将点划分成多块重建后再融合，并且该方法具有较强的抗噪声能力。因此本文使用泊松表面重建的方法对网格面进行重建。

3.3. 线激光扫描

线激光从激光器发射出来，到达待测目标物体后经反射返回到接收装置，这样激光器、目标物体和接收器之间就沿着激光的走向构成了一个三角形，然后再根据三角几何原理进行深度信息的获取。线激光扫描三维重建流程如下：

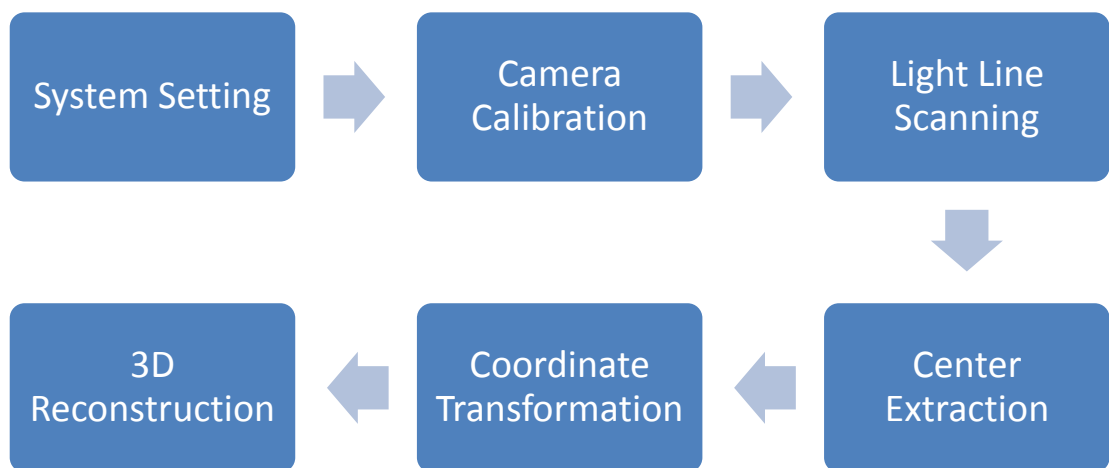


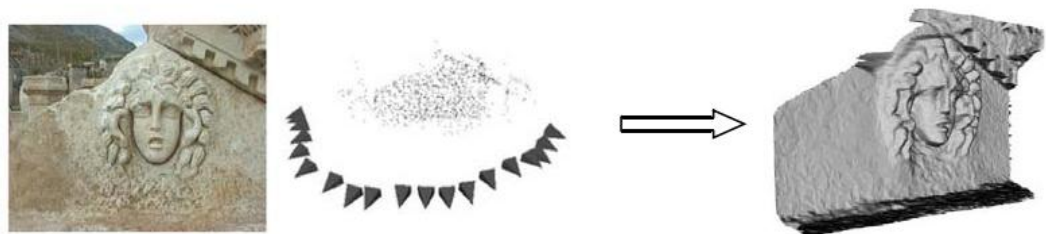
图 4 线激光扫描三维重建流程

3.4. 结构光

结构光扫描法的原理是首先将结构光投射至物体表面，再使用摄像机接收该物体表面反射的结构光图案，由于接收图案必会因物体的立体形状而发生变形，故可以试图通过该图案在摄像机上的位置和形变程度来计算物体表面的空间信息。

3.5. SfM

首先在摄像机拍摄到的若干帧进行特征点的跟踪，这些帧相当于得到了场景的多个视角的视图。然后利用这些特征点在帧间（多视角间）的对应关系，用自校准（self-calibration）的方法得到摄像机内参以及摄像机的位置变化。有了摄像机参数之后，就可以进行帧间的逐个像素的立体匹配，最终得到各个帧的深度图，从而恢复场景模型，如图所示。



SfM 示意图

实际上，在 **SfM** 方法里，单摄像机在物体周围不同角度拍摄得到的单目图像序列，和多摄像机系统同步拍摄的多目视图，本质上是一样的。所不同的是，**SfM** 是同一个相机拍摄一个静态场景，多视角的视图来自于时间维度；而多摄

像机系统是多个摄像机同步拍摄，可拍摄动态场景，多视角的视图来自于空间维度。**SFM** 将帧间的运动信息当作多视角间的立体匹配信息，从而利用与多目立体（**MVS**）类似的方法恢复场景的三维信息。因此，在 **SFM** 方法里，所利用的帧间运动这个深度线索，和 **Depth from Stereo** 深度线索本质上相同。

3.6. 双目立体视觉

双目立体视觉的基本原理是仿照的人眼视觉系统，用两台摄像机同一时刻从不同角度获取周围同一物体的两幅数字图像，或用一台摄像机在不同时刻从不同角度获取周围同一物体的两幅数字图像，然后根据视差原理和三角测量关系，求得物体的三维信息，从而获知被测物体的三维形状及其位置。双目立体视觉三维重建流程图如图：

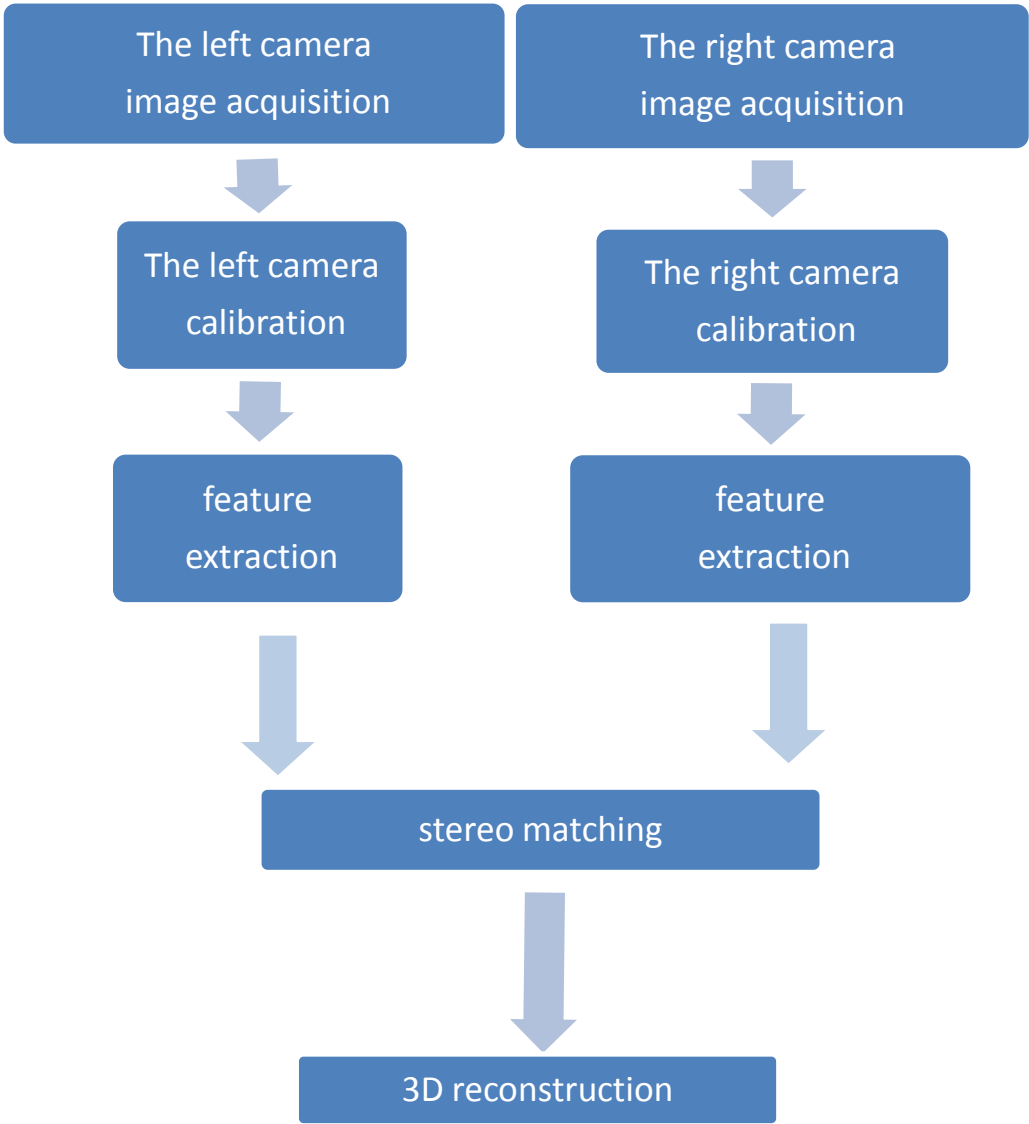


图 5 双目立体视觉三维重建流程图

1)图像获取

使用两台水平或垂直并列的摄像机获取图像,要求两台摄像机的位置关系尽可能满足前向平行对准,有利于降低摄像机校正时的运算量。同时可以对图像做必要的预处理,如去噪、平滑、增强等。

2)摄像机标定

对摄像机进行标定,获得畸变向量,使用数学方法消除径向和切线方向上的镜头畸变,获得无畸变图像。同时获得摄像机内参数等信息,为后面计算本征矩阵做准备。

3)特征提取与匹配

提取两幅图像中的特征点并对其进行匹配,为下一步获得摄像机位置关系并进行立体校正做准备。这一步匹配的特征点要尽可能保证匹配的准确性,数量只要能满足计算下一步计算基础矩阵的需求即可。

4)摄像机校正

使用得到的匹配特征计算摄像机的基础矩阵,由摄像机内参数可以进一步求得本征矩阵,这样就获得了两台摄像机的位置关系信息,可以利用对极几何将图像校正为满足极线约束的行对准图像。

5)立体匹配

获得了行对准图像后,匹配特征点的二维搜索变成了沿着极线的一维搜索,不仅节省大量计算,而且可以排除许多虚假匹配的点,以此为基础就可以获得两幅图像中点的稠密立体匹配,并计算出视差图。

6)三维建模

使用三角测量的方法,由视差计算点的深度值,获得稠密的深度点云(point cloud),对点云进行插值和网格化就可以得到物体的三维模型。

4. 论文总结

4.1. 声呐 (Sonar)

Sonar 是 sound, navigation, 和 ranging 的缩写,主要分为主动和被动两种方法。

被动声呐系统通常有大型的声波数据,计算机可以应用这些数据对船只类别或运动进行识别,被动声呐系统的传感器一般不应用于三维重建,故此处不做重点讨论。

主动声呐系统是通过发射声波脉冲,然后接收反射回来的声波来获取信息,这些声波可以使恒定频率的,也可以是可调频率的。通常长距离测距一般采用低频率声波(几百千赫兹),短距离测距时采用高频率声波(几兆赫兹)。其中,主动声呐又可分为单波束声呐(SBS),多波束声呐(MBS),和侧扫声呐(SSS)三种。如果扫描角度很宽,通常称之为成像声呐(IS),否则,通常称为分析声

呐，主要用来收集水深数据。此外，这些声呐可以安装在水下运载工具上进行数据采集工作。

声音在水中的传播速度尽管要受到水的温度、含盐度的影响，但仍比在空气中传播速度要快。声呐可以进行远距离的探测，甚至可以从几千米深的水中采集数据，而且分辨率可以达到零点几米。

水深数据收集最明显的一个例子是通过多波束声呐^[3]实现的。多波束声呐传感器还可以与彩色相机相结合，不仅可以采集深度信息，而且还可以采集色彩信息^[4]，但是，这样做的结果会使多波束声呐采集信息的范围比通常情况要小一些。

单波束声呐^[5]可以通过旋转它的方向来获取目标物的三维信息，但是其数据采集的速率不如多波束声呐快。

侧扫声呐^[6]通常是安装在 AUV 上进行操作，以一恒定的速度对横断面进行扫描，虽然侧扫声呐被看做是一种二维成像声呐，但目标物的三维信息可以从中推断出来。

成像声呐有着一个宽的波束角，这一点不同于多波束声呐和单波束声呐。Brahim^[7]等人在 2011 年用一个视场角为 $29^{\circ} \times 10.8^{\circ}$ 的成像声呐生成了 48×512 或者是 96×512 的方位图，其中每一个像素点都包含了在具有相同方位角和相同距离的场景中所有点的反射能量。

成像声呐与传统相机相结合的系统被用来提高三维输出和达到更好的声呐对应关系。Negahdaripour^[8]用一个相机与声呐相结合形成的立体系统，通过两幅图像的对应关系研究了圆锥。Babae^[9]等人用成像声呐与相机相结合，通过成像声呐与相机所成像的对应特征实现了重建的工作。Negahdaripour^[10]在 2010 年利用一组图像的 sfm 方法恢复了三维数据。

在声波图像中物体的阴影也可以用来进行三维重建工作，Aykin^[11]等人在简单背景中恢复了简单的几何模型，系统的主要要求是目标物的阴影必须是可以区分出来的，而且它必须位于一个已知的平面中。

表 1 是用声呐进行三维重建的方法比较：

Table 1. Summary of sonar 3D reconstruction solutions

References	Sonar	Type Scope	Accuracy	Resolution
Pathak [3]	MBS	Rough map for path planning	≈ 1 m	2.5 cm
Rosenblum [12]	MBS	Small object reconstruction	--	≈ 8 cm
Hurtos [4]	MBS + Camera	Projects images on 3D surfaces	2.34 cm	- -
Guo [5]	SBS	Small target 3D reconstruction	2.62 cm	- -
Coiras [6]	SSS	Seabed elevation with UW pipe	19 cm	5.8 cm
Brahim [7]	IS	Sparse scene geometry 0.5 m	--	- -
Aykin [11]	IS	Smooth surfaces 3D reconstruction	≈ 15 cm	1 cm
Negahdaripour [8–10]	IS + Camera	Alternative to stereo systems	≈ 5 cm	- -

4.2. LiDAR

激光雷达被广泛用作沿海和近海研究的映射工具。与线激光扫描类似，通过一条线激光扫描整个景观和海洋。激光雷达恢复海面 and 海底景象依赖于激光的波长。Reineman^[13]等人应用了能够穿透海水 30m 的 532nm 的绿激光与红激光或红外激光相结合,分辨率可以达到 0.7m。

激光雷达已被用于水下目标探测，以及沿海深度的测量^{[14][15]}。此外，可以通过调制激光雷达信号来扩展其探测范围以及减少后向散射的影响^{[16][17]}。

表 2 为激光雷达三维重建方法的比较：（注：很少用于水下）

Table 2. Summary of LiDAR 3D reconstruction solutions

References	Class	Wavelength	LiDAR Model	Combination	Accuracy	Resolution
Reineman [13]	ToF	905 nm	Riegl LMS-Q240i	Camera, GPS	0.42 m	0.5 m
Cadalli [14]	ToF	532 nm	U.S. Navy prototype	PMT + 64 × 64 CCD	-	≈ 10 m
Pellen [15]	UWTD1	532 nm	ND:YAG laser	PMT	-	-
Mullen [16,17]	UWTD1	532 nm	ND:YAG laser	PMT + Microwave	-	-

4.3. LLS

为了提高上述系统的分辨率，我们可以将激光与成像设备进行结合使用。在发射端，我们通常用 532nm 绿激光作为光源，因为其具有高的性价比以及在水中吸收和散射系数比较低；在接收端，尽管很多方法都用二极管或相机作为接收装置，光电倍增管或光子计数器也可被用来做接收装置。

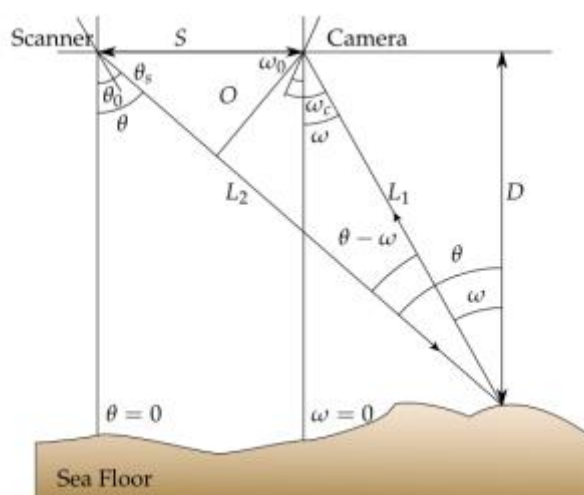
为了获取一个更大的测量范围，减少光在水中的散射影响，一些线激光扫描系统在发送端发送可以被封闭接收器接收的窄带激光脉冲。

激光线扫描可以分为连续波 (CW-LLS)、脉冲波 (PG-LLS) 和调制波 (Mod-LLS) 三种。表 3 给出了线激光扫描进行三维重建方法的总结，线激光扫描系统除了进行重建工作，还可用来长距离的成像，表 3 中还列出了一些额外的线激光扫描进行长距离成像的文献。

4.3.1 连续波激光线扫描 (CW-LLS)

这种方法运用三角测量原理进行深度信息的恢复。一个移动的激光器、一个进行扫描的摄像机与目标物之间形成一套完整的三角测量设备^{[18][19]}。

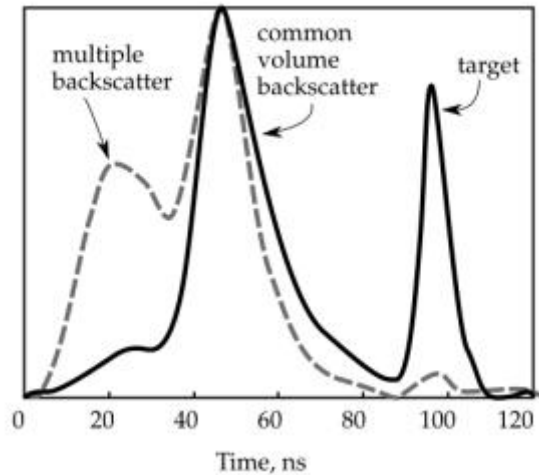
相机、激光器以及目标物三者的几何关系如图所示：



激光扫描系统三角测量原理图

4.3.2 脉冲激光线扫描

脉冲波激光线扫描系统运用了飞行时间原理，该方法中 CCD 快门可严格按照精确的时间控制当激光照到待测物体再反射回来时才将快门打开，这样就能将后向散射光与目标反射光分离开来，从而减小了散射光的影响。如下图所示，可以在 80ns 到 120ns 时打开快门来减少水中后向散射的影响。



线激光扫描系统返回信号图

脉冲激光线扫描系统已经在扩展范围成像中广泛应用。在 1990 年早期^[25]，线激光扫描系统已经被用于海豚号研究潜艇，并且实现了在一个扩展范围内的高分辨率成像。

Dagleish^[24]等人比较了脉冲激光线扫描系统和连续波激光线扫描系统，实验结果表明脉冲成像系统提高了对比度与高信噪比。

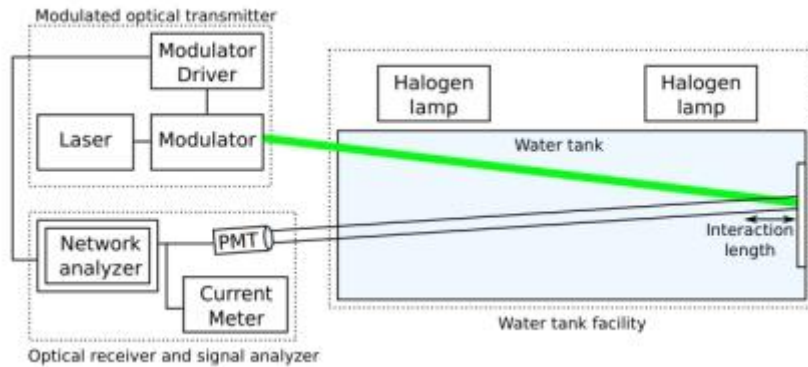
针对真实的应用时间脉冲法三维重建，McLeod[20]等人发表了一篇关于装载在 AUV 上的应用时间脉冲原理的产品的论文，该装置在测量 30m 远处的点时达到了 7mm 的准确率。

4.3.3.调制激光线扫描（Mod-LLS）

调制激光线扫描通过频域而不是空间和时域来辨别发送信号的变化。在声呐（雷达）系统中，通过调制与解调信号测得了传感器与目标物的距离。

在水下，振幅调制是唯一可以实现的调制。原始信号和返回的信号被减掉，可以通过其余信号的解调来获取距离信息。

同样的方法也可以用来扩展范围成像，Mullen^[26]等人开发了一个调制激光线系统，该系统中激光源应用了频率调制来获取目标物能被照亮的范围。光学调制用来区分散射光，不同频率的光进行了比较实验，结果表明高频率（90Mhz）的光要比低频率（50Mhz 或 10Mhz）的光所探测的距离远，该论文中作者应用的装置如下：



图：激光线扫描设置包括调制光发射机、光接收机和信号分析仪和水箱设施。

相互作用的长度为光束传输与接收视场角的重叠距离。

2011 年 Cochenour^[21]等人对基于单频调制脉冲（ST-MP）与基于伪随机编码调制脉冲（PN-MP）的不同调制方法进行了比较，结果显示伪随机编码调制由于伪随机码的相关特性在清水中的效果要比单频调制脉冲的效果好。

2013 年 Rumbaugh^[22]等人提出了一种单轴移动的方法。尽管作者将该方法归结为激光雷达原理，但他的装置更像是线激光扫描系统，而且也不是通过一个平面进行测量。在这篇文章中，实现了 60 厘米远的目标物分辨率可以达到 1 厘米。该系统可以用来扫描进行三维重建，并且可以作为一个真正的线激光扫描系统。

Dominicis^[23]等人应用一种经过振幅调制频率为 80MHZ 蓝色激光（405nm）实现了一种更简单的方法，称作基于三维激光扫描系统的调制解调器，可以对 8.5 米远的目标物进行重建，且误差在 5% 以内。该系统与之前描述的相似，但该研究更关注与物体的三维重建，展现出了水下远程目标物重建技术的巨大潜力。

Table 3. Summary of laser line scanning 3D reconstruction solutions

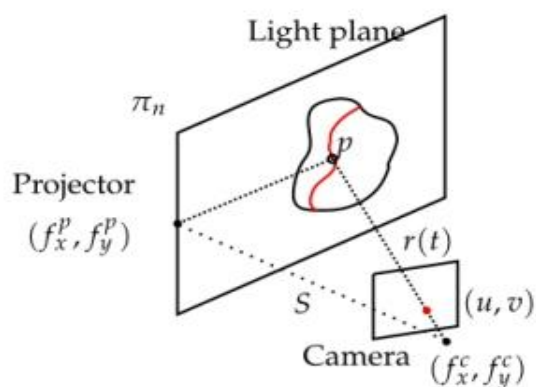
References	Aim	Type	Wavelength	Receiver	Accuracy	Resolution
Moore [18]	3D	CW-LLS	532 nm	Linescan CCD	-	1 mm
Moore [19]	3D	CW-LLS	532 nm	Linescan CCD	-	3 mm
McLeod [20]	3D	PG-LLS	-	-	7 mm	1 mm
Cochenour [21]	3D	Mod-LLS	532 nm	PMT	-	-
Rumbaugh [22]	3D	Mod-LLS	532 nm	APD	4.5cm	1cm
Dominicis [23]	3D	Mod-LLS	405 nm	PMT	5 mm	1mm
Dalglish [24]	Img. 1	CW-LLS	532 nm	PMT	-	-
Dalglish [24]	Img. 1	PG-LLS	532 nm	PMT	-	-
Gordon [25]	Img. 1	PG-LLS	488-514.5 nm	PMT	-	-
Mullen [26]	Img. 1	Mod-LLS	532 nm	PMT	-	-

¹The technique is aimed at extended range imaging

4.4. Structured Light

结构光系统包含一个摄像头和一个彩色（或者白色）投影仪。摄像头、投影仪与目标物体三者之间应用了三角测量的原理。

投影仪向场景中投射已知模式的光，通常是一组光平面，如下图所示，其中两个平面与相机光线是已知的。



结构光系统的三角测量原理图

2011 年 Zhang^[29]等人应用了四种不同模式光的时分复用方法, 而且对结构光法与立体视觉法进行了比较, 得出对于纹理信息比较少的物体重建结果, 结构光法要比立体视觉方法效果好。Tornblom^[30]通过向水池投射 20 种不同灰度编码模式的光也得出了同样的结果。

2011 年 Bruno^[28]等人也是投射了灰度编码模式的光, 但最后将其转换成了四个像素宽模式。通过这个转换, 与仅有一个像素宽的模式比较可以得到更好的准确率, 因为在只有一个像素宽的模式中, 要找到窄的黑色白色光线是更加困难的。在这个装置中, 总共应用了 48 种模式的光, 然而通过两摄像头位置来计算三维点是由相机标定阶段决定的。投影仪是用来照亮场景, 同时获取深度信息的设备。因此, 对于投影仪来说是不需要进行校准的, 并且没有任何一个投影仪产品是不结合测量的准确率就可以用的。这个系统是结构光与立体视觉的一个结合。

Narasimhan 和 Nayar^[31]在一个用传统探测照灯照明时, 除了后向散光外什么都不能看清的高度浑浊的水中, 对一个装有稀释过的牛奶的罐子进行结构光扫描并实现了三维信息的恢复。本文通过缩小照明区域来获取目标物体的形状, 从而进行了三角测量。

基于激光的结构光系统

水下激光条纹扫描系统^[33]最初是由 Jaffe 与 Dunn 提出的。

Tetlow 和 Spours^[34]在他们的论文中, 将一个激光条纹扫描系统与一个可以自动调整阈值的摄像机相结合, 根据离目标物的距离制定了一个标定的激光条纹的厚度表, 实现了在 3 米处的分辨率为 5 毫米。

Kondo^[35]等人在 AUV 上测试了一个激光条纹系统, 除了用于三维重建外, 他们也通过实时追踪图像来实现对机器人的控制, 来保持一个与海底相对安全的距离, 他们通过改变运载工具的深度来集中相机图像中的激光线, 实现了在 3 米处的分辨率为 40 毫米。

Hidebrandt^[36]等人将激光线装载到了一个可以旋转 45 度的伺服电机上。该系统中, 相机镜头采用 640*480 的 CMOS 传感器, 每秒 200 帧图像, 具有 90 度的水平视场角。这个系统 2.4 秒可以返回 300K 个点。论文还提出了一种新的相机标定方法。在灰色表面, 激光是很容易探测到的, 但在白色表面, 激光被很强的反射回来, 因此需要缩短相机的曝光时间来补光。系统通过检测在同一标定模式下激光来计算激光器相对于照相机的位置。

Bodenmann^[37]等人将由一个照相机、一个线激光器和一个 LED 灯组成的系统搭载到 AUV 上,用来采集图像和三维信息。激光打在图像的上半部分,同时灯光照亮下半部分。因此,就可以有足够的对比度来检测激光线。在 2012 年,Bodenmann^[38]等人又采用类似的系统,将其搭载到 ROV 上对真实场景进行了三维重建工作,比如沉船。

Nakatani^[39]等人应用搭载不同传感器的 AUV 与迭代最近点 (ICP) 算法进行了三维重建。200 米深水下被重建的烟囱为 3 米高。在这个系统中,照相机与激光条纹器分别装置在两个独立的防水壳中。尽可能保持 AUV 静止,将激光投射到场景中并旋转,然后相机捕捉激光线,从而恢复三维信息。

Jakas 和 Dominicis^{[23][32]}在他们的论文中用到了双激光扫描仪来扩展一个单独激光条纹的视场角,其中水平视场角为 180 度,该系统与商业传感器 3DLS[40]非常的类似。

Parts^[41]等人将摄像机安装在 AUV 上,将激光条纹器安装在一个可操作控制的水下运载工具上,激光条纹通过机械臂来扫描场景,在扫描过程中,通过追踪海底场景来估计水下机器人的运动,所以就可以弥补数据之间一些小的偏差。

Yang^[42]等人在水平方向安装了一个摄像机与一个垂直激光条纹器,通过先前标定时获得的数据表来恢复三维信息。尽管在图像中采集到了激光条纹像素,深度信息也是通过其最近邻的 4 个像素点获得的。

Massot 与 Oliver^{[43][44][45]}设计了一个基于激光的结构光系统,利用衍射光学元件 (DOE) 扩展一个简单激光点拓展了激光条纹的获取方法,将其扩展为 25 束平行光线,称作基于激光的结构光系统 (LbSL)。将该模式光头像目标物,并由彩色相机来恢复三维信息。通过一个相机只能获取稀疏的三维信息,同时如果通过多个相机就可获得稠密的三维信息。

表 4 给出了各种结构光进行三维重建方法的总结,没有明确的重建结果,但已经从他们各自的文章中推导出了重建的分辨率。

Table 4. Summary of structured light 3D reconstruction solutions

References	Type	Color/Wavelength	Pattern	Accuracy	Resolution
Zhang [29]	SL	Grayscale	Sinusoidal Fringe	≈ 1 mm	-
Tornblom [30]	SL	White	Binary pattern	4 mm	0.22 mm
Bruno [28]	SL	White	Binary pattern	0.4 mm	0.3 mm
Narasimhan [31]	SL	White	Light plane sweep	9.6 mm	-
Bodenmann [37,38]	LS	532 nm	Laser line	-	-
Yang [42]	LS	532 nm	Laser line	-	-
Kondo [35]	LS	532 nm	Laser line	-	≈ 1 cm
Tetlow [34]	Mot. LS	532 nm	Laser line	1 cm	5 mm
Hildebrandt [36]	Mot. LS	532 nm	Laser line	-	-
Prats [41]	Mot. LS	532 nm	Laser line	≈ 1 cm	-
Nakatani [39]	Mot. LS	532 nm	Laser line	≈ 1 cm	-
Jakas [23,32]	Dual LS	405 nm	Laser line	-	≈ 1 cm
Massot [44]	LbSL	532 nm	25 laser lines	3.5 mm	-

4.5 Structure from Motion

SfM 方法运用了三角测量的原理，通过由单眼相机拍摄的目标物或场景的图片，将连续帧图像间的特征进行匹配，得到照相机的相对运动，即三维轨迹。

Sedlazeck^[46]等人应用 AUV 和一个高清彩色相机重建了一个真实的三维场景，通过基于图像梯度的角点检测来选择的图像特征。后来，RANSAC[102]被用来滤除特征点匹配后的奇异值。

Pizarro^[47]等人使用海底 AUV 和 1280*1024 相机来进行光学调查研究。应用的特征器为 Harris 角点检测，它的描述符为一个广义色彩矩。

Meline^[48]等人在浅水中用 1280*720 相机比较了 Harris 和 SIFT 特征，作者对一座雕像进行了重建，得出对于散斑噪声，Harris 特征要比 SIFT 特征强壮。

McKinnon^[49]等人应用 SURF 特征与高分辨率 2272*1704 摄像机对一块珊瑚

进行了重建。该论文对视野的重叠部分提出了不同的观点，他们的 SfM 方法实现了在 1 米到 1.5 米的准确率为 0.7 毫米。

Jordt-Sedlazeck 与 Koch^[50]针对在水中玻璃的折射运动算法提出了一种新的折射结构，通过考虑空气-玻璃-水的折射系数，这个具有折射结构的 SfM 算法改进了传统的 SfM 算法。

Cocito^[51]等人应用由潜水员获取的图像进行按比例缩小的三维数据的恢复，该处理要求剪辑出图像中感兴趣的轮廓。

Bruno^[52]等人对考古遗址进行研究，应用三维设计制图软件实现了多视点的三维重建。

Nicosevici^[53]等人在机器人方法中应用 SIFT 特征实现了 11 毫米的准确率。

表 5 是 SfM 方法进行三维重建的方法总结。

Table 5. Summary of structure from motion 3D reconstruction solutions

References	Feature	Matching Method	Accuracy	Resolution
Sedlazeck [46]	Corner	KLT Tracker	-	-
Pizarro [47]	Harris	Affine invariant region	3.6 cm	-
Meline [48]	Harris	SIFT	-	-
McKinnon [49]	SURF	SURF	0.7 mm	
Jordt-Sedlazeck [50]	-	KLT Tracker	-	-
Cocito [51]	Silhouettes	Manually	≈ 1 cm	-
Bruno [52]	SIFT	SIFT	4.5 mm	-
Nicosevici [53]	SIFT	SIFT	11 mm	-

4.6 Stereo Vision

立体视觉方法与 SfM 方法的原理相同，只是特征点是通过左右两个摄像机采集的图像匹配来计算三维对应关系的。一旦立体视觉系统被标定，两个摄像机的相对位置也就随之确定了。

很多不同的特征描述以及匹配方法已经被应用，SIFT^[54-58]与 SURF^[59]一样是最常用的方法。

Schmidt^[57]等人用商业相机设置成基线宽度为 35 毫米的立体视觉系统，利用

SIFT 特征实现了微深度测量方法，在重建过程中分辨率为 3 毫米。

Brandou^[58]等人用搭载在 ROV 机械臂上的立体视觉虹膜系统，结合 SIFT 特征和 RANSAC 程序删除离异值，然后通过稀疏调整来实现研究水下自然物体的正确航向。

Beal^[59]等人用了一个宽基线立体视觉系统和左右两幅图像的 SURF 特征。他们运用这些特征来恢复经过平滑和映射后的场景结构。然后通过德劳内三角形计算三维点，并将图像的纹理信息映射到网格中。该设置被用于恢复巴哈马群岛的珊瑚礁。

Servors^[60]等人对由基线宽度为 12 厘米的相机获得的深度图像进行了折射投影校正，与标准的校正方法比较得出，该方法有更好的准确率和更多的像素对应关系，而且该方法还直接运用了最近点迭代算法（ICP）。

Hogue^[61]等人将立体视觉系统与一个惯性单元组合到一起放到一个水密箱中，该系统用于密集立体场景的重建，论文主要实现了沉船的重建工作。

表 6 主要是立体视觉三维重建方法的总结。

Table 6. Summary of stereo vision 3D reconstruction solutions

References	Feature	Matching Method	Baseline	Accuracy	Resolution
Kumar [54]	SIFT	RANSAC and ICP	-	-	-
Jasiobedzki [55]	SIFT	RANSAC and ICP	-	-	-
Nurtantio [56]	SIFT	SIFT	8 and 16 cm	-	-
Schmidt [57]	SIFT	SIFT	35 mm	-	3 mm
Brandou [58]	SIFT	SIFT		-	-
Beall [59]	SURF	SURF and SAM	60 cm	-	-
Servos [60]	-	ICP	12 cm	26.4 cm	-
Hogue [61]	Corners	KLT tracker	12 cm	2 cm	-

5. 商业产品

表 7 主要是一些应用各种原理的商业产品的规格参数。

Table 7. Summary of stereoscopy 3D reconstruction solution

Name	Company	Range(m)		Depth (m)	Resolution (mm)	Field of view(deg)	Motorized	Method
		Min	Max					
INSCAN [63]	Teledyne CDL	2	25	3000	5	30 × 30 × 360	yes	TOF
SL1 [27]	3D at Depth	2	30	3000	4	30 × 30 × 360	yes	TOF
3DLS [40]	Smart Light Devices	0.3	2	4000	0.1	-	-	Triangulati on
ULS-100 [64]	2g Robotics	0.1	1	350	1	50 × 360	yes	Triangulati on
ULS-200 [65]	2g Robotics	0.25	2.5	350	1	50 × 360	yes	Triangulati on
ULS-500 [66]	2g Robotics	1	10	3000	3	50 × 360	yes	Triangulati on
Cerberus [67]	Savante	-	10	6000	-	-	-	Triangulati on
SLV-50 [68]	Savante	-	2.5	6000	1	60	no	Triangulati on
Lumeneye [69]	Savante	-	-	6500	-	65	no	Laser only
SeaStripe [70]	Tritech	-	-	4000	-	64	no	Laser only

6. 对比

Table 8. Strengths and weaknesses of the sensors and techniques for 3D reconstruction.

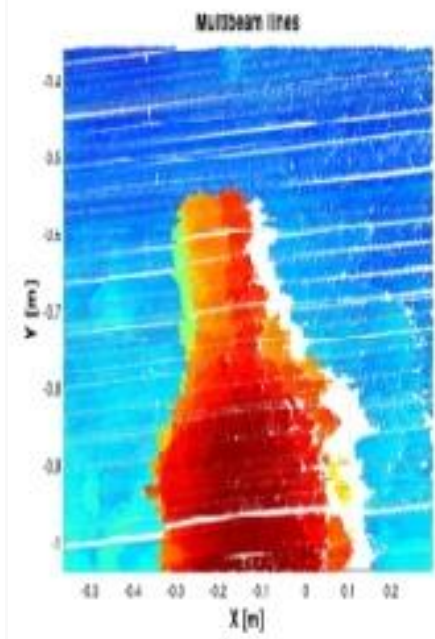
3D technique	Range	Platform	Resolution	Ease of assembly	Price
MBS	< 11,000 m	V ¹ , T ² , ROV, AUV	Low	Intermediate	High
SBS	< 6000 m	V, ROV, AUV	Low	Intermediate	High
SSS	< 150 m	T, AUV	Low	Intermediate	High
IS	< 150 m	V, T, ROV, AUV	Low	Intermediate	High
LiDAR	< 20 m	Aerial	Low		High
LLS	< 10 m	ROV	Intermediate	Low	Intermediate
SL	< 3 m	ROV, AUV	High	Intermediate	Intermediate
SfM	< 3 m	ROV, AUV	Intermediate	High	Low
SV	< 10 m	ROV, AUV	Intermediate	Intermediate	Low

¹Vessel, ¹Towed

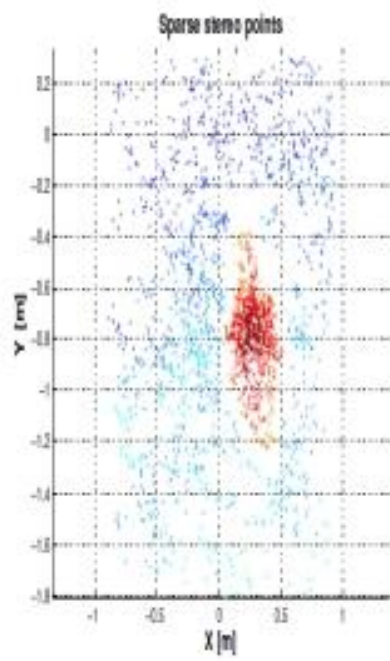
Table 9. Strengths and weaknesses of the sensors and techniques for 3D reconstruction.

Technology	Strength	Weakness
MBS	Early adopted ; Long range and coverage ; Independent of water turbidity	High cost; High minimum distance; Low resolution
SBS	Early adopted ; Long range ; Independent of water turbidity	High cost; Echoes; Low resolution
SSS	Good data acquisition rate ; Independent of water turbidity ; Long range	High cost; Needs constant speed; Unknown dimension
IS	Medium to large range ; Independent of water turbidity	High cost; Unknown dimension
LiDAR	Long range	High cost
LLS	Medium data acquisition rate ; Medium range ; Good performance in scattering waters	Intermediate cost
SfM	Simple and inexpensive ; High accuracy on well-defined targets ;Close range	Computation demanding; Sparse data covering; Needs textured scenes
SV	Simple and inexpensive ; High accuracy on well-defined targets ;Close range	Computation demanding; Low data acquisition rate
SL	High data acquisition rate; Close range	Computation demanding; Missing data in occlusions and shadows

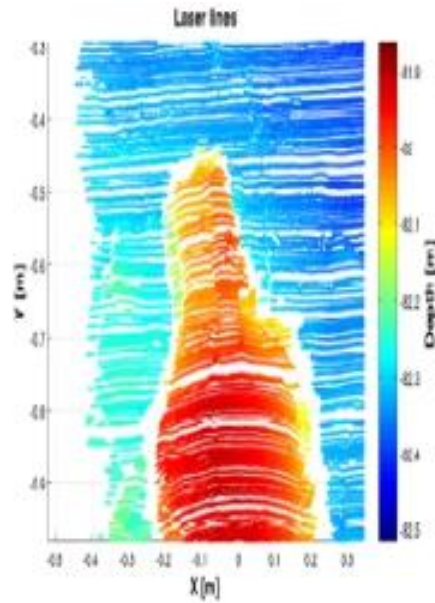
在 2009 年时，Chris Roman 等人曾在 NOAA 的支持下对多波束法，立体视觉法和激光线结构光法进行了比较实验，通过对三种方法的比较得出在这三种方法中线激光法具有最高的图像分辨率。



A. 多波束法



B. 立体视觉法



C.线结构光法

综合上述水下三维重建的方法来看，我们常用声学方法适合于长距离的水下地形探测，但是精度比较差；距离选通法/时间飞行法也是适于长距离的探测，但是对系统设备的要求比较高；双目立体视觉法虽然研究的相对较多，且可同时获得目标物的颜色纹理信息，但却受到光照条件与水体散射的影响较多，不适于浑浊水质，计算量也特别大；在结构光法中一般线结构光用的比较多，线结构光的重建精度比较高，而且线结构光的扫描光束能量相对集中，具有相对比较远的探测距离范围，可以很好地将后向散射光与目标反射光分离开来，进而可以减少后向散射光对测量信息的影响，可以不受光照影响。但是单纯的线结构光法无法获得目标物体的颜色信息，因此本文将通过控制线激光器的打开与关闭来用摄像机捕捉目标物体的颜色信息，从而完成彩色三维重建的工作。

参考文献

- [1] Roman C, Singh H. Improved vehicle based multibeam bathymetry using sub-maps and SLAM. Intelligent Robots and Systems, 2005 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2005: 3662-3669.
- [2] 田洪波, 基于飞行时间摄像机的三维模型重建研究. 苏州大学, 硕士论文, 2011.
- [3] Pathak, K.; Birk, A.; Vaskevicius, N. Plane-based registration of sonar data for underwater 3D mapping. In Proceedings of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taipei, Taiwan, 18–22 October 2010; pp. 4880–4885.
- [4] Hurtos, N.; Cufi, X.; Salvi, J. Calibration of optical camera coupled to acoustic multibeam for underwater 3D scene reconstruction. In Proceedings of the MTS/IEEE Oceans, Seattle, WA, USA, 20–23 September 2010; pp. 1–7.
- [5] Guo, Y. 3D underwater topography rebuilding based on single beam sonar. In Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Signal Processing, Communication and Computing (ICSPCC 2013), Kunming, China, 5–8 August 2013; pp. 1–5.
- [6] Coiras, E.; Petillot, Y.; Lane, D.M. Multiresolution 3-D reconstruction from side-scan sonar images. IEEE Trans. Image Process. 2007, 16, 382–390.
- [7] Brahim, N.; Gueriot, D.; Daniel, S.; Solaiman, B. 3D reconstruction of underwater scenes using DIDSON acoustic sonar image sequences through evolutionary algorithms. In Proceedings of the MTS/IEEE Oceans, Santander, Spain, 6–9 June 2011; pp. 1–6.
- [8] Negahdaripour, S.; Sekkati, H.; Pirsiavash, H. Opti-acoustic stereo imaging: On system calibration and 3-D target reconstruction. IEEE Trans. Image Process. 2009, 18, 1203–1214.
- [9] Babaei, M.; Negahdaripour, S. 3-D Object Modeling from Occluding Contours in Opti-Acoustic Stereo Images. In Proceedings of the MTS/IEEE Oceans, San Diego, CA, USA, 23–27 September 2013; pp. 1–8.
- [10] Negahdaripour, S. On 3-D reconstruction from stereo FS sonar imaging. In Proceedings of the MTS/IEEE Oceans, Seattle, WA, USA, 20–23 September 2010; pp. 1–6.
- [11] Aykin, M.; Negahdaripour, S. Forward-Look 2-D Sonar Image Formation and 3-D Reconstruction. In Proceedings of the MTS/IEEE Oceans, San Diego, CA, USA, 23–27 September 2013; pp. 1–4.
- [12] Rosenblum, L.; Kamgar-Parsi, B. 3D reconstruction of small underwater objects using high-resolution sonar data. In Proceedings of the 1992 Symposium on Autonomous

Underwater Vehicle Technology, Washington, DC, USA, 2–3 June 1992; pp. 228–235.

- [13] Reineman, B.D.; Lenain, L.; Castel, D.; Melville, W.K. A Portable Airborne Scanning Lidar System for Ocean and Coastal Applications. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2009, 26, 2626–2641.
- [14] Cadalli, N.; Shargo, P.J.; Munson, D.C., Jr.; Singer, A.C. Three-dimensional tomographic imaging of ocean mines from real and simulated lidar returns. In *Proceedings of the SPIE 4488, Ocean Optics: Remote Sensing and Underwater Imaging*, San Diego, CA, USA, 29 July 2001; pp. 155–166.
- [15] Pellen, F.; Jezequel, V.; Zion, G.; Jeune, B.L. Detection of an underwater target through modulated lidar experiments at grazing incidence in a deep wave basin. *Appl. Opt.* 2012, 51, 7690–7700.
- [16] Mullen, L.; Vieira, A.; Herezfeld, P.; Contarino, V. Application of RADAR technology to aerial LIDAR systems for enhancement of shallow underwater target detection. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 1995, 43, 2370–2377.
- [17] Mullen, L.J.; Contarino, V.M. Hybrid LIDAR-radar: Seeing through the scatter. *IEEE Microw. Mag.* 2000, 1, 42–48.
- [18] Moore, K.; Jaffe, J.S.; Ochoa, B. Development of a new underwater bathymetric laser imaging system: L-bath. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2000, 17, 1106–1117.
- [19] Moore, K.; Jaffe, J.S. Time-evolution of high-resolution topographic measurements of the sea floor using a 3-D laser line scan mapping system. *IEEE J. Ocean. Eng.* 2002, 27, 525–545.
- [20] McLeod, D.; Jacobson, J. Autonomous Inspection using an Underwater 3D LiDAR. In *Proceedings of the MTS/IEEE Oceans*, San Diego, CA, USA, 23–27 September 2013.
- [21] Cochenour, B.; Mullen, L.J.; Muth, J. Modulated pulse laser with pseudorandom coding capabilities for underwater ranging, detection, and imaging. *Appl. Opt.* 2011, 50, 6168–6178.
- [22] Rumbaugh, L.; Li, Y.; Bollt, E.; Jemison, W. A 532 nm Chaotic Lidar Transmitter for High Resolution Underwater Ranging and Imaging. In *Proceedings of the MTS/IEEE Oceans*, San Diego, CA, USA, 23–27 September 2013; pp. 1–6.
- [23] De Dominicis, L.; Fornetti, G.; Guarneri, M.; de Collibus, M.F.; Francucci, M.; Nuvoli, M.; Al-Obaidi, A.; Mcstay, D. Structural Monitoring Of Offshore Platforms By 3d Subsea Laser Profilers. In *Proceedings of the Offshore Mediterranean Conference*, Ravenna, Italy, 20–22 March 2013.
- [24] Dalglish, F.R.; Caimi, F.M.; Britton, W.B.; Andren, C.F. Improved LLS imaging

- performance in scattering-dominant waters. In Proceedings of the SPIE 7317, Ocean Sensing and Monitoring, Orlando, FL, USA, 29 April 2009.
- [25] Gordon, A. Use of Lases Scanning Systems on Mobile Underwater Platforms. In Proceedings of the 1992 Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology, Washington, DC, USA, 2–3 June 1992; pp. 202–205.
- [26] Mullen, L.J.; Contarino, V.M.; Laux, A.; Concannon, B.M.; Davis, J.P.; Strand, M.P.; Coles, B.W. Modulated laser line scanner for enhanced underwater imaging. In Proceedings of the SPIE. 3761, Airborne and In-Water Underwater Imaging, Denver, CO, USA, 28 October 1999; Volume 3761, pp. 2–9.
- [27] 3D at Depth. SL1 High Resolution Subsea Laser Scanner. Available online: <http://www.3datdepth.com/sl1overview/> (accessed on 30 September 2015).
- [28] Bruno, F.; Bianco, G.; Muzzupappa, M.; Barone, S.; Rationale, A. Experimentation of structured light and stereo vision for underwater 3D reconstruction. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 2011, 66, 508–518.
- [29] Zhang, Q.; Wang, Q.; Hou, Z.; Liu, Y.; Su, X. Three-dimensional shape measurement for an underwater object based on two-dimensional grating pattern projection. Opt. Laser Technol. 2011, 43, 801–805.
- [30] Törnblom, N. Underwater 3D Surface Scanning Using Structured Light. Ph.D. Thesis, Uppsala Universitet, Uppsala, Sweden, 2010. Available online: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:378911/FULLTEXT01.pdf> (accessed on 18 September 2015).
- [31] Narasimhan, S.; Nayar, S. Structured Light Methods for Underwater Imaging: Light Stripe Scanning and Photometric Stereo. In Proceedings of the MTS/IEEE Oceans, Washington, DC, USA, 18 – 23 September 2005; pp. 1 – 8.
- [32] Liu, J.; Jakas, A.; Al-Obaidi, A.; Liu, Y. Practical issues and development of underwater 3D laser scanners. In Proceedings of the 2010 IEEE 15th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA2010), Bilbao, Spain, 13 – 16 September 2010; pp. 1 – 8.
- [33] Jaffe, J.S.; Dunn, C. A Model-Based Comparison Of Underwater Imaging Systems. In Proceedings of the Ocean Optics IX, Orlando, FL, USA, 4 April 1988; pp. 344 – 350.
- [34] Tetlow, S.; Spours, J. Three-dimensional measurement of underwater work sites using structured laser light. Meas. Sci. Technol. 1999, 10, 1162 – 1167.

- [35] Kondo, H.; Maki, T.; Ura, T.; Nose, Y.; Sakamaki, T.; Inaishi, M. Structure tracing with a ranging system using a sheet laser beam. In Proceedings of the 2004 International Symposium on Underwater Technology (IEEE Cat. No. 04EX869), Taipei, Taiwan, 20 – 23 April 2004; pp. 83 – 88.
- [36] Hildebrandt, M.; Kerdels, J.; Albiez, J.; Kirchner, F. A practical underwater 3D-Laser scanner. In Proceedings of the MTS/IEEE Oceans, Quebec City, QC, Canada, 15 – 18 September 2008; pp. 1 – 5.
- [37] Bodenmann, A.; Thornton, B.; Nakatani, T.; Ura, T. 3D colour reconstruction of a hydrothermally active area using an underwater robot. In Proceedings of the OCEANS 2011, Waikoloa, HI, USA, 19 – 22 September 2011; pp. 1 – 6.
- [38] Bodenmann, A.; Thornton, B.; Hara, S.; Hioki, K.; Kojima, M.; Ura, T.; Kawato, M.; Fujiwara, Y. Development of 8 m long range imaging technology for generation of wide area colour 3D seafloor reconstructions. In Proceedings of the MTS/IEEE Oceans, Hampton Roads, VA, USA, 14 – 19 October 2012; pp. 1 – 4.
- [39] Nakatani, T.; Li, S.; Ura, T.; Bodenmann, A.; Sakamaki, T. 3D visual modeling of hydrothermal chimneys using a rotary laser scanning system. In Proceedings of the 2011 IEEE Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies, Tokyo, Japan, 5 – 8 April 2011; pp. 1 – 5.
- [40] Smart Light Devices, S. 3DLS Underwater 3D Laser Imaging Scanner. Available online: <http://www.smartlightdevices.co.uk/products/3dlaser-imaging/> (accessed on 30 September 2015).
- [41] Prats, M.; Fernandez, J.J.; Sanz, P.J. An approach for semi-autonomous recovery of unknown objects in underwater environments. In Proceedings of the 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), Brasov, Romania, 24 – 26 May 2012; pp. 1452 – 1457.
- [42] Yang, Y.; Zheng, B.; Zheng, H. 3D reconstruction for underwater laser line scanning. In Proceedings of the MTS/IEEE Oceans, Bergen, Norway, 10 – 14 June 2013; pp. 2008 – 2010.
- [43] Massot-Campos, M.; Oliver-Codina, G. One-shot underwater 3D reconstruction. In Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA), Barcelona, Spain, 16 – 19 September 2014; pp. 1 – 4.
- [44] Massot, M.; Oliver, G.; Kemal, H.; Petillot, Y.; Bonin-Font, F. Structured light and stereo

- vision for underwater 3D reconstruction. In Proceedings of the MTS/IEEE Oceans, Genoa, Italy, 18 – 21 May 2015.
- [45] Massot-Campos, M.; Oliver-Codina, G. Underwater Laser-based Structured Light System for one-shot 3D reconstruction. In Proceedings of the 2014 IEEE Sensors, Valencia, Spain, 2 – 5 November 2014; pp. 1138 – 1141.
- [46] Jordt-Sedlazeck, A.; Koser, K.; Koch, R. 3D reconstruction based on underwater video from ROV Kiel 6000 considering underwater imaging conditions. In Proceedings of the Proceedings of MTS/IEEE Oceans, Bremen, Germany, 11 – 14 May 2009; pp. 1 – 10.
- [47] Pizarro, O.; Eustice, R.M.; Singh, H. Large Area 3-D Reconstructions From Underwater Optical Surveys. *IEEE J. Ocean. Eng.* 2009, 34, 150 – 169.
- [48] Meline, A.; Triboulet, J.; Jouvencel, B. Comparative study of two 3D reconstruction methods for underwater archaeology. In Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Algarve, Portugal, 7 – 12 October 2012; pp. 740 – 745.
- [49] McKinnon, D.; He, H.; Upcroft, B.; Smith, R. Towards automated and in-situ, near-real time 3-D reconstruction of coral reef environments. In Proceedings of the OCEANS 2011, Waikoloa, HI, USA, 19 – 22 September 2011; pp. 1 – 10.
- [50] Jordt-Sedlazeck, A.; Koch, R. Refractive Structure-from-Motion on Underwater Images. In Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Computer Vision, Sydney, Australia, 1 – 8 December 2013; pp. 57 – 64.
- [51] Cocito, S.; Sgorbini, S.; Peirano, A.; Valle, M. 3-D reconstruction of biological objects using underwater video technique and image processing. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 2003, 297, 57 – 70.
- [52] Bruno, F.; Gallo, A.; Muzzupappa, M.; Davidde Petriaggi, B.; Caputo, P. 3D documentation and monitoring of the experimental cleaning operations in the underwater archaeological site of Baia (Italy). In Proceedings of the Digital Heritage International Congress (Digital Heritage), Marseille, France, 28 October – 1 November 2013; pp. 105 – 112.
- [53] Nicosevici, T.; Gracias, N.; Negahdaripour, S.; Garcia, R. Efficient three-dimensional scene modeling and mosaicing. *J. Field Robot.* 2009, 26, 759 – 788.
- [54] Ku3, N.S.; Ramakanth Kumar, R. Design & development of autonomous system to build 3D model for underwater objects using stereo vision technique. In Proceedings of the 2011 Annual IEEE India Conference, Hyderabad, India, 16 – 18 December 2011; pp. 1 – 4.

- [55] Jasiobedzki, P.; Se, S.; Bondy, M.; Jakola, R. Underwater 3D mapping and pose estimation for ROV operations. In Proceedings of the MTS/IEEE Oceans, Quebec City, QC, Canada, 15 – 18 September 2008; pp. 1 – 6.
- [56] Nurtantio Andono, P.; Mulyanto Yuniarno, E.; Hariadi, M.; Venus, V. 3D reconstruction of under water coral reef images using low cost multi-view cameras. In Proceedings of the 2012 International Conference on Multimedia Computing and Systems, Tangier, Morocco, 10 – 12 May 2012; pp. 803 – 808.
- [57] Schmidt, V.; Rzhano, Y. Measurement of micro-bathymetry with a GOPRO underwater stereo camera pair. In Proceedings of the Oceans 2012, Hampton Roads, VA, USA, 14 – 19 October 2012; pp. 1 – 6.
- [58] Brandou, V.; Allais, A.G.; Perrier, M.; Malis, E.; Rives, P.; Sarrazin, J.; Sarrazin, P.M. 3D Reconstruction of Natural Underwater Scenes Using the Stereovision System IRIS. In Proceedings of the MTS/IEEE Oceans, Aberdeen, UK, 18 – 21 June 2007; pp. 1 – 6.
- [59] Beall, C.; Lawrence, B.J.; Ila, V.; Dellaert, F. 3D reconstruction of underwater structures. In Proceedings of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taipei, Taiwan, 18 – 22 October 2010; pp. 4418 – 4423.
- [60] Servos, J.; Smart, M.; Waslander, S.L. Underwater stereo SLAM with refraction correction. In Proceedings of the 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Tokyo, Japan, 3 – 7 November 2013; pp. 3350 – 3355.
- [61] Hogue, A.; German, A.; Jenkin, M. Underwater environment reconstruction using stereo and inertial data. In Proceedings of the 2007. ISIC. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Montreal, QC, Canada, 7 – 10 October 2007; pp. 2372 – 2377.
- [62] Inglis, G.; Roman, C. Sonar constrained stereo correspondence for three-dimensional seafloor reconstruction. In Proceedings of the MTS/IEEE Oceans, Sydney, Australia, 24 – 27 May 2010; pp. 1 – 10.
- [63] Teledyne CDL. INSCAN 3D Scanning Subsea Laser. Available online: <http://teledyne-cdl.com/events/inscan-demonstration-post-press-release> (accessed on 30 September 2015).
- [64] 2G Robotics. ULS-100 Underwater Laser Scanner for Short Range Scans. Available online: <http://www.2grobotics.com/products/underwater-laser-scanner-uls-100/> (accessed on 30 September 2015).

- [65]2G Robotics. ULS-200 Underwater Laser Scanner for Mid Range Scans. Available online:
<http://www.2grobotics.com/products/underwater-laser-scanner-uls-200/> (accessed on 30 September 2015).
- [66]2G Robotics. ULS-500 Underwater Laser Scanner for Long Range Scans. Available online:
<http://www.2grobotics.com/products/underwater-laser-scanner-uls-500/>(accessed on 30 September 2015).
- [67]Savante.Cerberus Subsea Laser Pipeline Profiler. Available online:
<http://www.savante.co.uk/subsea-laser-scanner/cerberus-subsea-laser-pipeline-profiler/>(accessed on 21 September 2015).
- [68]Savante. SLV-50 Laser Vernier Caliper. Available online:
<http://www.savante.co.uk/wp-content/uploads/2015/02/Savante-SLV-50.pdf> (accessed on 21 September 2015).
- [69]Savante. Lumeneye Subsea Laser Module. Available online:
<http://www.savante.co.uk/portfolio-items/lumeneye-subsea-line-laser-module/?portfolioID=5142> (accessed on 21 September 2015).
- [70]Tritech. Sea Stripe ROV/AUV Laser Line Generator. Available online:
<http://www.tritech.co.uk/product/rov-auv-laser-line-generator-seastripe> (accessed on 30 September 2015).