



## 1.3 激光雷达

### 1.3.1 概述

激光雷达(Lidar)，全称 Laser Detecting and Ranging，即激光探测和测距，是一种用于精确获得三维位置信息的传感器，可以确定目标的位置、大小、外部轮廓等。与毫米波雷达工作原理相似，激光雷达通过发射和接收激光束，获取空间的位置点信息（即点云），并根据这些信息进行三维建模。

除了获取位置信息外，激光信号的反射率还可以区分目标物质的不同材质，激光雷达的线束越多，其测量精度越高。由于激光的频率高，波长短，可以获得极高的角度、距离和速度分辨率，这就意味着可以利用多普勒成像技术，构建出清晰的 3D 图像。

### 1.3.2 工作原理

激光雷达一般包括发射系统、接收系统、信息处理三大部分组成，部分激光还包括扫描系统。

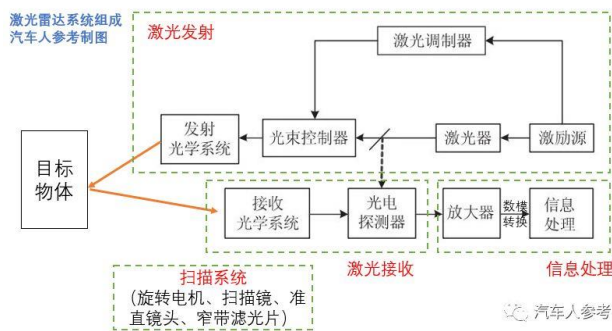
1) 发射系统：包括激励源、激光器（也叫激光二极管）、光速控制器（包括透镜、反射器件、衍生器件，具体表现为准直镜、分束器、扩散片）等；由激励源周期性地驱动激光器，发射激光脉冲，激光调制器通过光束控制器控制发射激光地方向和线数，最后通过发射光学系统，将激光发射到目标物体；

2) 接收系统：包括光电探测器、接收模块（包括透镜、分束器、窄带滤光片）等硬件；目标物体反射回来的激光，经过接收系统，将其汇集到探测器的光敏面后，传递给光电探测器，然后将光信号转化为电信号；

3) 信息处理：包括放大器、数模转换器以及软件算法等；主要用来接收转换后的电信号经过放大处理、降低噪声和干扰后，进行数模转换，由信息处理系统计算，获得目标表面形态、物理属性等特性，最终建立物体模型；算法大体分为三类：点云分割算法、目标跟踪与识别算法、即时定位与地图构建算法等；

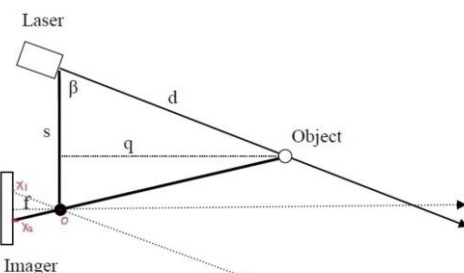
4) 扫描系统：以稳定地转速旋转起来，实现对所在平面地扫描，并产生实时地平面图信息，主要由电机、扫描镜、MEMS 微型谐振镜、相控阵等组成（Flash 中不包含扫描系统）

激光雷达是向目标发射激光探测信号束，然后将收到的从目标反射回来的信号（目标回波）与发射信号进行比较，测量发射信号与接收信号地时间差或者相位差，获得目标的距离信息，然后通过水平旋转扫描来测量角度，建立二维极坐标系，然后通过不同的俯仰角度信息，获得目标的高度信息等，从而完成对目标的探测、跟踪、识别。下图可以反映出激光雷达的组成：



基于时间的测量方法又分为脉冲法和三角法两种。

- 1) 脉冲法, 也称为直接法, 数学模型如下: 距离 = 光速 \* 往返时间 / 2
- 2) 三角法, 也叫间接法, 如下图:



激光雷达发射器发射激光，经过物体(object)反射后被 Imager 捕捉，假设捕捉点为 $x_2$ ，通过焦点 O 作一条虚线平行于入射光线，与 Imager 交于 $x_1$ ，由于图中 $\beta$ 已知，所以可以得到 $x_1$ 的位置。假设 $x_1$ 与 $x_2$ 之间的距离为 $x$ ，可以得到左右两个三角形相似，所以有： $\frac{q}{f} = \frac{s}{x}$ 。

又因为 $\sin \beta = \frac{q}{d}$ ，二者联立可得： $d = \frac{sf}{x \sin \beta}$ 。这就得到了物体到激光的距离 $d$ 。

三角式结果比较简单，测试速度快，但对器件的灵敏性要求高，主要应用在微位移测量，比如物体表面轮廓、宽度、厚度等。不光是脉冲法还是三角法，都需要测量激光的往返时间，难度较大，精度相对低，所以有了**不依赖时间的相位式的测量方法**。

相位式方法不以时间为基准,而是将调制信号对激光光强进行调制,通过测量相位差来检测测量往返时间,其数学模型如下:

$$D = \frac{A}{2} \times \frac{B}{2\pi}$$

其中 $D$ 为距离， $B$ 为激光往返一次所产生的相位差， $A$ 为调制信号的波长， $\frac{A}{2}$ 称为测尺，即相位变化为 $2\pi$ 时所对应的距离。

相位法适合中短距离的测量，是目前测距精度较高的一种方式。



除了相位差或者时间差方法，还有一种是类似于毫米波雷达的调频连续波（FMCW）方法，通过比较反射信号与发射信号频率来确定目标距离信息的方法，具体参见毫米波雷达的测距。

### 1.3.3 激光雷达的特性

激光雷达相比于其他传感器，在自动驾驶中的特性各有不同。评价一个激光雷达性能的好坏，主要从以下几个角度考虑：

- 1) 视场角，包括水平视野（是否 360 度全视角旋转）和垂直视野（俯仰角角度 30 度/15 度）；
- 2) 分辨率，包括水平分辨率和垂直分辨率；目前水平高分辨率可以做到很高，水平分辨率高度达 0.1 度，主要因为水平方向上由电机带动的；垂直分辨率与发射器几何大小相关，也与排列有关，相邻两个发射器的间隔越小，垂直分辨率也越小；针对机械式激光雷达，可以通过 a) 改变激光发射器和接收器排布的方式，b) 通过多个 16 线激光雷达耦合的方式，两种方式来达到减小垂直分辨率的效果；
- 3) 测距范围，即最远的探测距离；
- 4) 距离精度，一般是厘米级的精度；
- 5) 刷新频率，即激光返回一圈的时间；
- 6) 扫描频率，即 1s 内雷达进行了多少次扫描；
- 7) 激光波长，通常为纳米级，最常见的时 905nm 和 1550nm，其中 905nm 比 1550 更便宜，但 1550nm 对人眼安全性高，但 1550nm 吸水率比 905nm 强，但 905nm 的光损失更少；最大辐射功率，主要用来判断其是否需要添加防护。

从某种意义上将，激光雷达也算是一种视觉传感器，相比于其他传感器，激光雷达有自己的优势：

- 1) 不受光线的干扰，激光雷达可以全天候进行运作，它只需要接收激光束的回波信号来获取目标信息，所以，如阴影，黑夜等对激光雷达的影响很小；
- 2) 获取的信息量丰富，可以获取目标的三维信息，距离、角度、反射强度、速度等，生成目标多维度图像；
- 3) 激光雷达波长短，可发射发散角非常小的激光束，其多路径效应小（不会形成定向发射，与微波或者毫米波产生多路径效应），可以探测低空或超低空目标，能有效解决近距离横向视觉盲区问题；
- 4) 激光雷达的有效距离比摄像头远，在低速时，视觉采样点不足，拟合的车道线准确度较低，而激光有效的采样点较多，精准度远高于视觉系统；相比于毫米波雷达，激光雷达的工作频率高于毫米波数个量级，具有极高的距离分辨率、角分辨率和速度分辨率；
- 5) 低速近距离状态下，对于未知物体或者有遮挡物体，激光雷达的目标检测能力要优于摄像头；



6) 点云前处理算力较低，可以直接通过点云进行高密度绘制，输出通行空间，无需二次转化。

### 1.3.4 激光雷达的分类

目前激光雷达的分类标准有很多种，常见的一种是按照内部有无旋转部件来划分，可以分为机械旋转激光雷达、混合式激光雷达以及固态激光雷达。

1) 机械式激光雷达：通过机械旋转实现激光扫描的激光雷达，激光发射部件在竖直方向上排布成激光光源线阵，可通过透镜在竖直面内产生不同指向的激光光束；在步进电机的驱动下持续旋转，竖直面内的激光光束由“线”变成“面”，经旋转扫描形成多个激光“面”，从而实现探测区域内的 3D 扫描；

2) 混合式激光雷达 (MEMS)：将微机电系统 (MEMS) 与振镜结合形成 MEMS 振镜，通过振镜旋转完成激光扫描，驱动电路驱动激光器产生激光脉冲同时驱动 MEMS 振镜旋转，激光在旋转振镜的反射下实现扫描，经发射光学单元准直后射出；

3) 固态激光雷达，取消了机械扫描结构，水平和垂直方向的激光扫描均通过电子方式来实现，相比于 MEMS 激光保留“微动”机械结构，其电子化更彻底。固态激光雷达主要包括光学相控阵 (OPA) 激光雷达和面阵闪光型 (Flash) 激光雷达两种。

a: 光学相控 (OPA) 激光雷达，是由若干发射接收单元组成一个矩形阵列，通过改变阵列中不同单元发射光线的相位差，达到调节发射波角度和方向的目的；激光光源经过光束束器后进入光波导阵列，在波导上通过外加控制的方式改变光波的相位，利用波导间的光波相位差来实现光束扫描；

b: 面阵闪光 (Flash) 激光雷达：采用类似相机的工作模式，运行时，直接法射出一大片覆盖探测区域的激光，随后由高灵敏度接收器阵列计算每个像素对应的距离信息，记录光子飞行的时间信息，从而完成对周围环境的绘制。

不管如何分类，每种激光雷达都有其各自的优缺点，总结如下：

	优先	缺点
机械式激光雷达	拥有 360°视场角，测量精度相对较高	线束越高，体积越大；价格昂贵，旋转部件可靠性低
混合式激光雷达	1) MEMS 微振镜相对成熟，可以以较低的成本和较高的准确度实现固态激光扫描(只有微小的微振镜振动)，并可以针对需要重点识别的物体进行重点扫描，落地快； 2) 传感器可以动态调整扫描方式，以此来聚焦特殊物体，	1) 没有解决接收端问题，光路较复杂，依然存在微振镜的震动，结构会影响整个激光雷达部件的寿命，且激光扫描受微振镜面积限制，与其他技术路线在扫描范围上存在一定差距； 2) 存在激光的反射，反射过



	采集更远更小物体的细节信息并对其进行识别;	程中激光会有较大的损失,导致回波信噪比偏低;
光学相控 (OPA) 激光雷达	1) 结构简单, 尺寸小; 2) 标定简单 3) 扫描速度快, 扫描精度高 4) 可控性好, 光束指向完全由电信号控制, 在允许角度范围内可以做到任意指向; 5) 多目标监控, 相控阵面分割为多个小模块, 每个模块单独控制就可以监控多个目标	1) 扫描角度有限; 2) 光栅衍射除了中央明纹外还会形成其他明纹, 这就造成激光雷达最大功率外形成旁瓣, 分散激光能量; 3) 加工难度高, 由于光学相控阵要求阵列单元尺寸必须不大于半个波长, 一般激光雷达的工作波长为 1 微米, 所以阵列单元的尺寸必须大于 500nm; 4) 接收面大、信噪比差
面阵闪光 (Flash) 激光雷达	Flash 激光束直接向各个方向漫射, 可以快速记录环境信息, 避免扫描过程中目标或激光雷达移动带来的运动畸变	1) Flash 视场角受限, 扫描速率较低; 2) 探测距离小, 当目标距离过大时, 会导致返回的光子数有限, 导致探测精度降低, 无法准确感知目标方位

### 1.3.5 激光雷达在自动驾驶中的应用

随着 2005 年 Sick 和 Velodyne 激光雷达在自动驾驶上的亮相, 激光雷达便成为自动驾驶汽车的标配。激光雷达可以实现很多的功能:

1) 感知, 前面已经介绍了, Lidar 通过扫描得到障碍物反射回的点云后采用分类聚类或者深度学习的方法进行障碍物检测, 目前 Lidar 已经可以高效的检测行人和车辆, 输出检测框或者对点云中的每个点输出 label 进行点云分割, 还有使用 Lidar 进行车道线检测或者路面探测的。但如何在包含遮挡、背景干扰、噪声以及数据分辨率变化等复杂场景中实现对目标的检测识别与分割, 依然是激光雷达存在的一个挑战性的问题。

2) 标定, 就是给出不同的传感器数据集, 找出两个数据集的空间变换关系, 使得两个数据集统一到同一坐标系的过程。标定分为静态标定和动态标定两种。静态标定一般用来确定传感器的初始姿态信息, 主要依赖转台标定、物体表面标记点或者人工选点的方法来实现。动态标定一般用来解决车辆运动过程中, 传感器之间相对姿态信息变换的问题。一般标定方法首先采用最小张树方法和连接图算法实现数据间的邻接关系, 再采用关键点、线、面匹配的方法, 求解出传感器的姿态信息。



3) 里程计与定位, 根据标定得到的相对姿态变换关系后, 利用传感器数据来估计载体车辆姿态随时间的变化改变关系。如利用当前帧与上一帧进行数据匹配, 或者利用当前帧和累计帧构建出来的子图进行匹配, 得到微子变换关系, 从而实现里程计的作用。当使用当前帧与整个点云地图进行匹配时, 就可以得到传感器在整个地图中的位姿, 从而实现在地图中的定位。

# 3D视觉工坊