

无人驾驶激光雷达 LiDAR

叶凌峡

摘要：

激光雷达被称为无人驾驶汽车的眼睛，是一种采用非接触激光测距技术的扫描式传感器，其工作原理与一般的微波雷达系统类似，通过发射激光光束来探测目标，并通过搜集反射回来的光束来形成点云和获取数据，这些数据经光电处理后可生成为精确的 3D 立体图像。采用这项技术，可以准确的获取高精度的物理空间环境信息，测距精度可达厘米级，因此，该项技术成为汽车自动驾驶、无人驾驶、定位导航、空间测绘、安防安防等领域最为核心的传感器设备。

正文：

激光雷达，英文全称为 Light Detection And Ranging，简称 LiDAR，即光探测与测量，是一种集激光、全球定位系统（GPS）和 IMU（Inertial Measurement Unit，惯性测量设备）三种技术于一身的系统，用于获得数据并生成精确的 DEM（数字高程模型）。这三种技术的结合，可以高度准确地定位激光束打在物体上的光斑，测距精度可达厘米级，激光雷达最大的优势就是“精准”和“快速、高效作业”。它是一种用于精确获得 3D 位置信息的传感器，其在机器中的作用相当于人类的眼睛，能够确定物体的位置、大小、外部形貌甚至材质。

无人驾驶是当前激光雷达最热门的应用之一，将 LiDAR 应用于自动驾驶，要追溯到美国的 DARPA（美国国防高等研究计划署），它举办了多次无人驾驶汽车挑战赛，在 2007 年的 DARPA 挑战赛上，7 支参赛队伍中的 6 支都采用了 Velodyne 公司设计的 LiDAR，最终的第一二名就出自这六只参赛队。这引起了准备研发无人驾驶车的谷歌的注意，之后谷歌组建了队伍，最初的人员就来自这些参赛队员。谷歌于 2009 年推出无人驾驶汽车项目，在其无人车原型中使用的就是 Velodyne 公司的 LiDAR。



图 1. Velodyne 公司的 LiDAR

近几年，无人驾驶汽车市场发展火热，谷歌之后，百度、Uber 等主流无人驾驶汽车研发团队都在使用激光雷达作为传感器之一，与图像识别等技术搭配使用，使汽车实现对路况的判断。传统的汽车厂商也纷纷开始研发无人驾驶汽车，包括大众、日产、丰田等公司都在研发和测试无人驾驶汽车技术，他们也都采用了激光雷达。

LiDAR 系统测量 3D 空间中每个像素到发射器间的距离和方向，通过传感器创造出真实世界完整的 3D 模型。操作 LiDAR 系统的基本方法是发射一束激光，然后测量光在物体表面

反射而返回来的信号。LiDAR 模块接收到反射回来的信号所需的时间提供了一种直接测量 LiDAR 系统与物体之间的距离的手段。关于物体的额外的信息，比如它的速率或材料成分，也可以通过测量反射回来的信号中的某些特性而得以确定，这些特性包括诱导多普勒频移（induced Doppler shift）。最后，通过操控发射出去的光，可以测量出环境中许多不同的点，从而创建出完整的 3D 模型。



图 2. 激光雷达点云

激光雷达（LiDAR）类似于微波雷达（Radar），但是分辨率更高，因为光的波长大约比无线电的波长小 10 万倍。它可以区分真实移动中的行人和人物海报、在 3D 立体的空间中建模、检测静态物体、精确测距。

LiDAR 是通过发射激光束来探测目标位置、速度等特征量的雷达系统，具有测量精度高、方向性好等优点，具体如下：

1. 具有极高的分辨率

激光雷达工作于光学波段，频率比微波高 2~3 个数量级以上，因此，与微波雷达相比，激光雷达具有极高的距离分辨率、角分辨率和速度分辨率；

2. 抗干扰能力强

激光波长短，可发射发散角非常小的激光束，多路径效应小，可探测低空/超低空目标；

3. 获取的信息量丰富

激光雷达可直接获取目标的距离、角度、反射强度、速度等信息，生成目标多维度图像，易于理解；

4. 可全天时工作

激光雷达采用主动探测方式，不依赖于外界光照条件或目标本身的辐射特性。它只需发射自己的激光束，通过探测发射激光束的回波信号来获取目标信息。但是激光雷达最大的缺点是容易受到大气条件以及工作环境的烟尘的影响，要实现全天候的工作环境是非常困难的事情。

一、基本原理

与微波雷达原理相似，激光雷达使用的技术是飞行时间（TOF， Time of Flight）。具体而言，就是根据激光遇到障碍物后的折返时间（round-trip delay），计算目标与自己的相对距离。激光光束可以准确测量视场中物体轮廓边沿与设备间的相对距离，这些轮廓信息组成所谓的点云并绘制出 3D 环境地图，精度可达到厘米级别，从而提高测量精度。

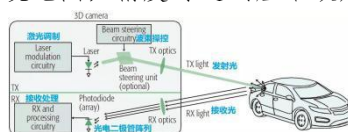


图 3. 基于激光雷达的 3D 相机原理

为了构建 3D 图像，需要光能达到可视范围内的所有测量点，在发射端，相机将通过光束控制单元调整光束的发射，来扫描对应测试区域。在接收端，来自目标反射的光线被收集起来，并且这些光对应发射源的传输时间将被进行计算，从而得到对应测量距离。

二、性能度量

对激光雷达来说，最重要的性能度量包括轴向测距精度，横向测量分辨率，视角范围，帧率，发射功率，最大测量距离，功耗，成本等。下面将针对相关性性能度量作简单说明。

1. 轴向测距精度

轴向测距精度一般是指针对固定距离多次测量后的标准偏差，它与测距分辨率不同，测距分辨率主要是指激光雷达对轴向上的多个目标的区分能力。激光雷达获取的数据可以进行障碍物识别、动态物体检测及定位，如果精度太差就无法达到以上目的；不过，精度太好也有问题，高精度对激光雷达的硬件提出很大的要求，计算量会非常大，成本也会非常高。所以精度应该是适中就好。

2. 视场角及横向测量分辨率

视场角是指 LiDAR 在水平和垂直方向上的视野范围，而横向或角分辨率是 LiDAR 区分在视角范围内相邻两点的能力。

3. 发射功率及人眼安全

对无人驾驶激光雷达的应用来说，具有较长的探测距离是非常重要的，对应则需要有较大的发射功率。然而，最大的发射功率会受到人眼安全规则的限制，这也是激光雷达相对微波雷达最大的设计影响因素，因为仅仅毫瓦级的激光束就可以对人眼产生严重的伤害。

4. 最大测量距离

激光雷达最大的测量距离一般受限于发射功率和接收机的灵敏度。在无人驾驶汽车这个应用领域，对激光雷达的探测距离是有要求的。比如说高速公路上要能够检测到前方车辆，还有在十字路口上，要能够观测马路对面的汽车。

三、典型 LiDAR

从实现原理上来对 LiDAR 作个分类，比较典型的设计方案有脉冲调制 (Pulsed)，调幅连续波 (AMCW) 和调频连续波 (FMCW)。这对应了两种测距的方法，脉冲法和相位法。脉冲法测距的优点是测量距离远，系统体积小，抗干扰能力强，但精度较低；相位法测距的优点是精度高，但测量距离受到一定限制，且系统造价高。下面分别介绍一下这三种类型方案的原理及对比。

1. 脉冲调制 LiDAR

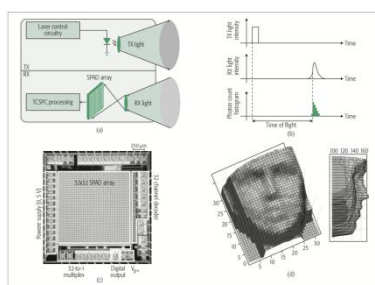


图 4. 脉冲调制 LiDAR 原理及应用

如图 4 所示，脉冲调制型 LiDAR 通过测量脉冲光到目标的往返时间来计算目标的距离。虽然脉冲调制型 LiDAR 是以调制方式来命名，但是它同样影响了接收机的设计，单光子雪崩检测器 (SPADs) 的采用就是为了改善脉冲调制 LiDAR 的灵敏度和增强探测距离。(a) 提供了一幅简明的脉冲调制 LiDAR 原理架构；(b) 说明了 LiDAR 工作的时序图；(c) 是芯片的显微图；(d) 是使用 LiDAR 构建的人脸 3D 图像。

2. 调幅连续波 LiDAR

类似脉冲调制 LiDAR，调幅连续波 LiDAR 基于调制光的强度，不过调制的波不再包含尖锐的脉冲，技术的实现上有一定成本优势。调幅连续波 LiDAR 通过改变激光二极管中的极电流来调整发射光强度，从而实现调制。图 5 中展示了一种像素级图像获取设计的基本电路和时序图，并展示了其 3D 图像的效果。

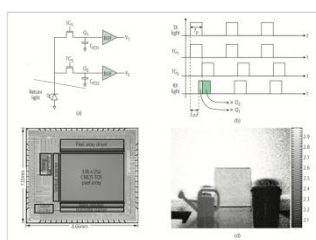


图 5. 调幅连续波 LiDAR 原理及应用

3. 调频连续波 LiDAR

调频连续波 LiDAR 从根本上不同于脉冲调制 LiDAR 和调幅连续波 LiDAR，调频连续波 LiDAR 依靠光波特性和对光的频率进行调制，在接收端采用相干检测方案，因此拥有大的频率带宽来提升激光雷达的性能。图 6 中展示了基本的调频连续波 LiDAR 的原理架构和调制方法，光频被针对时间轴进行线性调制，然后从发射机发出，返回光中包含了相位差，延迟，多普勒频移等信息，从而就可以得到需求的测量距离，速度等。详细的内容可参考文献[2]。

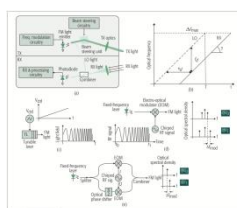


图 6. 调频连续波 LiDAR 原理及应用

4. 三种类型激光雷达的对比

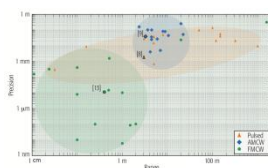


图 7. 1990 年以来大量学术及工业界激光雷达在精度和使用范围上的对比

从图 7 中可以看到三种激光雷达的测距精度及探测距离和使用范围。脉冲调制 LiDAR 主要用于中长距范围，精度在 1 米以内；调幅连续波 LiDAR 则主要用于中距范围，精度和脉冲调制 LiDAR 差不多；调频连续波 LiDAR 则主要用于近距离测量，精度要高于其他两种 LiDAR，在 1 毫米以内。从对比结果可知，用于无人驾驶系统的激光雷达一般会采用脉冲调制方式进行设计。

四、不利天气条件下的性能验证

无人驾驶车辆不仅需要天气晴朗的白天行驶，同样需要在具有挑战的天气条件下行驶。文献 [3] 中测试了两种不同的激光雷达（Ibeo Lux 和 Velodyne PUCK）在雨雾环境下的性能状态，结果比较失望，激光雷达的性能受到了不利天气极大的影响，在测试中，激光雷达对目标的检测性能出现了约 50% 的下降。文献中还采用了一台大陆公司的毫米波雷达作为参考对比，其测试结果如下表所示：

Weather type	Sensor	Reflector 2m	Reflector 5m	B/W reflector 6m	Reflector 8m	Pedestrian 12m	Traffic sign 20m
scale: 0=not visible, 1=on/off visible, 2=50% points, 3=70% points, 4 = 90-100% points							
Reference	Velodyne/LiDAR	0	0	4	4	3	1
	Ibeo/LiDAR	4	4	4	4	4	4
	Continental/Radar	4	4	0	4	0	4
Rain: 33mm/h	Velodyne/LiDAR	0	0	4	0	3	1
	Ibeo/LiDAR	0	4	4	4	4	0
	Continental/Radar	4	4	0	4	0	4
Rain: 55mm/h	Velodyne/LiDAR	1	0	4	0	3	2
	Ibeo/LiDAR	0	4	4	3	3	0
	Continental/Radar	4	4	0	4	0	4
Fog, visibility 40 m	Velodyne/LiDAR	0	0	3	0	1	0
	Ibeo/LiDAR	0	2	4	2	1	0
	Continental/Radar	4	4	0	4	0	4
Fog, visibility 15 m	Velodyne/LiDAR	0	0	3	0	0	1
	Ibeo/LiDAR	0	0	2	2	0	0
	Continental/Radar	4	4	0	4	0	4

从表中可以看到，毫米波雷达几乎能适应全部雨雾天气，性能不受影响，但是激光雷达出现了较大的问题。

五、结束语

激光雷达只是用于为无人驾驶系统提供物理环境数据的众多传感器之一，但是生成的数据是最容易理解的，并且它也将变得更便宜。Velodyne 销售和市场总监 Wolfgang Juchmann 称，激光雷达的成本在过去 7 年里下降了 10 倍。但是激光雷达在自动驾驶中也存在短板，从文中可以得知主要有以下两点：其一，激光雷达在雨雪雾等极端天气下性能较差；其二，激光雷达采集的数据量过大，对接收及后续处理硬件要求高。

针对无人驾驶系统的需求，我们要充分发挥激光雷达的优势的同时，也要尽量补偿它的弱项，那么该如何来解决呢？目前最主要的方案，是选择搭配毫米波雷达，毫米波雷达作为自动驾驶系统不可或缺的核心传感器类型，毫米波雷达从上世纪起就已在高档汽车中使用，技术相对成熟。毫米波的波长介于厘米波和光波之间，因此毫米波兼有微波制导和光电制导的优点，且其引导头具有体积小、质量轻和空间分辨率高的特点。此外，毫米波导引头穿透雾、烟、灰尘的能力强，相比于激光雷达是一大优势。可见未来的无人驾驶系统必然回事多感知设备融合的系统。

参考文献：

- [1] Evan Ackerman , Lidar That Will Make Self-Driving Cars Affordable, IEEE Spectrum, Vol. 53, Issue 10, 2016
- [2] Behnam Behroozpour, et al. , Lidar System Architectures and Circuits, IEEE Communications Magazine, Oct. 2017
- [3] M. Kutilla, et al. , Automotive LiDAR performance verification in fog and rain, 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC) Maui, Hawaii, USA, November 4-7, 2018

作者简介：叶凌峡，重庆大学硕士，目前就职于驭势（上海）汽车科技有限公司，自动驾驶技术部总监，研究方向：高速乘用车自动驾驶技术，多传感器融合技术，基于机器学习的感知技术等。

（本文原载：微信公众号：临菲信息技术港）

