

ToF 传感器介绍

王澳 917103860529*

2021 年 1 月 21 日

1 ToF 简介

1.1 定义

维基百科 时间飞行相机 (TOF 相机) 是一个范围成像, 其使用摄像系统时间飞行技术的照相机和用于图像的每个点对象之间的决心的距离, 通过测量人工的往返时间由激光或 LED 提供的光信号。基于激光的飞行时间照相机是更广泛的无扫描器 LIDAR 类别的一部分, 在该类别中, 整个场景是由每个激光脉冲捕获的, 而不是像在扫描 LIDAR 系统中那样逐点地捕获激光。民用飞行时间相机产品在 2000 年左右开始出现, [2] 因为半导体工艺使这种器件的生产速度足够快。该系统覆盖范围从几厘米到几公里。的距离分辨率是大约 1 厘米。与标准 2D 摄像机相比, 飞行时间摄像机的空间分辨率通常较低, 截至 2011 年, 大多数商用设备的像素分辨率为 320×240 像素或更小。与在其他用于捕获 3D 图像的 3D 激光扫描方法中, TOF 相机每秒可提供多达 160 次操作, 因此操作速度更快。

应用的广泛性

1.2 ToF 技术和结构光技术的差别

结构光 (Structured Light), 指通过红外激光器, 将具有一定结构特征的光线投射到被拍摄物体上, 再由专门的红外摄像头进行采集反射的结构光图案, 根据三角测量原理进行深度信息的计算。

iPhoneX 上的 Truedepth 相机, 用的是以色列 PrimeSense 公司的 Light Coding 技术。这种结构光方案, 通过投射人眼不可见的伪随机散斑红外光点到物体上, 每个伪随机散斑光点和它周围一定范围内的点集在空间分布中的每个位置都是唯一的, 并将预先进行了存储。

这些散斑投影在被观察物体上的大小和形状根据物体和相机的距离和方向而不同, 由此计算深度信息。这种方案和 ToF 相比计算量少功耗低, 在近距离范围内精度更高, 所以在人脸识别, 和手势识别极具优势。说回

*E-mail:877586493@qq.com



图 1: 3D 结构光和 ToF 的区别

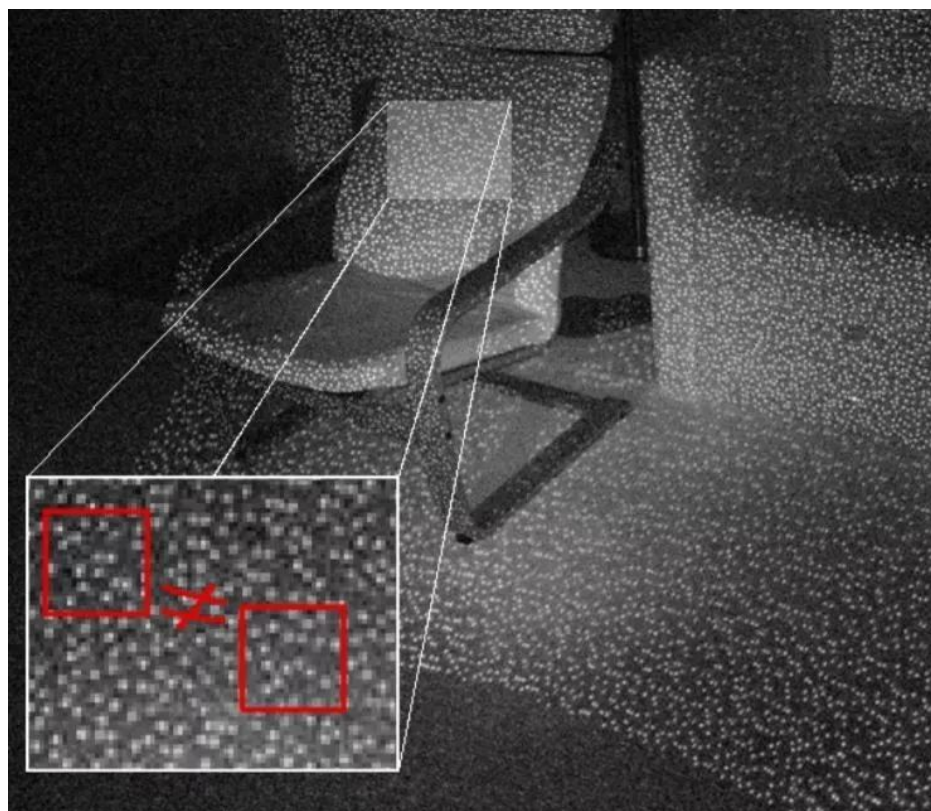


图 2: 3D 结构光点阵投影

ToF 技术。相较之下，ToF 设备要求发光器件与接收器件间尽可能接近，越接近，由于发射-接收路径不同所产生的误差就越小。因此，ToF 技术更利于设备的小型化，对于手机或是 AR 产品实现轻便紧凑的外形非常重要。

测量距离方面，ToF 也具备一定优势。由于 ToF 接收传感器所接收的每个像素点对应一个物体表面的实际位置，只要有反射光回来，就可以通过解相位的方法获取到深度。其测量精度不会随着测量距离的增大而降低，其测量误差在整个测量范围内基本上是固定的。而且由于太阳光并未经过调制，可以简单认为它对相位是没有影响的，所以 ToF 对于室外强光环境也有一定的鲁棒性。

分辨率方面，采用 ToF 技术的深度相机分辨率目前还偏低，一般也就 320*240 的水准，功耗上也略微不尽人意。开发周期和解决方案方面，ToF 因基于它的解决方案出现较晚，开发群体较为薄弱。而结构光技术，一方面 PrimeSense (Kinect 1) 当年的如日中天留下了无数成型的解决方案，有 Intel 支持的 RealSense 又有着非常强大的 SDK，这些都使得基于结构光的开发周期可以比较短。

综合来看，对于 AR 眼镜，无论是设备小型化需要还是实现 SLAM 需要的实时三维建图，ToF 都有很大的优势。目前的一些“旗舰”产品 HoloLens、Magic Leap One 的深度摄像头用的也都是 ToF 技术。

2 ToF 工作原理

2.1 ToF 相机组成单元

1. 照射单元

照射单元需要对光源进行脉冲调制之后再进行发射，调制的光脉冲频率可以高达 100MHz。因此，在图像拍摄过程中，光源会打开和关闭几千次。各个光脉冲只有几纳秒的时长。相机的曝光时间参数决定了每次成像的脉冲数。

要实现精确测量，必须精确地控制光脉冲，使其具有完全相同的持续时间、上升时间和下降时间。因为即使很小的只是一纳秒的偏差即可产生高达 15cm 的距离测量误差。

如此高的调制频率和精度只有采用精良的 LED 或激光二极管才能实现。

一般照射光源都是采用人眼不可见的红外光源。

2. 光学透镜

用于汇聚反射光线，在光学传感器上成像。不过与普通光学镜头不同的是这里需要加一个带通滤光片来保证只有与照明光源波长相同的光才能进入。这样做的目的是抑制非相干光源减少噪声，同时防止感光传感器因外部光线干扰而过度曝光。

3. 成像传感器

TOF 的相机的核心。该传感器结构与普通图像传感器类似，但比图像传感器更复杂，它包含 2 个或者更多快门，用来在不同时间采样反射光线。因此，TOF 芯片像素比一般图像传感器像素尺寸要大得多，一般 100um 左右。

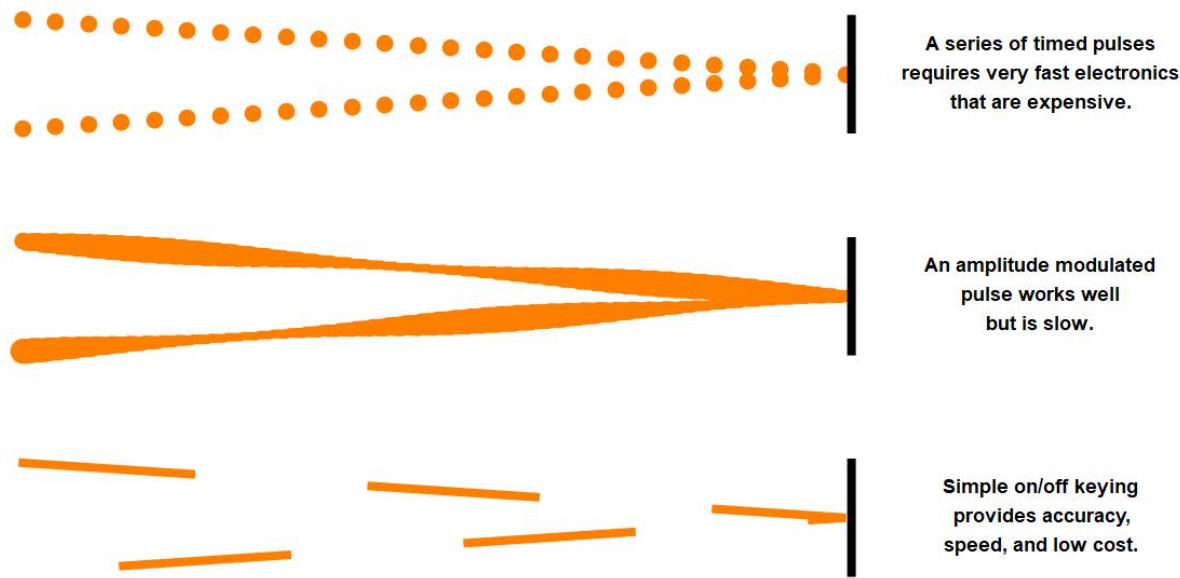


图 3: ” 工作原理”

4. 控制单元

相机的电子控制单元触发的光脉冲序列与芯片电子快门的开/闭精确同步。它对传感器电荷执行读出和转换，并将它们引导至分析单元和数据接口。

5. 计算单元

距离。为了得到更好的效果，通常会进行数据校准。

2.2 工作原理

2.2.1 旅行时间原理

在图像的顶部，您可以看到第一种方法，该方法是发送脉冲并测量时间间隔，直到它们在反射后返回为止。图像的中间显示了第二种方法，其中您可以调制光源的振幅并记录反射波的相移。图像的底部代表第三种方法，该方法传输占空比为 50% 的方波，并记录在特定间隔内到达的返回光量。

2.2.2 通过调幅波的相移确定距离

通过相移和相角的作用，可以准确确定反射物体与传感器/接受器之间的距离。如何快速测量正弦波的相

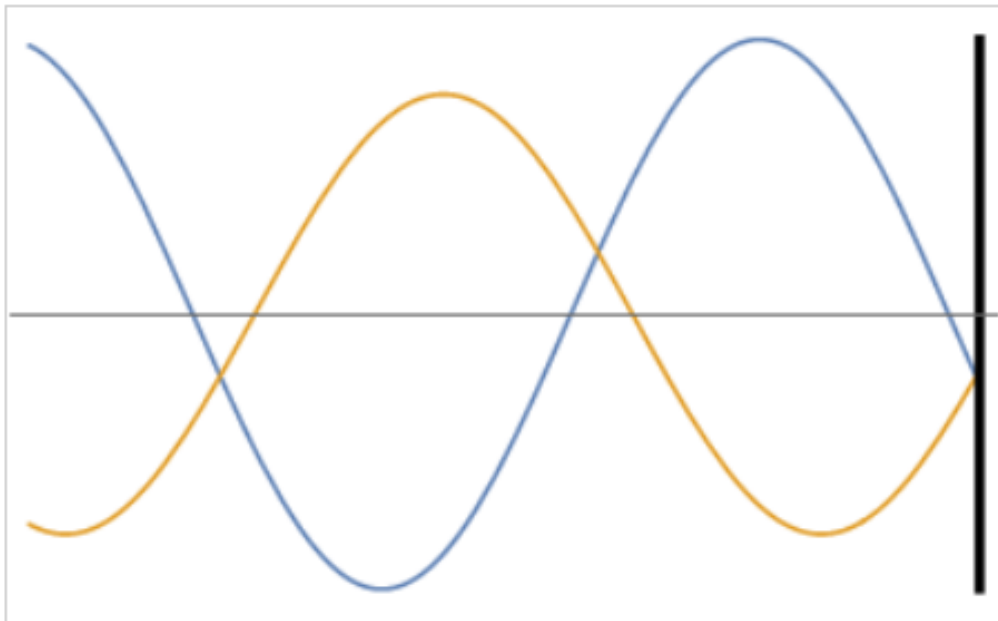


图 4: 相移

位角？这涉及在四个等距的点（即 90° 或 $1/4\lambda$ 的间隔）处测量接收信号的幅度

$$\varphi = \arctan\left(\frac{A_1 - A_3}{A_2 - A_4}\right)$$

2.2.3 确定给定距离的工作频率

$$d = \frac{C * \varphi}{4\pi F}$$

其中 C 是光速， φ 为相角以弧度为单位， f 为调制频率

2.2.4 通过带电电容器的差分电压测量确定相移

下一个测量情况涉及频闪光源和每个像素有两个电容器的 CMOS 成像传感器。

时钟源产生占空比为 50% 的方波，并且该方波控制明亮的选通光源以及与每个像素内部的电荷存储电容器的连接。

下图显示了这种系统的示例：光线离开光源，反射离开物体，然后撞击像素，在此处像素将作为电荷被记录在上方的电容器 C_A 或 C_B 中。电容器使用相同的时钟源以与照明源相同的频率交替连接至像素。

这种巧妙的安排意味着电容器中的差分电荷直接与相位偏移有关。而相位则取决于波长以及到目标和目标之间的距离。

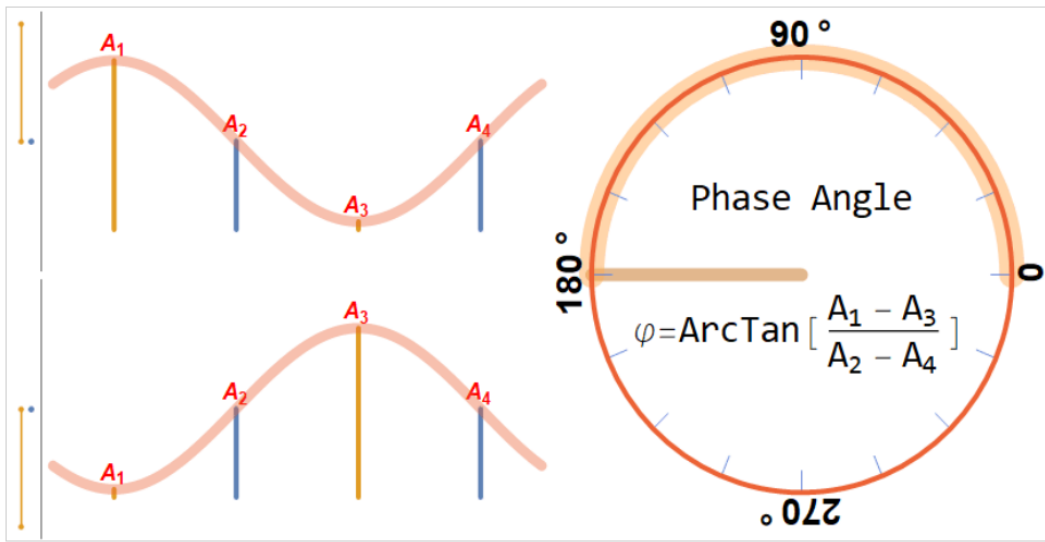


图 5: 原理插图

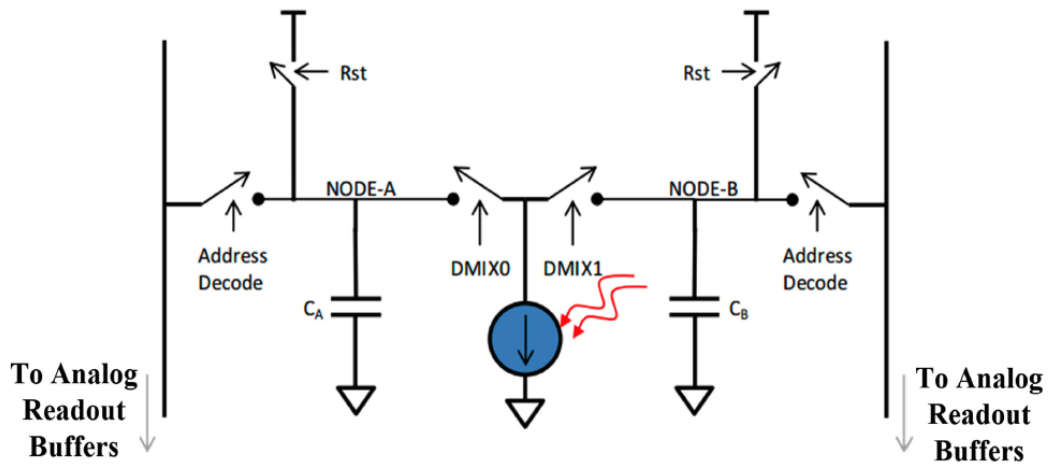


图 6: “光子混合器设备固态阵列 LiDARS 的快速校准方法”中的图像显示了一个 CMOS 像素，其中两个电荷存储电容器交替连接以记录入射光。

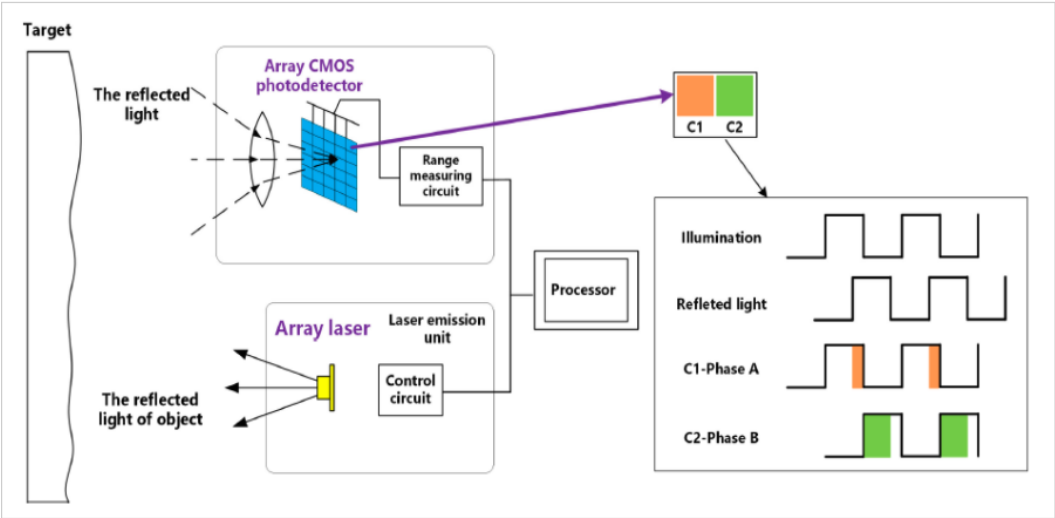


图 7: “光子混合器设备固态阵列 LiDARS 的快速校准方法”



图 8: 深度数据

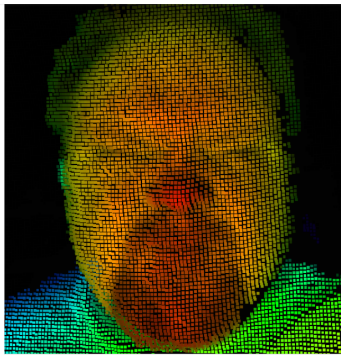


图 9: ToF 镜头产生的图像

可以照亮被摄对象充电容器所需的次数。只要距离恒定，充电比例将保持不变

3 ToF 镜头的广泛应用

- 消费者

从 AR（增强现实）和 VR（虚拟现实）耳机到具有高级照相和安全功能的智能手机，ToF 技术预计将成为下一代消费电子产品的重要组成部分。

在 AR / VR 头戴式耳机中，ToF 系统获取的深度信息从字面上为用户提供了现实的附加维度。在智能手机中，该技术将使相机能够开发出具有 DSLR 品质的摄影效果，实现更逼真的 AR / VR 功能，并提供防止不必要的外部访问的额外保护。

- 工业 4.0

智能传感器，特别是深度传感器的使用在制造以及运输和物流中越来越普遍。

从用于质量检查的工业机器视觉到用于资产管理的体积检测，再到用于自动制造的导航，制造业正在采用这些传感技术，并朝着针对恶劣工业环境设计的高分辨率系统发展。

- 汽车行业

在下一代汽车中，机舱中的 ToF 系统将能够监视驾驶员及其乘客的位置和状态，并在驾驶员丧失能力的情况下接管控制权并将汽车调至安全状态

据说，通过 ToF 技术实现的手势控制系统是汽车的下一代用户界面，使驾驶员可以通过简单的手势来接听打来的电话，更改音频输入源，甚至调节气候控制。手或手指。

- 卫生保健

鉴于最近的大流行，用于远程距离和深度测量的飞行时间技术在医疗保健中变得越来越重要。在各种环境中，通过手势进行的非接触式操作控制，婴儿呼吸的远程监视以及社交距离的监视只是可以使用 ADI 飞行时间技术的少数应用中的一些。

- 安全与监视

与传统的 2D 图像传感技术相比，ADI 的高分辨率深度传感技术具有明显的优势。高分辨率的深度使对人和物体的分类更加容易，并且置信度更高。从商业/零售进入/退出（用于安全和监视）到检测跌倒或伤害自己的人（用于医疗应用），这可以被用于许多应用用例中。

- 机器人技术

高分辨率 ToF 系统对于使自主机器人和机器人能够感知其环境并规划其路径以最佳，可靠和安全地完成其任务至关重要。此外，3D 成像可以在人类和协作机器人共同工作的应用中启用安全功能。

4 产业现状

2017 年，iPhoneX 的 Face ID 将结构光三维视觉的产业链整合起来，由于 TOF 的产业链与结构光比较一致，小型化的 TOF 三维视觉技术产业链也随之发展起来。TOF 三维视觉产业链中主要包括 TOF 传感器芯片厂商、模组厂商、算法厂商及 VCSEL、DOE 等元器件厂商。其中 VCSEL（Vertical Cavity Surface Emission Laser）译为垂直腔面发射激光器，简称面射型激光，是 TOF 技术方案所采用的光源。EDO（Diffraction Optical Element）就是衍射光学元件，用来使发出的光保持均匀，准确测距。这两者都是 TOF 三维视觉硬件的核心元器件。

TOF 技术对光学传感芯片要求高，而目前国外传感器芯片厂商在国内 TOF 产业链中占据着主导地位。国外芯片厂商通过模组厂商牵线搭桥与手机厂商签订单，成为目前国内 TOF 三维视觉方案在手机上的落地的主要模式。有业内人士称，近来正是因为索尼、三星、英飞凌等大厂在往 TOF 芯片砸钱，进而推动了模组厂商提高相关的产能。例如索尼就在今年初宣布加大 TOF 投入，夏季将实现 3D ToF 图像传感器的量产。据



图 10: 广泛的应用

了解，国内超过一半的手机 TOF 相机方案都是采用的索尼感光芯片。索尼 2015 年收购了长于 TOF 影像技术的 Softkinetic 公司，之后逐渐凭借手机摄像头市场已有的领先地位，在我国占据了远高于 TOF 鼻祖 pmd 的市场份额。除了索尼，ADI 是国内被选择最多的芯片商之一。据了解，其 TOF 的感光芯片技术比较成熟，比如 ADI 早就研发出 VGA（分辨率达到 640x480dpi）感光芯片，只是近年随着 3D 应用的兴起才又将其从“箱底”启用。

不过，目前 TOF 传感器芯片在国内也有炬佑智能、歌尔等企业做的比较好。比如，炬佑智能公司自研了 320x240dpi 等多种分辨率的 850nm 和 940nmToF 传感芯片，已为扫地机器人、VR/AR、手机等应用提供完整的脉冲 TOF 方案，但是其 VGA（分辨率达到 640x480dpi）感光芯片仍在研发之中。在 TOF 相机模组的封装与测评方面，舜宇光学、欧菲光、威豪等国内厂商都凭借各自的垂直领域优势占据着龙头地位。舜宇光学具有镜头这一垂直领域优势，同时还拥有众多元器件的子公司。欧菲光旗下的 VCSEL 供应商纵慧也进入了华为手机 TOF 方案供应链，欧菲光和豪威分别由于在滤光技术及手机摄像头模组上的渠道优势在国内 TOF 市场中占据一定份额。

国内TOF三维视觉方案产业链中的部分玩家 | 智东西统计

品牌	主要产品	品牌	主要产品	品牌	主要产品
三星	芯片	立普思	模组	光迅科技	VCSEL
德州仪器	芯片	北京洛伦兹	模组	三安光电	VCSEL
松下	芯片	歌尔	模组	江苏华芯	VCSEL
微软	芯片	瓊锒瑞思 (ESPROS)	模组	台湾稳懋	VCSEL
高通	芯片	Hynix	模组	鲲游光电	DOE/Diffuser
索尼	芯片	格科微	模组	Viavi	DOE/Diffuser
意法半导体	芯片	思比科	模组	驭光科技	DOE/Diffuser
Pmd	芯片	奇景	模组	艾迈斯半导体 (Ams)	方案
亚德诺 (ADI)	芯片	Teledyne e2v	模组	英飞凌	方案
炬佑智能	芯片	奥比中光	模组	STM	方案
英特尔	芯片	丘钛科技	模组	LG	方案
舜宇光学	模组	Finsar	VCSEL	豪威	方案
欧菲光	模组	Lumentum	VCSEL	小鸟看看	方案
深圳海伯森	模组	纵慧	VCSEL	旷视	算法
立景创新	模组	博通 (Broadcom)	VCSEL



图 11: “产业现状”