

一文詳解深度相機之TOF成像

新機器視覺 今天

以下文章來源於CV研習社，作者愛做菜的煉丹師



CV研習社

一個專注於計算機視覺方向的公眾號。包括計算機視覺、圖像處理、點雲處理、機器學習、深度學習、C/C++、Python、製作美食等。



新機器視覺

最前沿的機器視覺與計算機視覺技術
206篇原創內容



公眾號

本文來源於CV研習社，作者愛做菜的煉丹師。文章僅作為學術交流，已獲得授權。

文章導讀

本文通過介紹TOF相機的成像過程，帶大家了解TOF相機中脈衝法和連續波調製這兩種技術原理，並詳細的分析每種方法的實現細節和各自優缺點，對連續波調製方法深入其相位差原理，單頻相位測距的限制及如何解決模糊距離等問題。

0 前情回顧

小編過了一個鹹魚般的五一，躺屍在家被五大過程組，十大知識體系折磨個半死，做題全憑感覺。

記得放假前一天和朋友吃飯，被問到TOF的原理是什麼？小編弱弱的回答發射脈衝波打到物體返回後統計光的運行時間從而計算距離。被大佬用質疑的眼神瞄了一下，然後啪嗒啪嗒給我解釋了一番連續調製波的原理。

小編總感覺哪裡有些問題，做了這麼久激光雷達感知算法，那些Velodyne-16，Horizon確實是基於脈衝波的技術原理呀，不過再往下問具體傳感器內部是怎麼工作的，小編也是一知半解。

下面我們來好好補一補有關TOF相機的基本知識，劇透一下原來TOF相機既可以基於脈衝波的光學快門方法又可以基於連續調製波的方法。

1 什麼是TOF相機

在双目成像的文章中，我们说过双目相机是一种被动接收自然光的传感器，通过接收自然光利用三角测距的方式描述三维环境。本文的TOF相机则是一种主动发射红外光的传感器，通过发射光脉冲并接收打到物体反射回来的脉冲信号，最后计算光脉冲的飞行时间得到目标物体的距离。

说到这里我们可能第一反应是这不就是激光雷达的工作原理嘛！确实很相似，但是机械式或混合固态激光雷达采用逐点扫描的方式感知环境信息，而TOF相机以面阵的方式得到深度图。

小编最早接触的TOF相机就是微软的Kinect 2.0。Kinect系列很有意思，第一代基于结构光原理做的深度相机，第二代基于TOF原理做的深度相机，当时小编以为第三代是不是要用双目原理做深度相机了，誓把深度成像的技术都玩个遍的时候它停产了。如下图所示：上面是Kinect 1.0，下面是Kinect 2.0（长得太丑）



TOF相机输出的深度图在2D空间表示为灰度图像，每个像素点对应一个距离值，其中强度越亮表示距离越近，如果光源被吸收或者未收到反射信号则呈现黑色。如下图所示：



在深度图的基础上，配合相机的外参数据可以转换三维点云。假如你又同时有一颗RGB相机，能够将物体表面纹理映射到点云体素上，那么一张栩栩如生的三维渲染模型就出来了，如下如所示：



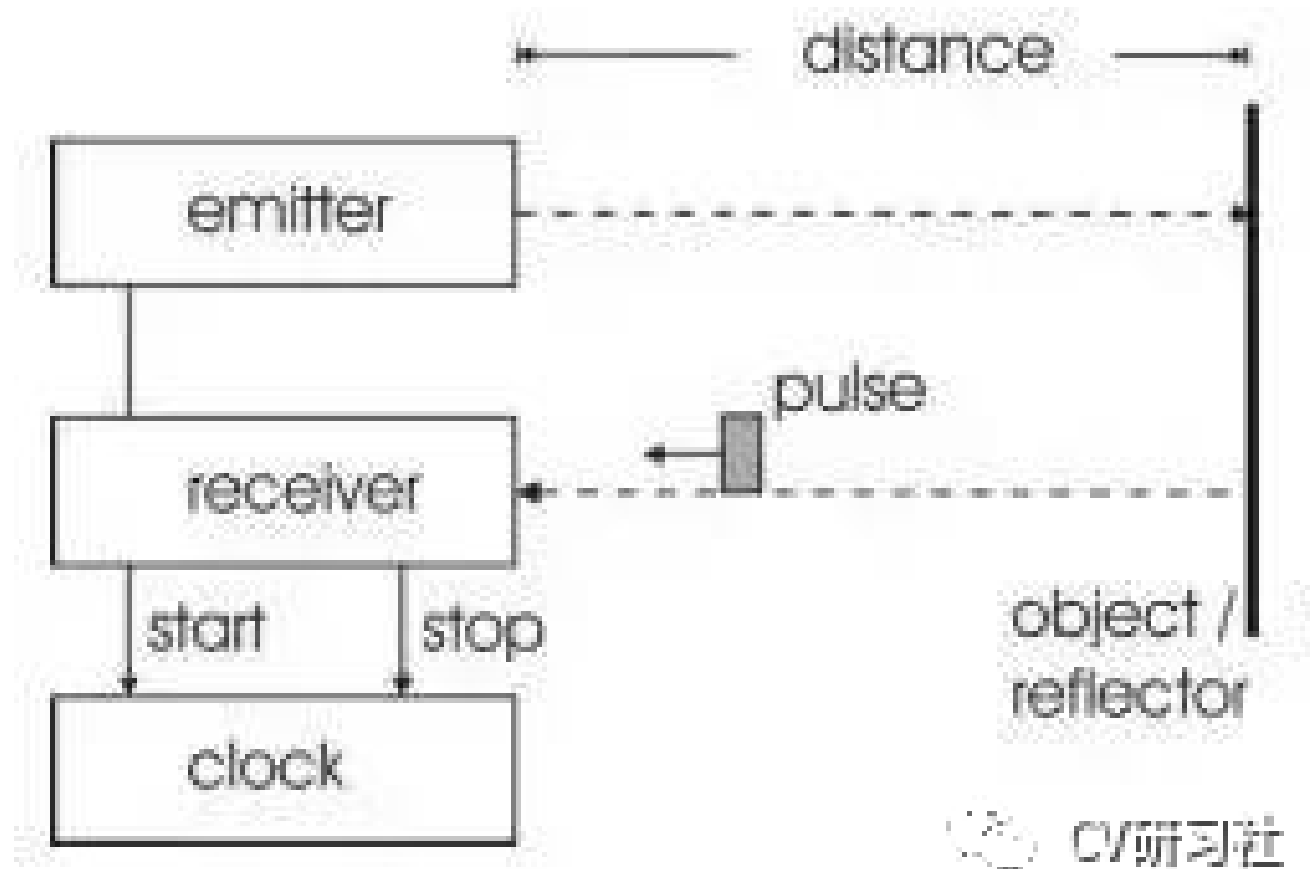
2 TOF相机的技术原理

发射模块和接收模块是TOF相机的核心部分，通过内部的数据处理计算出深度信息。至于采用什么技术计算深度信息，我们提到了两种方法：

基于脉冲法原理简单：类似于我们有一个计时器，按下开始键发射一束脉冲波出去，当遇到障碍物后返回，当被接收器收到后按下停止键。根据计时器记录的时间和光的速度可以计算出相机到物体的距离。

公式如： $\text{Distance} = 1/2 \times c \times \Delta t$

其中c表示光在空气中传播的速度， Δt 表示脉冲信号从相机到目标往返的时间。

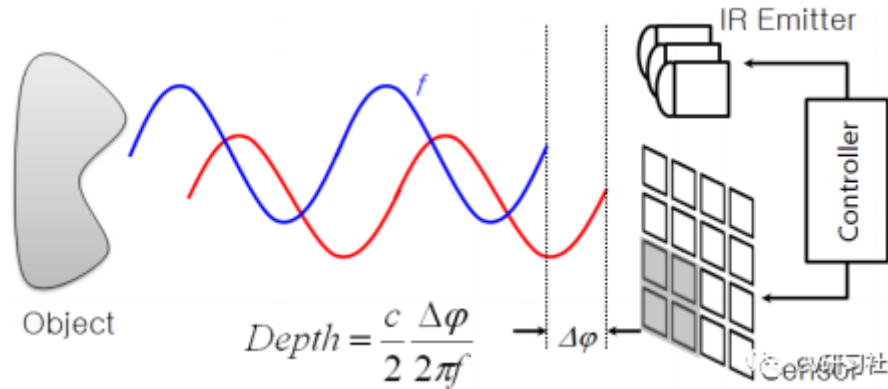


通过一个高频率的时钟驱动计数器对收发脉冲之间的时间进行计数，使得计数时钟的周期必须远小于发送脉冲和接收脉冲之间的时间才能够保证足够的精度。但是如果要达到毫米级别的测量，对控制时钟，发射单元等电子元器件的精度都是一项挑战。这就是为什么无人驾驶中应用的激光雷达传感器常基于脉冲法，因为该方法比较适合中远距离的测量。

但是在机器人等应用中使用的TOF相机大多采用的是连续波调制的方法：使用调制光照射场景，并测量通过场景中的物体反射后返回光的相位延迟。得到相位延迟后，再使用正交采样技术测量间接得到距离。

公式如： $\text{Distance} = 1/2 \times c \times \phi \times T/2\pi$

其中 c 表示光在空气中传播的速度， T 表示调制周期， ϕ 表示发射和接收波形的相位差。



该方法比较适合中短距离的测量，精度往往可以达到毫米级。

通过对比上述两种方法的基本原理，我们不难发现：

脉冲法测量方式简单，占空比窄检测距离远；但是它易受环境光和元器件精度影响，测量精度相对较低。

相位差可以消除测量器件带来的固定偏差但是采样次数多，导致测量耗时帧率低。

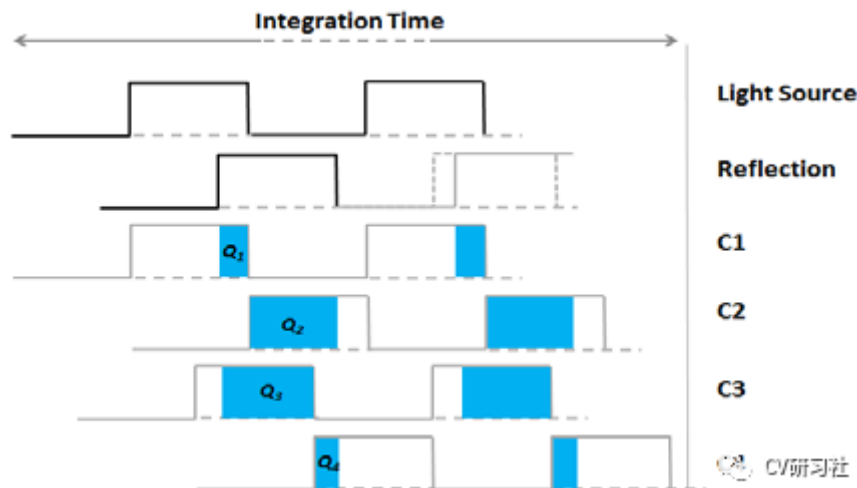
3 如何将相位偏移转换成距离？

仔细看两种方法的距离求解公式，其实很相似，最终都是距离 = 速度 × 时间。唯一区别在于时间是怎么得到的？

脉冲法求时间比较直接，这里没有什么好解释的，就是到达时间-发射时间即可。

相位差也是可以转换成时间的，通常某一定频率 f 的相位差时间 = 相位差的度数 / $2\pi f$ 。这里就有小伙伴会问相位差的度数是怎么求的？

在连续波调制过程中通常将连续波近似为正弦波划分成4个窗口进行采样，并且采样时间间隔相同。如下图所示：



推导过程就不贴了，最终的结果为：

$$\phi = \arctan((Q3-Q4) / (Q1-Q2))$$

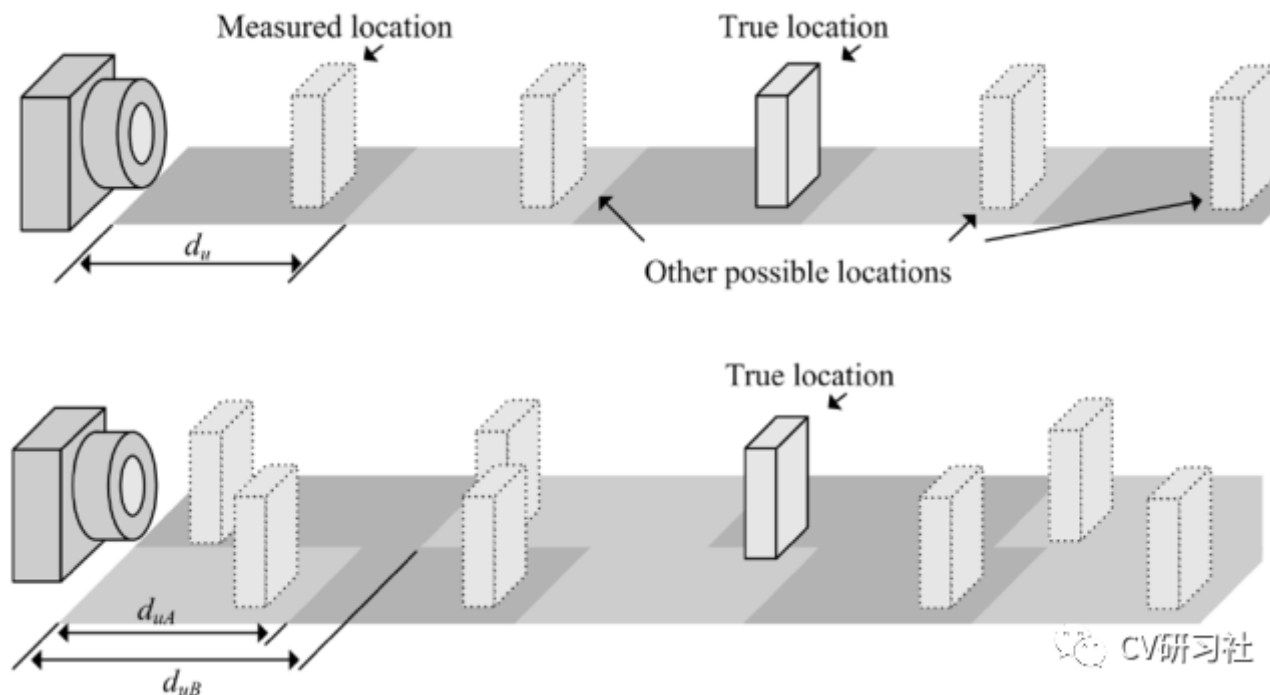
相位差求取中的 $(Q3-Q4)$ 和 $(Q1-Q2)$ 相对于脉冲调试法消除了由于测量器件或者环境光引起的固定偏差。并且方程中求商的过程减少了来自距离测量的恒定增益影响，比如系统放大和衰减或者反射响度等问题。

4 重复周期下的相移如何计算距离？

在信号与系统中提到过相位与延时的关系，其中 2π 为一个符号周期时间，如果采用相位差法测距，怎么判断目标位于第几个周期呢？

事实上采用单一频率进行相位测距，确实无法分辨超过一个周期的距离值。简单粗暴一点的做法就是根据最大测量距离来调节频率，不过频率越高意味着距离分辨率越低，从而测量精度越低。所以在单一频率下会出现距离和精度无法同时满足的情况。

为解决单频造成的模糊距离问题，可以采用多频率技术来延长测量距离同时不降低调制频率。多频率技术的工作原理就是将一个或多个调制频率添加到混合。每个调制频率将有不同的模糊距离，但真正的位置是在不同的频率一致。当两个调制一致的频率，称为拍频，通常是较低的，并对应一个更长的模糊距离。如下图所示：



此解释来源于2014年的一篇文章：Time-of-Flight Camera – An Introduction

有兴趣的小伙伴可以私我要文章（还有一篇更详细的原理解释：TOF Camera Principles Methods and Applications）

5 TOF相机的特性对比

市场上比较常见的视觉传感器包括单目相机、双目相机、结构光相机、全景相机、红外相机、TOF相机等。通常在谈到深度相机时会把TOF和结构光、双目这三种技术拿出来进行对比。

TOF技术相比结构光实现难度较低，发射信号遇到目标返回即可，不像结构光需要先打出激光散斑编码，然后再去提取编码特征。而且TOF受环境影响较小，不存在结构光激光散斑在户外会被淹没的问题，具有较好的抗干扰能力。但是TOF相机的分辨率低，所以通常只适用于一些近距离的避障导航功能。

TOF技術相比雙目成像技術，因為其主動發射光源，輸出的深度數據是通過解相位計算得到，所以很大程度上不受陰影的影響，在昏暗場景依然有良好的效果。而且TOF生成深度圖沒有復雜的特徵配準、三角測量等算法加持，所以不依賴特徵匹配的好壞，也就不受物體表面紋理，環境光照射角度等影響。在生成深度圖的實時性上自然優於雙目經過一大堆複雜計算的成像過程。

■ ■ ■ End ■ ■ ■

聲明：部分內容來源於網絡，僅供讀者學術交流之目的，文章版權歸原作者所有。如有不妥，請聯繫刪除。

走进新机器视觉 · 拥抱机器视觉新时代

新机器视觉 —— 机器视觉领域服务平台
媒体论坛/智库咨询/投资孵化/技术服务

商务合作：
投稿咨询：
产品采购：



(微信号)

长按扫描右侧二维码关注“新机器视觉”公众号



喜歡此內容的人還喜歡

突發，馬來西亞“封國”！

研訊社

