

## 高分辨率ToF (Time-of-Flight) 相机

光的行进速度是每秒300,000,000 m。通过测量一束光在两个点之间行进所花费的时间，我们可以计算它们之间的距离。这一原理就是ToF (Time-of-Flight) 相机所使用的核心测量技术。ToF相机的各像素不只返回亮度值，还有有关光反射表面与相机之间距离的信息，精确到厘米。本白皮书探讨了Basler ToF相机的基础概念，特别是其利用光测量距离的工作方式。

### 目录

1. 设置	1
2. ToF (Time-of-Flight) 相机的功能原理	2
3. 精度	3
4. 影响因素	3
4.1 多重反射	3
4.2 散射光	3
4.3 工作区	3
4.4 立体角	3
4.5 环境光	3
4.6 反射和透明度强度	3
4.7 温度	4
4.8 相机配置	4
5. 总结	4

Basler ToF (Time-of-Flight) 相机的分辨率为640×480像素，帧速率为20 fps，每秒可进行610万次距离测量。同时我们也在准备使用更高的分辨率。

在讨论该测量技术背后的原理、它所提供的精确度及相关影响因素之前，我们必须先说说配置。

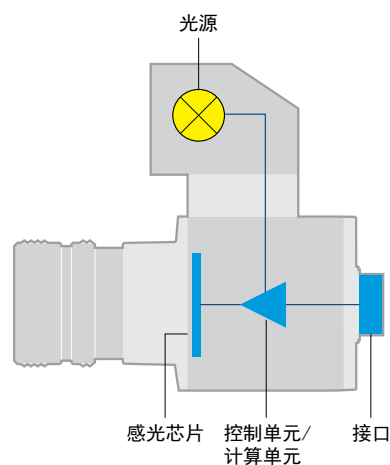


图1: ToF (Time-of-Flight) 相机的组成部分

### 1. 设置

此处所说的ToF (Time-of-Flight) 相机由以下几部分组成（参见图1）：

- 光源
- 光学配件
- 感光芯片
- 控制单元
- 计算单元
- 接口

让我们对每个组件一探究竟。

#### 光源

该光源照射至被测表面，并与镜头光圈配合。它负责为哪怕距离较远且反射度低的表面提供足够的照明，由此缩短曝光时间，提高帧速率。光源也是测量过程中一个重要的组成部分，并由ToF相机的电子元件使用复杂的技术加以控制。

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。必须分别为每台相机校准亮度信息，因为即使很小的只是一纳秒的偏差即可产生高达30 cm的距离测量误差。

LED和激光二极管等精良的设备可以实现这类精确的脉冲特性，特别适合作为光源承担这项艰巨的任务。

即使在发生故障的情况下，在相机范围内也必须确保眼睛的安全。这是与来自经认证的光辐射保护组织的专家相配合，通过验证确定的。

近红外范围内的光不是可见光，不会打扰我们。然而，基本上整个光谱的任何部分都会参与测量。

#### 光学配件

镜头会再现从表面反射到芯片的光脉冲。

会根据此表面上的空间坐标对每个相机进行几何校准。一旦校准过程已启动，则不应修改焦距、焦点和光圈。

镜头后面的光学带通滤波器只允许相机自身光源所用波长通过，这防止芯片因外部光线干扰而过度曝光。

## 感光芯片

所有相机都采用了松下特别为ToF (Time-of-Flight) 测量开发的最新一代CCD成像芯片。

芯片上的电子快门与众多光脉冲完全同步运行，直到入射光在芯片上产生了足够的电荷。

电荷完成积聚之后，经由一个12位模拟/数字转换器读出，并传送到计算单元。

光源和芯片的读出速度通常决定了此过程中的帧速率。

如果ToF测量中使用了彩色芯片，则只可以使用四个像素中的一个；其他三个像素必须用于生成彩色图像。尽管该芯片可在ToF测量和拍摄彩色图像之间快速切换，但不能同时执行这两项任务。

## 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。它对芯片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。要实现这一点，需要一个强大的FPGA。

## 计算单元

使用一个单一读出通道的数据，计算单元可以为所记录对象计算精确的强度分布和深度图以及空间坐标（点云）。

强度分布以16位整数表示每个像素的亮度。此处相机内置光源的波长至关重要。由于近红外光不是可见光，红外光对所撞击对象的反射特性不是我们可以直接体验的。因为它们与可见光有很大差别，因此，强度分布可能显著偏离我们的感知。

深度图记录光反射表面和相机之间的距离，仍然是为每个像素提供一个16位整数。严格地说，这些整数代表光脉冲从发射到返回芯片的行进时间，这一时间会受到光沿这条路径行进时进行的所有绕道和经历的所有捷径的影响。换句话说：结果中有误差也不是不可能的。

深度图还可以输出为彩色图像，以8位数字表示红、绿和蓝。这主要用于辅助提高直观性。红色面在近处，蓝色面在远处。

无论是黑白还是多色，都是使用“偏移”和“深度”参数配置深度图上的颜色分类。

置信图包含深度图的误差级别：每个像素一个16位整数。数字越大，对该像素的测量结果的精度越低。例如，如果表面非常暗，或像素已发生过度曝光，就会出现这种情况。置信图给用户提供了机会，使他们能根据深度图中测量值的可靠性调整自己的应用。

点云是由每个像素的3个32位浮点数组成。这些是反射面在笛卡尔坐标系中的空间坐标。单位显示为mm。为了精确计算这些值，各台相机都在工厂进行了几何校准。

如果像素的测量结果不可靠，将在置信图中显示很高的值，且距离输出为Null或NaN（非数字）。此置信度阈值可以被修改。

## 接口

该相机拥有千兆网(GigE)接口，这意味着它可以直接通过价格“平易近人”的标准线材与任何主机进行连接，甚至能跨过更长的距离。

GigE Vision和GenICam通信协议是经过实践检验的独立于制造商的工业相机标准。

## 2. ToF (Time-of-Flight) 相机的功能原理

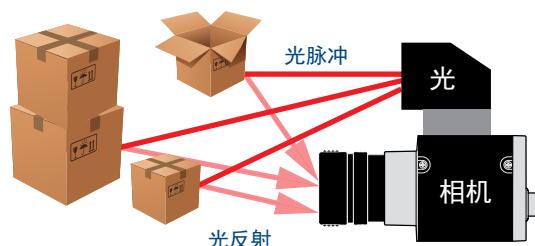


图2: ToF (Time-of-Flight) 相机的功能原理

对于脉冲式ToF相机，光脉冲和电子快门时序也有大量潜在的变量，每个都具有各自的优点和缺点。下面将详细介绍一个经过高度简化但基本正确的方法。

相机上的控制单元打开光源然后再关闭，形成一个光脉冲。在准确的同一时刻，控制单元打开和关闭芯片上的电子快门。由光脉冲以这种方式产生的电荷（我们称之为 $S_0$ ）存储在芯片上。

然后，控制单元第二次打开并关闭光源。这次快门打开时间较晚，即在光源被关闭的时间点打开。现在生成的电荷( $S_1$ )也被存储在芯片上（见图3）。

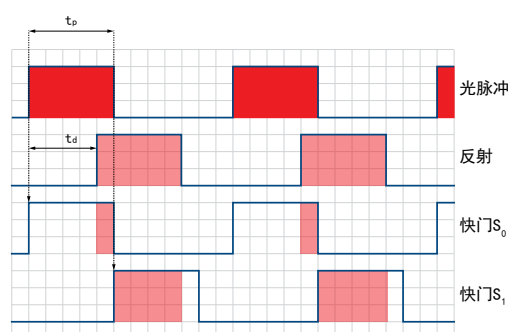


图3: 曝光时间

因为单个光脉冲的持续时间非常短，此过程会重复几千次，直到达到配置的曝光时间。芯片中的值会被读出。

曝光序列现在生成两个图像。在 $S_0$ 图像中，更近的表面看起来更亮一些。表面的位置越远，在快门开启的时间段反射回芯片的光线就越少。在 $S_1$ 测量中，情况恰恰相反：因为快门会在光线已经行进了一段时间后才打开，所以近处的表面是暗的。

实际距离可以根据这些强度的比值来确定。如果光的速度被定义为 $c$ ，而 $t_p$ 表示光脉冲的持续时间，除此之外， $S_0$ 表示较早的快门收集的电荷， $S_1$ 表示延迟的快门收集的电荷，那么对于距离 $d$ ，该比值是：

$$d = \frac{c}{2} \times t_p \times \frac{S_1}{S_0 + S_1}$$

最小的可测量距离是：在较早的快门期间 $S_0$ 中收集了所有的电荷，而在延迟的快门期间 $S_1$ 没有收集到电荷，即 $S_1 = 0$ 。然后，该公式会得出 $d=0$ 。

最大的可测量的距离是：在 $S_1$ 中收集了所有电荷，而在 $S_0$ 中根本没有收集到电荷。然后，该公式得出 $d = \frac{c}{2} \times t_p$ 。

这也是此方法的光脉冲宽度确定最大可测量距离的一个指标。例如，如果 $t_p$ 的总计至少有47 ns，则可测量7 m的距离。

### 3. 精度

绝对精度是所测量距离与实际距离之间的平均差。重复精度是该精度的标准差。

在特定条件下可以实现精确的测量，现在让我们来说明一下。

### 4. 影响因素

有几个因素可能影响ToF (Time-of-Flight) 相机的测量，并可能限制测量精度。其中包括：多重反射、散射光、环境光和温度。

#### 4.1 多重反射

距离测量要求光只反射一次。光线的多次反射会导致测量失真。房屋角落和凹陷形状（比如咖啡杯内侧）通常会因为光束多重反射产生误差。

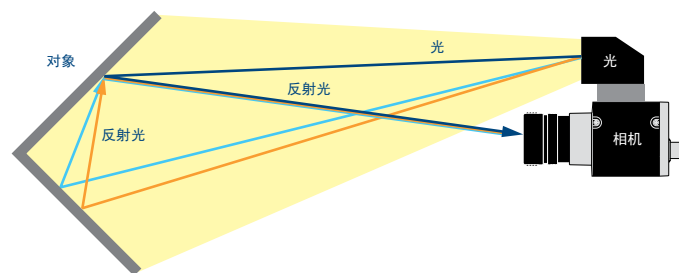


图4: 多重反射

镜子和反射面（抛光桌面）使光束偏转。设想一下光脉冲从光源返回相机可以经过多少路径。如果光线完全偏转，则没有反射强度进入相机，从而无法正确测量反射面的距离。反之，如果这束光通过镜面反射进入芯片，则会频繁发生过度曝光。

另一方面，如果在房间中，只有一堵墙符合明亮、平坦和漫反射的要求，而其他区域是空的黑色，这种情况比较理想。

#### 4.2 散射光

在镜头内或在镜头后面发生多余反射会出现散射光（见图5）。即使进行最精心设计的设置，也不能完全消除散射光。非常靠近光源的明亮表面会快速将过量光线散射到镜头中。

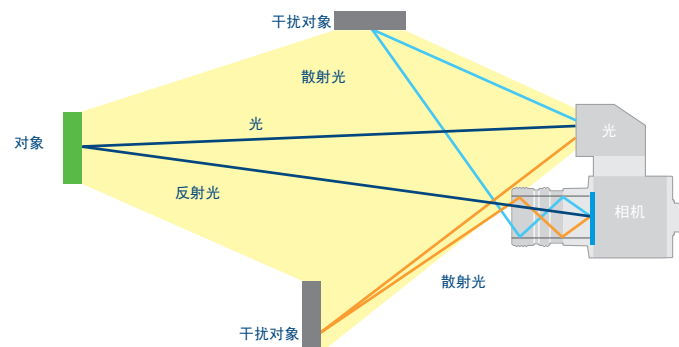


图5: 散射光

这种表面甚至不一定处于芯片的视场内，举例来说，如果相机直接放在桌面的中心，那么散射光会强烈干扰距离测量。

在强度图像中散射光会导致图像褪色，对比度较差。这种问题在摄影领域早已广为人知。解决方案是确保在相机正前方的空间中没有强烈反光的物体。

### 4.3 工作区

有四个因素限制了ToF相机的工作区：

- 所使用的测量方法，如光脉冲宽度。光脉冲和电子快门的每个时间安排被指定用于特定的距离范围。在此范围之外的表面不生成测量值或生成错误测量值。同样，此处即使表面可能照明较弱或处于焦点之外，但是对强度分布的影响较小。
- 相机的对比度范围（动态范围）：一方面，附近表面非常明亮，而距离较远的表面都非常暗。反射光的强度按照距离的平方而降低。目标是在这一亮度刻度的两端进行测量，这需要良好的对比度范围。
- 光源的强度：即使距离增加，光也必须足以照亮表面。否则噪声等级会过高，导致测量错误。
- 镜头景深：前景和背景之间的模糊边界导致在中间区域产生无效距离。

### 4.4 立体角

在图像的边缘区域镜头和光源强度减小。因此，这些区域的表面往往会曝光不足，导致距离测量精度下降。

除此之外，图片边缘的阴影往往更大，从而导致测量中记录的单个光元素比其他光元素强度更大。

### 4.5 环境光

尽管相机测量环境光，并在计算过程中扣除这一因素，但是它仍然会产生实际影响。芯片上的一个像素可以容纳的电荷数量有限。环境光占用的容量越多，则为记录所需关键光脉冲保留的容量就越少。换句话说，信噪比会下降。

光学带通滤波器只允许光源中的频谱通过，到达像素。因此，人造光通常没有问题，因为它只包含这部分频谱中的一小部分。

但是，日光几乎覆盖整个光谱范围，在某些情况下，像阳光灿烂的夏天，会达到极高强度。因此相机需要额外的保护机制，以确保光源仍可测量。

### 4.6 反射和透明度强度

要测量的表面的反射强度以及它们的距离决定了最佳曝光时间。如果同时记录高反光表面和低反光表面，就必须仔细选择曝光时间。否则会出现曝光过度及曝光不足。

建议按照这种方式设置曝光时间：当环境光最强时，最接近相机的反射最强的表面不会过曝。先使用强度分布、再使用深度图可以对这种情况进行有效检查。应选择尽可能长的曝光时间，但不要超过饱和阈值。相机的位置和对准方式可能需要作出相应调整。

使用相同的曝光时间，然后检查远距离低反射表面，以获得适当的强度和正确的距离值。

如果无法找到适当的曝光时间，就必须用不同的曝光时间进行两次或多次曝光，根据置信度值，合并成一个分布图。

镜面和透明表面都不利于准确测量距离，因为光的主路径与最短距离不对应。

#### 4.7 温度

距离计算基于光脉冲时序和快门时间的相关模型。例如，即使相机的电子快门打开仅仅比预期时间晚了33皮秒，那么计算出的距离已经短了一厘米。

即使高质量的电子元件努力满足ToF测量的精度要求，但是高温会导致噪声，而温度波动影响时序关系。

因此，相机在热稳定条件下操作至关重要。应避免出现极端温度和/或波动。如果可能应该对相机进行冷却，比如通过空气流动或安装在大型金属支架上。

#### 4.8 相机配置

相机有许多可以配置的参数，以提高它的工作效率。除了曝光时间和帧速率，还可以采用不同的滤光片来提高精度。然而，不是每种组合都能协同工作来保证规格书中的精度。

### 5. 总结

可以快速、高效地使用ToF (Time-of-Flight) 相机测量距离。与常规相机不同，控制单元和光源是ToF相机的关键部件，能否得到正确的使用会对相机的测量精度产生直接影响。

必须作为测量设备对ToF相机（包括镜头）进行校准。它只能在特定环境条件下和在定义的测量范围中提供最佳结果。ToF相机所提供的数据显然比标准相机要多得多，有强度分布和深度图以及深度图上每个点的置信度值等等。

即使在最优条件下，ToF测量能否成功，也要取决于相机内外的许多因素。为获得最佳效果，该ToF相机的用户应：

- 避免多重反射
- 避免散射光
- 在工作区的中心进行测量
- 在图像的中心进行测量
- 避免环境光，尤其是明亮的日光
- 将相机持续保持于低温状态
- 避免出现镜面和透明物体
- 明亮的漫反射表面优先
- 相机位置的确定和对准优先
- 处理图像时使用的先验知识，如“这个形状是立方体”等
- 针对空间和时间均使用噪声滤波器
- 生成强度分布
- 从一个稳定的位置操作相机，且避免在操作时改变参数

能够遵循这些规则的用户可以利用每秒可进行610万次距离测量且精确到厘米的优势！要记录空间，没有比这更快的方式了。



## 作者

### Martin Gramatke

技术架构师 - 研发平台架构

Martin Gramatke是Basler AG的一位平台架构师。他已在Basler工作超过20年，负责设计和开发满足特定应用要求的工业相机。他在2013年开始承担开发Basler的ToF(Time-of-Flight)相机的任务。

## 联系人

Martin Gramatke - 平台架构师

电话: +49 4102 463 211

手机: +49 1511 630 7350

电子邮件: martin.gramatke@baslerweb.com

Basler AG

An der Strusbek 60-62

22926 Ahrensburg

Germany

## 关于Basler

Basler是工厂自动化、医疗及交通监控等应用中的高质量数字相机的领先制造商。行业需求引领产品开发。Basler相机集成简单、尺寸紧凑、成像质量优秀、性价比出众。Basler设立于1988年，有超过25年的图像处理经验。公司总部位于德国阿伦斯堡(Ahrensburg)，在美国、新加坡、中国台湾、中国大陆、日本和韩国均设有子公司和代表处，拥有近500位员工。

有关免责声明和隐私权声明的详细信息，请访问 [www.baslerweb.com/disclaimer-cn](http://www.baslerweb.com/disclaimer-cn)

©Basler AG, 11/2015

### Basler AG

#### 德国总部

电话: +49 4102 463 500

传真: +49 4102 463 599

[sales.europe@baslerweb.com](mailto:sales.europe@baslerweb.com)

[www.baslerweb.com](http://www.baslerweb.com)

#### 美国

电话: +1 610 280 0171

传真: +1 610 280 7608

[sales.usa@baslerweb.com](mailto:sales.usa@baslerweb.com)

#### 亚洲

电话: +65 6367 1355

传真: +65 6367 1255

[sales.asia@baslerweb.com](mailto:sales.asia@baslerweb.com)

**BASLER**  
the power of sight