

# 系统概述

## SteamVR™ Tracking

### 简介

Valve 为了满足虚拟现实 (VR) 应用对姿势定位的严格要求，特地开发了 SteamVR™ Tracking 技术。想骗过大脑让它相信自己进入了另一个世界并不是件容易的事儿。从出生开始，只要我们醒着，我们的眼睛、运动系统和大脑几乎都在不停配合工作。将我们双眼所感知的图像“弄假成真”就是虚拟现实 (VR) 的目标。但是，如果该图像的运动与我们身体的运动不匹配，我们很快就会有恶心感。要正确地显示图像，需要精确而实时地了解我们的头部在三维空间中的姿势。SteamVR™ Tracking 通过在三维空间内以亚毫米级的精度定位 VR 头戴式显示器的位置，精准地满足了这一要求。然而，SteamVR™ Tracking 并未止步于此。我们的现实并不仅限于让您坐在计算机的屏幕前面。您可以在我们的三维现实世界中旋转、跳跃、坐立和走动。SteamVR™ Tracking 的设计宗旨是让您在虚拟现实世界中拥有与现实世界相同的自由度。SteamVR™ Tracking 可在边长约为 5 米的正方空间内实现亚毫米级的精度，实现当今最好的沉浸式 VR 体验。Valve 很乐意将 SteamVR™ Tracking 技术提供给其他产品开发人员，从而让他们能够开发出新的可定位对象，来丰富我们的体验。了解 SteamVR™ Tracking 系统是该设计流程的起点。

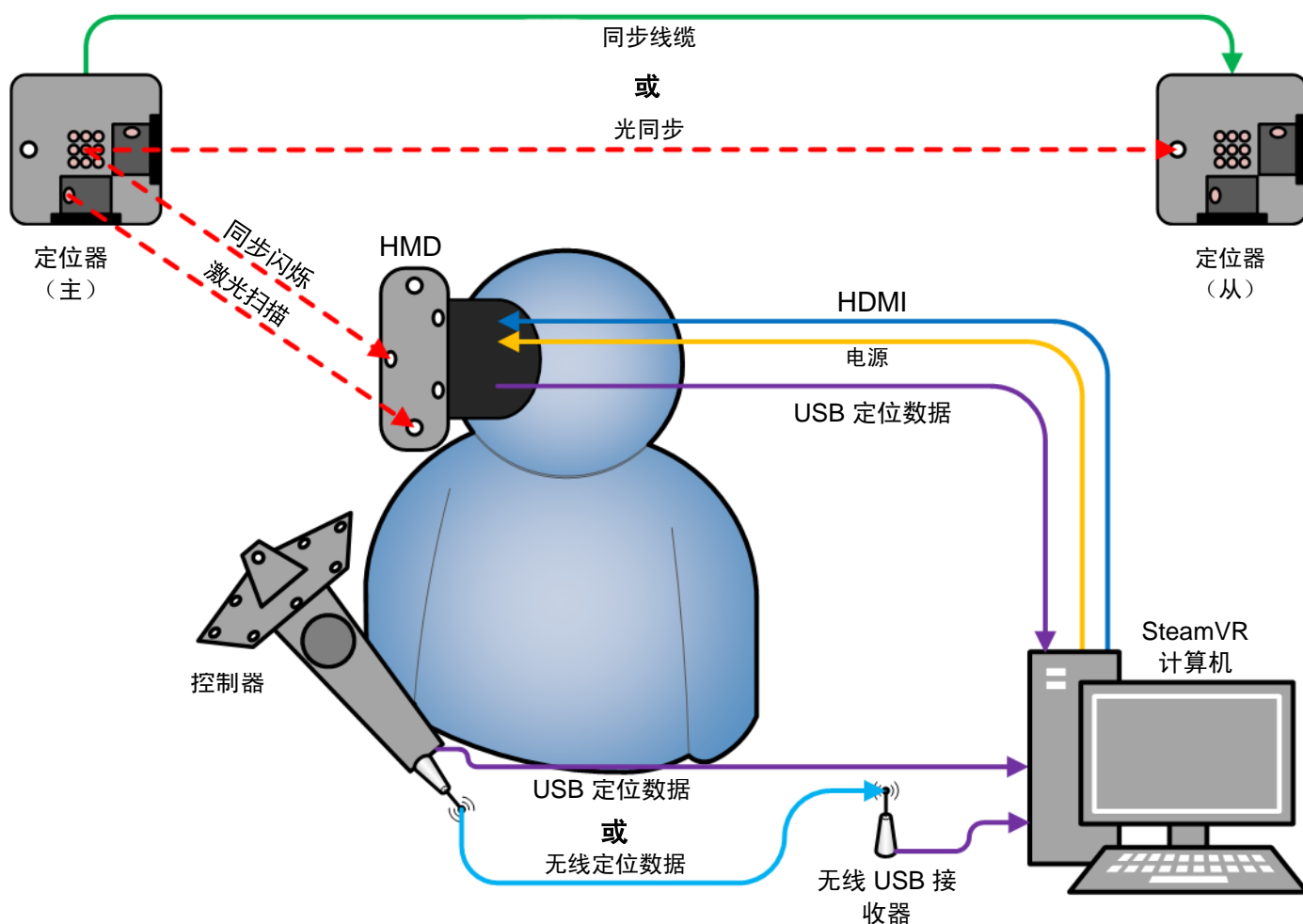
SteamVR™ Tracking 文档全面地介绍了 SteamVR™ Tracking 技术（即 3D 空间内可定位对象的设计流程）、此类设备的测试、校准和故障排除方法以及并将它们集成到 SteamVR™ 软件之中。

### 应用空间

尽管 SteamVR™ Tracking 是为了满足虚拟现实系统的需求而开发，然而 SteamVR™ Tracking 是精度高达亚毫米级的姿势定位系统，因此它在 VR 应用领域以外可能也会具有重要价值。几十年来，有很多位置和方位定位系统问世，并且仍在不断改进。航空定位系统被用于自动驾驶仪。汽车航迹推算系统用于在无法检测 GPS 卫星时，尝试对车辆进行定位。大型办公室和仓库的资产定位系统则使用环境射频信号来定位设施中的设备和人员。所有这些系统都包括一个共同的方法。首先，它们使用 GPS 或其他某种定位系统获取绝对位置。然后，它们借助惯性和压力测量值，在缺少绝对定位系统的时候维持精确的位置。SteamVR™ 采用了类似方法。

SteamVR™ Tracking 体现了一个拥有不可思议的高分辨率、速度和精度的位置和方向定位系统。SteamVR™ Tracking 使用光学传感器检测从定位器发往定位对象的红外参考信号，并通过三角测量法获取绝对位置信息。绝对位置的计算速度高达每秒 60 次。同时，定位对象内部的惯性测量装置 (IMU) 以 250-1000 Hz 的速率报告加速度计和陀螺仪的测量值。这些测量值用于进一步细化位置，即便某些光学传感器被用户或其他障碍物遮挡时也不例外。SteamVR™ Tracking 的性能促成了多种 VR 应用，但重要的是这种技术的应用并不仅限于 VR：它能够在边长约 5 米的正方空间内达到亚毫米级的定位精度，所有能够从中受益的解决方案都可运用该技术。

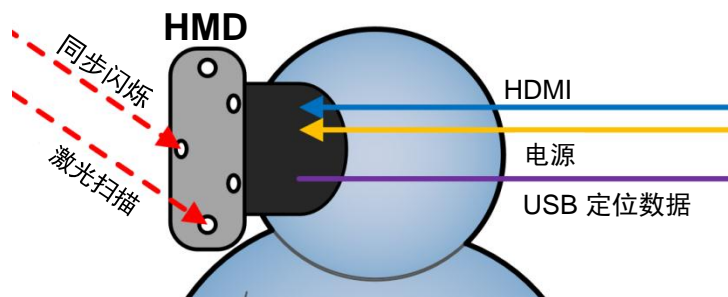
## SteamVR™ 生态系统



SteamVR™ 生态系统包括定位器、头戴式显示器 (HMD) 和连接到运行 SteamVR™ 软件的中央计算机的控制器。

### 头戴式显示器

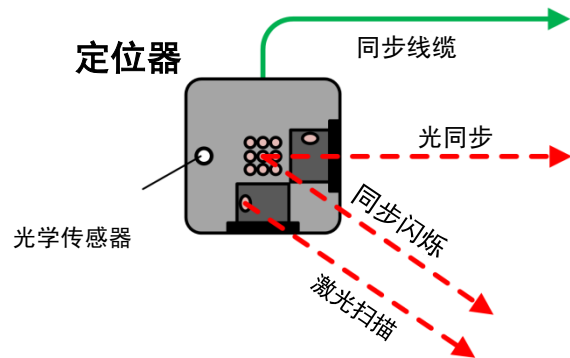
头戴式显示器 (HMD) 是任何 VR 系统都包含的一种标志性设备。本质上, HMD 是戴在用户眼前的一台计算机显示器, 但它实际上又包含三个截然不同的系统: 双目显示系统、光学系统和 SteamVR™ Tracking 系统。双目显示器是一个尺寸适合佩带至双眼前方的显示器。它分为两个部分, 以向双眼显示一个立体图像。双目显示器通过两个镜片观看, 每眼一个镜片。这些光学器件用于将显示器的焦点调至距离双眼更远的位置, 这样,



双眼可在自然的焦距下保持放松状态，避免压力和疲劳。最后，SteamVR™ Tracking 用于让 SteamVR™ 软件能够定位三维空间内的 HMD。HMD 上最多可放置 32 个光学传感器，以检测从定位器发出的参考信号。通过以亚毫米级的精度确定 HMD 位置，SteamVR™ 可以在双目显示器上精确地呈现出虚拟现实。

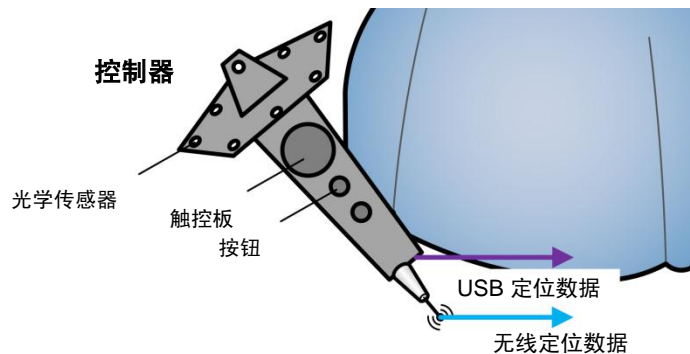
## 定位器

定位器是 SteamVR™ 定位系统的根本。定位器将红外信号传输至 VR 系统中的被定位对象。被定位设备在各个对象上有多个光学传感器，并仅需一个定位器以对它们的位置进行三角测量。一旦配置好系统且定位器安装到了墙壁、三脚架或架子上，就再也无需用户干预。



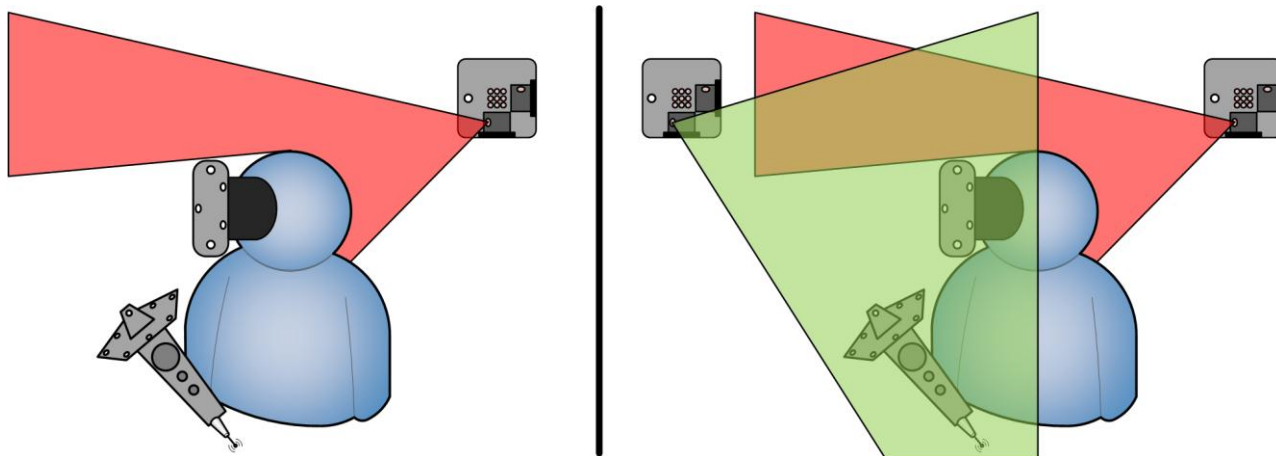
## 控制器

定位所需的最小系统包括一个定位器、一个 HMD 和一台计算机；不过，为了提高用户体验，还需要一个或两个控制器。控制器让用户能够与其所在的虚拟世界互动。握于掌中时，它们在 VR 中会显示为手、油漆刷、枪械、弓箭或是软件开发人员所能想象到的任何东西。借助控制器上的按钮、触发器和触控板，用户能够选择选项、抓取和握住物体、用武器射击或打开和浏览菜单。



## 多个定位器

通过添加第二个定位器可大大增强 SteamVR™ Tracking 体验。第二个定位器能提高 HMD 和控制器始终对至少一个定位器可见的几率。定位器会发出可被 HMD 和控制器检测到的红外光。如果用户背对定位器，则传感器极有可能被用户身体遮挡。当红外信号被障碍物遮挡时，计算机就无法再定位对象。如果另一个定位器被置于空间内的对面，当用户转身时，HMD 和控制器会进入第二个定位器的可视范围。保持 HMD 和控制器等定位对象处于至少一个定位器的视野范围内，这样无论用户朝向何方，在整个空间内都可保持定位。

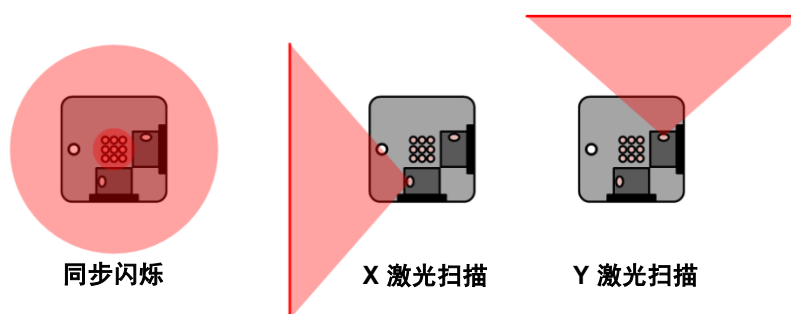


## SteamVR™ 通信路径

SteamVR™ 生态系统内所包含的设备以各种方式通信，以将定位数据下行发送到计算机以及将视频和控制反馈上行发送到 HMD 和控制器。

### 红外基准信令

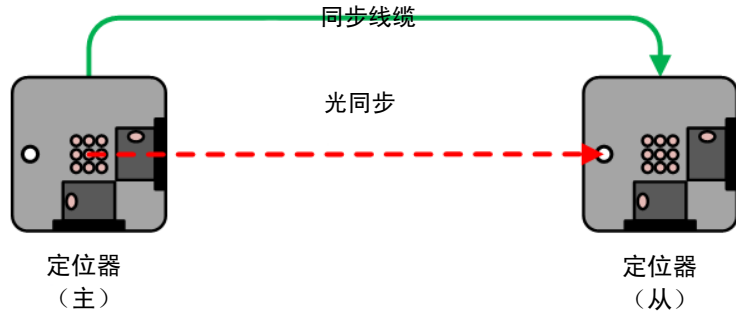
定位器会发出 830 nm 红外光，以将参考信号发送到定位对象。定位器发出的红外信号有两种。第一种信号是一组红外 LED 发出的闪烁信号，表示一个帧的开始。同步闪烁用于通知定位对象，马上就要进行激光扫描。第二种信号是一束 830 nm 激光，它会扫过空间并击中定位对象上的光学传感器。X 和 Y 维度都有闪烁和激光扫描。定位对象记录这些红外信号的到达时间，并通过无线或 USB 链接将它们发送到计算机。SteamVR™ 使用计时信息来计算定位对象的位置。



### 定位器同步

定位器同步信号通过有线或光学方式在两个定位器之间传递。所有定位器都使用能够发出 830nm 红外光的 LED 和激光器。由于所有定位器都用同一波长发送信号，它们必须及时将其输出同步，以使系统能够将定位对象接收的参考信号与正确的定位器关联。为了方便同步，主定位器通过接线向从定位器发送 60 Hz 脉冲。从定位器锁定至 60 Hz 信号，并将其红外传输与交替周期同步。这样，每个定位器都会以 30 Hz 的频率发送参考信号（在时间上按照 50% 的占空比进行多路复用）。但是，在定位器之间连线会影响到最佳用户体验，所以可以使用光学路径。

定位器在各帧开始时发出红外闪烁，从定位器中的光学接收器能够检测到主定位器的同步闪烁。从定位器使用主定位器的同步闪烁锁定至主定位器的 60 Hz 帧率，并将其自己的输出与主定位器的输出复用。



## HMD 通信

### SteamVR™ Tracking 和控制数据

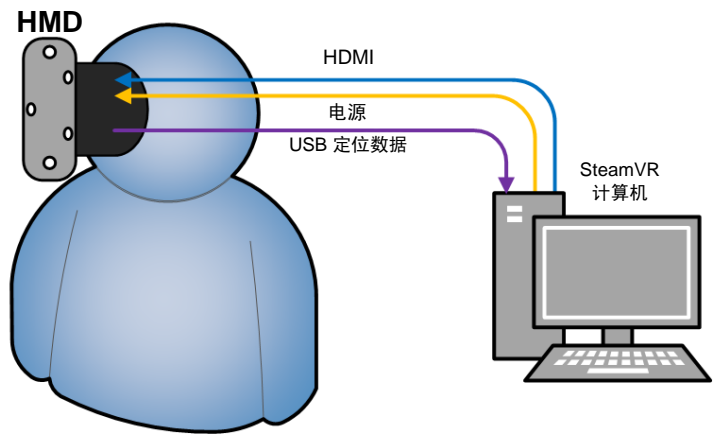
HMD Tracking 和控制数据通过 USB 2.0 Full Speed 链路传递到 SteamVR™ 计算机。

### 音频/视频信号

HMD 双目显示器从连接到 SteamVR™ 计算机的 HDMI 端口获取其视频数据。音频也是通过 HDMI 端口传输，并输出到 HMD 上的立体声耳机接口。

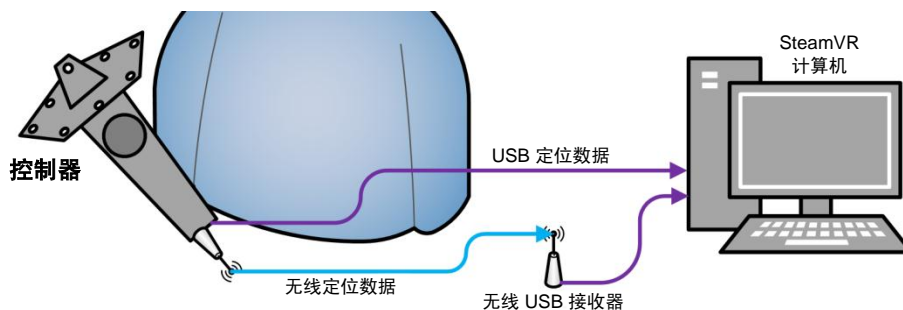
### 电源

电源由墙装式直流电源提供给 HMD。



## 控制器通信

SteamVR™ 控制器通过 USB 或 2.4 Ghz 的无线 USB 接收器无线地连接到 SteamVR™ 计算机。无线环境要求记录于天线设计和射频指南中。



## 操作理论

定位器、定位对象和计算机合作，使用定位器发出的红外参考信号的到达时间对定位对象的位置进行三角测量。定位器发出的参考信号被定位对象上的光学传感器接收。并非所有光学传感器都会收到参考信号，因为有些传感器会被定位对象自身或其他障碍物遮挡。系统需要四个传感器接收参考信号，从而对定位对象的位置进行三角测量。到达各个传感器的参考信号会被 48 Mhz 的 32 位计数器对加上时间戳。与各个传感器关联的时间戳将被传输到计算机。最后，计算机使用定时信息和已知对象几何形状对所有可见传感器的位置进行三角测量，并使用这些位置解析定位对象的所有位置和方位。但是，光有参考信号并不足以实现高性能定位。

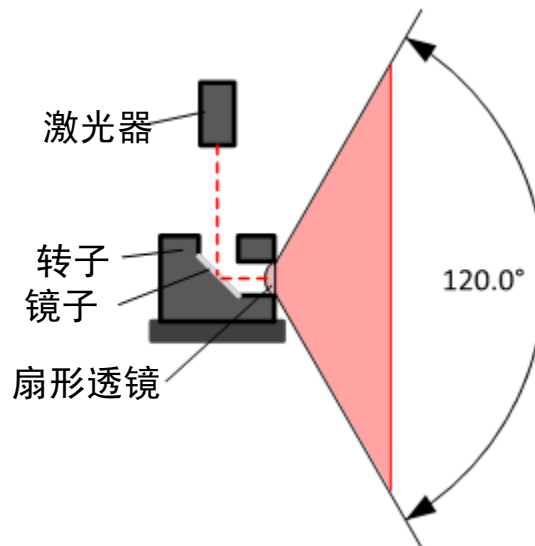
参考信号的最佳更新速率为 60 Hz，经由定位对象的惯性测量装置 (IMU) 中的加速度数据的增强，可实现最佳定位性能。系统会按照参考信号 60 Hz 的速率来计算定位对象的绝对位置。但是，此速率在某些环境下会降低。一个系统中的两个定位器会对其参考信号执行时域多路复用。这会来自一个定位器的参考速率降至 30 Hz。此外，也可能会出现障碍物遮挡了很多传感器，从而将可见传感器的数量降低至五个以下的情况。每个定位对象都包括一个六轴 IMU，它起到加速度计和陀螺仪的作用。此 IMU 不断测量定位对象的线性加速度和角加速度。加速度数据以 1 kHz 的速率传输至计算机。计算机使用 IMU 数据继续计算定位对象位置的绝对测量值之间的变化。通过使用 IMU 数据对对象位置进行航迹推算，系统能够在参考速率降低时维持高性能定位。此外，尽管要开始定位对象需要用到五个传感器，但借助 IMU 数据，计算机最少可使用两个可见传感器定位对象。

使用光学参考信号通过三角测量法计算对象的绝对位置，再加上使用 IMU 所测到的相对变化对该信息进行平滑处理，这就使得 SteamVR™ Tracking 能够在边长约 5 米的立方空间内以亚毫米级的精度确定定位对象的位置。

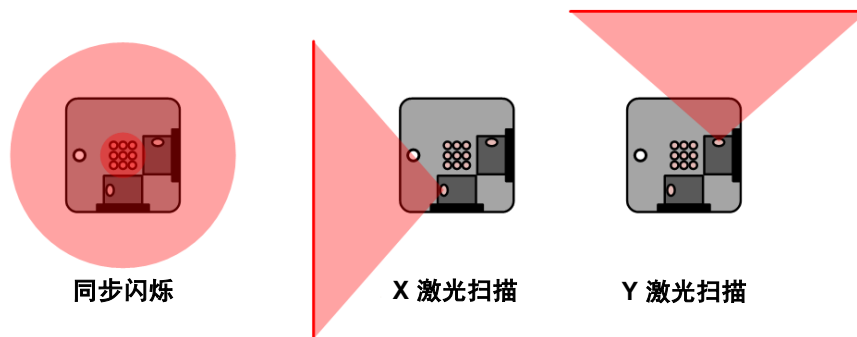
### 生成参考信号

定位器中的参考信号包含两个不同的红外信号，一个 LED 闪烁信号和一个激光扫描信号。定位器内有两个激光器和两个旋转电机，各轴一个。当激光束照进电机转子顶部的孔中时，光束会击中镜子并在镜子的作用下偏转 90°，然后通过一个扇形镜片将光束从转子一侧送出，此镜片将激光束转换成一行方向与旋转轴平行的激光。扇形透镜将激光展开 120°。



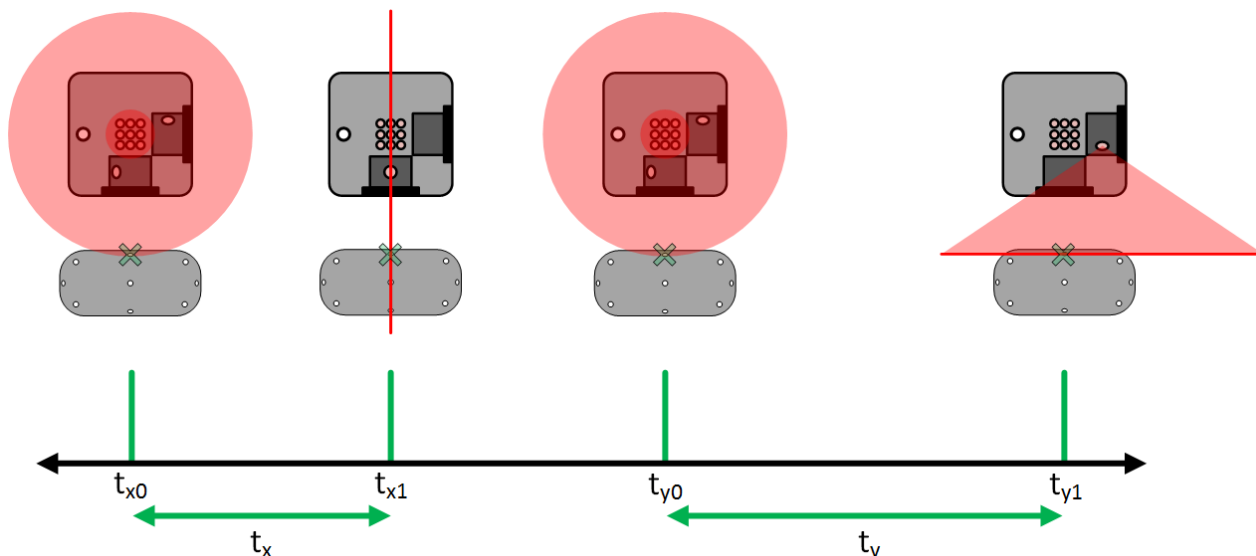


使转子方向互相成  $90^\circ$  角，可创建两束激光，一束扫描 X 方向（从左到右），另一束扫描 Y 方向（从下往上）。



要计算激光扫描的角度，需要一个  $0^\circ$  参考信号。定位器使用一组红外 LED，它们在激光扫描开始时闪烁。这种闪烁会提供一个指示  $0^\circ$  角度的时间戳。将激光扫描的时间戳与  $0^\circ$  时间戳进行对比，可得出从定位器与传感器的角度。

要在 X 和 Y 维度创建参考信号，定位器要让两个转子的相位以  $180^\circ$  的偏差对齐。当 X 转子处于  $0^\circ$  会发生同步闪烁。然后，X 激光扫描整个空间。另一个同步闪烁在 Y 转子达到  $0^\circ$  时出现，之后是 Y 激光扫描整个空间。此模式在 60 Hz 下重复执行，除非系统中有两个定位器。



如果存在两个定位器，则从定位器电机要与主定位器相位一致，且两个定位器交替发送红外信号。各个定位器的电机持续旋转，但它们在交替帧期间会遮挡其红外 LED 和激光器。从定位器能够通过检测经由定位器之间的线缆发送的同步信号，或通过使用定位器中的光学接收器检测主定位器的同步闪烁，与对主定位器的相位对齐。

LED 闪烁和激光器扫描在 1.8 MHz 频率下调制。此调制使定位对象中的光学接收器能够拒绝不必要的环境红外光，以更可靠地检测参考信号。

## 接收参考信号

定位器发出的红外参考信号被定位对象接收并打上时间戳。每个定位对象使用 20 到 32 个光学接收器检测定位器发出的 LED 闪烁和激光扫描。为了确保无论定位对象的方位如何都能够接收到参考信号，必须具有这些数目的光学接收器。红外脉冲被接收后，将由频率为 48 Mhz 且具有 32 位分辨率的计数器打时间戳。这些时间戳被传输到计算机，以便进一步处理。

光学接收器使用光电二极管、互阻抗放大器 (TIA) 和包络检波器检测定位器发出的红外参考信号。入射红外光导致一股电流流过光电二极管。该电流会被高增益互阻抗放大器转换成电压。包络检波器会滤除信号中的 1.8 MHz 调制信号。最终，用于代表光电二极管检测参考信号时所用时间周期的数字信号被传输到定位对象中的 FPGA。FPGA 对包络的上升和下降沿打时间戳，这些测量值均被传输到计算机。

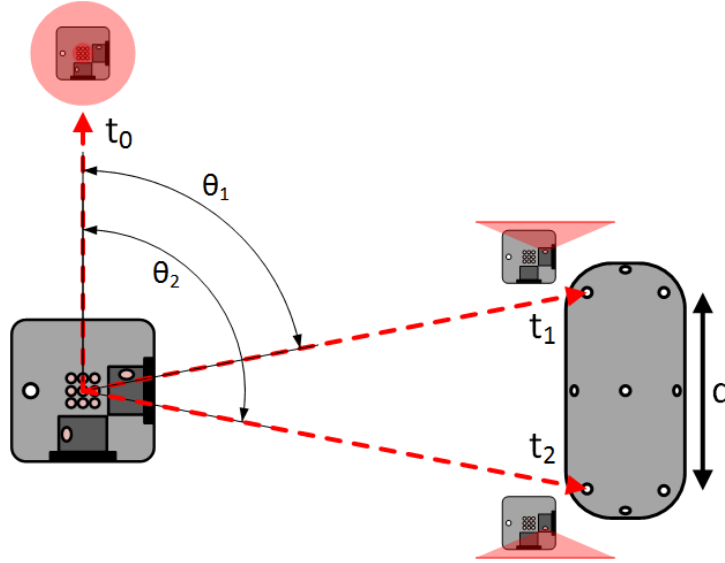


上升和下降沿用于计算光电二极管的形心。由于二极管具有一个 2.65 mm × 2.65 mm 方形感光区域，因此不仅要使用参考信号的前沿，计算形心也很重要。要实现亚毫米级的精度，就要计算该形心从而考虑到感光区域形状及其对于扫描激光束的朝向。



## 计算位置

可通过对光学传感器的相对位置进行三角测量，然后将这些测量值与对象上的传感器之间的已知距离进行匹配，从而计算定位对象的位置。三角测量法首先要测量从  $0^\circ$  到与各个传感器之间的角度。 $0^\circ$  由定位器发出的同步闪烁标记。在定位对象中使用 48 MHz 的 32 位计数器捕捉  $0^\circ$  的时间基准。然后，当激光扫描过空间时，定位对象的计数器会捕捉到激光击中各个传感器。激光扫描结束后，SteamVR™ Tracking 就得到了  $0^\circ$  时的时间戳以及各种可见传感器被激光击中时刻的时间戳。这样，可以很轻松地计算出定位器与各个可见传感器之间的角度。一旦算出该角度，SteamVR™ Tracking 就可求解出与定位对象上的传感器布置方式的已知尺寸相匹配的平移和旋转几何。



通过给出自同步闪烁起计数器的滴答数、时间戳计数器周期和电机速度，便可根据记录的时间戳计算出  $\theta$ 。

$$\theta = t \times T_{counter} \times \omega_{motor}$$

SteamVR™ Tracking 采用了运行频率为 60 Hz 的电机以及运行频率为 48 MHz 的时间戳计数器，那么，我们可以得出下面所示的  $\theta$  计算公式。

$$t = t_1 - t_0 \text{ ticks}$$

$$f_{counter} = \frac{48 \times 10^6 \text{ ticks}}{1 \text{ s}}$$

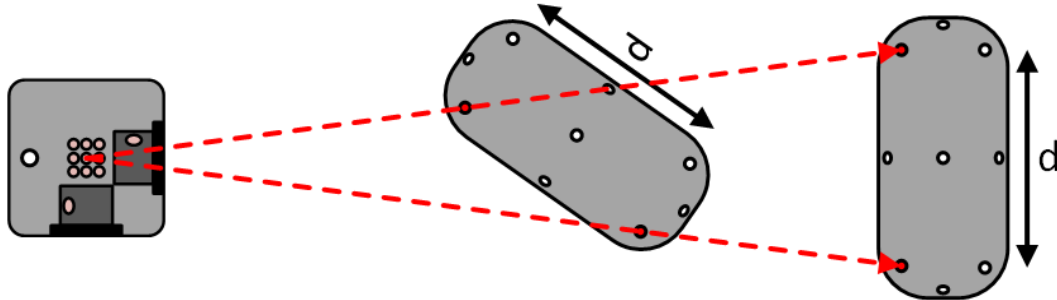
$$T_{counter} = \frac{1 \text{ s}}{48 \times 10^6 \text{ ticks}}$$

$$\omega_{motor} = \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ cycle}} \times \frac{60 \text{ cycles}}{1 \text{ s}} = \frac{120\pi \text{ rad}}{1 \text{ s}}$$

$$\theta = t \text{ ticks} \times \frac{1 \text{ s}}{48 \times 10^6 \text{ ticks}} \times \frac{120\pi \text{ rad}}{1 \text{ s}}$$

$$\theta = t \times \frac{\pi}{400,000} \text{ rad}$$

SteamVR™ 从定位对象收集时间戳，并计算各个传感器与定位器之间的角度后，可求解出与测量到的一组角度相匹配的已知对象几何形状的平移和旋转。SteamVR™ 了解各个定位对象的几何形状，因为每个对象都包含一个描述其传感器几何形状的已校准 JSON 文件。在上面所示的二维简化图中，已知两个传感器之间的距离 ( $d$ )，SteamVR™ 将求解出在距离定位器多远的位置，会满足所测量角度值。但是，这个二维示例还表明，仅用两个传感器进行定位是不够的。仅有两个传感器的话，可能会找到很多能够满足测量角度和已知几何形状的位置和方位组合。



要定位定位对象的平移和旋转，需要使用五个可见传感器进行定位。两个可见传感器会给出很多可能的解决方案，如上所示。三个可见传感器仍无法将对象限制到唯一的位置或方位。四个传感器是获取单个答案所需的理论最小值；不过五个传感器才是实际最小值。此限制表明了定位对象设计的一个基本要求。要实现稳健定位，在设计对象时需要保证对象的所有方位和位置上都有五个可见传感器。

## 误差的来源和后果

上面所述的理想化 SteamVR™ 系统提供了 SteamVR™ Tracking 的基本知识，但系统所面临的难题和限制是由系统真正实现中所固有的误差界定的。系统中有数种误差类型。有些误差在设计时就已带入系统之中，无法通过校准清除。必须避免这些误差。其他误差可能是在制造时产生的，可以通过校准清除。最后，在系统的物理实现中会存在固有的随机误差，必须通过设计最大程度减少这种误差，以保证性能。

### 误差来源

#### 传感器覆盖

要保护光学传感器的光电二极管免受物理和静电损害，需要在它们后面放置某种覆盖物。但是，传感器覆盖物拥有的光学属性会影响传感器性能。一个属性是透射率，它会降低光学信号的整体强度。任何会降低光学信号强度的障碍物最终会限制 SteamVR™ 系统的有效范围。系统的光学距离在**光链路预算**中有详述。传感器覆盖物的另一个重要影响是折射。

当入射红外光穿透传感器覆盖物时，光线会弯曲。斯涅尔定律描述了此折射，如果设计中未考虑到此折射，它会影响光学系统的性能。因为折射角取决于入射角，此误差会随定位对象相对于定位器的方位而变化。因此，传感器覆盖物引起的误差无法通过校准从系统中排除。所以，在设计流程早期就将传感器覆盖物纳入考虑范围是非常重要的，尤其是因为传感器覆盖物在工业设计中还是很重要的美观要素。有关传感器覆盖物的要求和技巧的完整入门知识在**传感器覆盖**文档中有述。

#### 传感器位置

在制造流程中，安装传感器时会不可避免地引入一些误差。将光电二极管安装到 PCB/FPC 上，将传感器 PCB/FPC 注册装到设备机架的安装窗口上，以及模拟机架零件不同部分之间的对准变化，都会出现公差的叠加。传感器的深度也会因设备而异，并在针对粘胶剂和塑料厚度定义的公差范围内波动。幸运的是，一旦定位对象装配完成，这些误差大部分都是恒定的。这样，传感器安装不理想所导致的误差可通过校准清除。但是，

每个设备都需要此校准过程，这就给制造流程增加了一个步骤。Valve 开发了一些光学校准工具，具体在**光学校准**文档中有述。

## 抖动

抖动是指周期性信号相邻循环之间存在的统计上的变化。在 SteamVR™ 系统中，抖动是指当连续测量从发出同步脉冲到激光扫描信号抵达特定传感器所需的时间，所测时间值之间的变化。如果定位对象处于完美的静止状态，理想的系统会始终报告从发出同步脉冲到激光扫描抵达这之间的时间差 ( $t$ ) 是相同的。但在实际系统中，有多种因素会造成不同循环之间的  $t$  会发生随机变化。作为结果，这会从统计数据上表现为围绕理想值的高斯分布。此效应对于 SteamVR™ 系统来说是一个非常重要的影响因素，故此制定了抖动容许量。抖动容许量在**抖动容许量**文档中有述。下面简述了抖动误差的两个主要来源。

## 采样误差

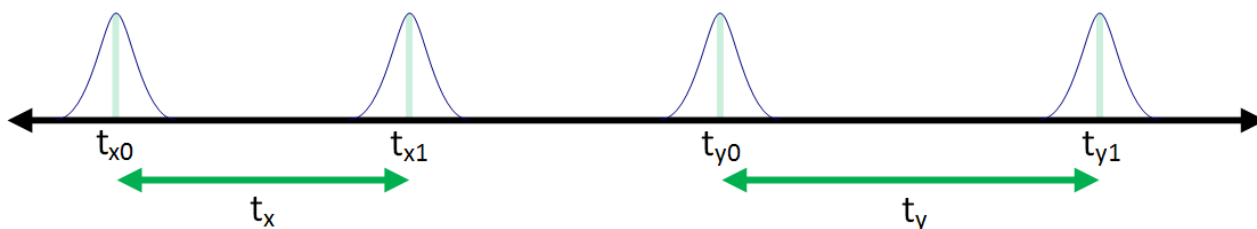
定位器发出的参考信号与定位对象中的 48 Mhz 时钟是异步的。因此，在打时间戳之前，参考信号的上升或下降沿的时间戳必须与 48 Mhz 时钟同步。此重新同步过程会导致分辨率为一个 48 Mhz 周期或约 21 ns 的量化误差。要减小此误差，需要增大光学传感器的采样率。但是，在 48 Mhz 的运行频率下，采样误差并不是导致抖动的主要根源。因此，增大采样率所能带来的好处不值得我们实施此改进。

## 电机抖动

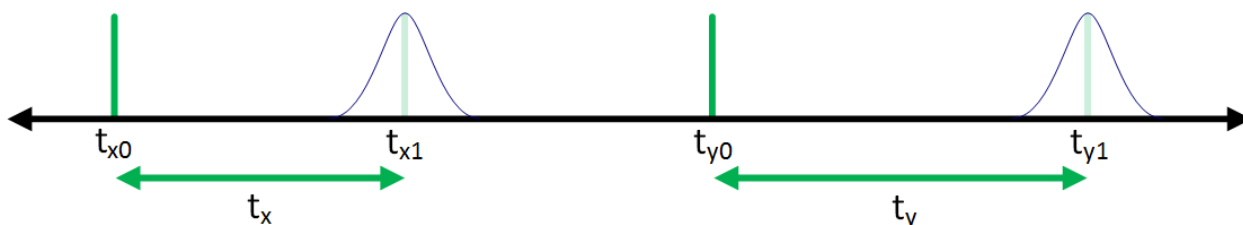
电机抖动是 SteamVR™ 系统中抖动的主因之一。电机抖动指的是电机旋转周期的循环变动。理想情况下，各个电机应刚好以 60 Hz 的频率旋转，旋转周期为 16.667 ms。但是，有数种因素会逐个循环改变此周期。电机旋转期间因轴承缺陷、空气扰动和震动而导致的摩擦力变化会短时地减缓电机旋转速度。在无传感器的情况下检测转子位置时，采样和测量误差会影响电机换向正时，导致旋转期间电机速度发生变化。检测转子上的 0° 标记时产生的模拟噪声和采样误差会和 0° 同步脉冲相关的误差相互累加。所有这些误差加起来，形成电机系统中的总体抖动，并随高斯分布而变化。目前，系统的设计目标是控制电机系统的抖动，这样，电机抖动的一个标准偏差是标称周期的百万分之十 (10 ppm)。在 60 Hz 时，这意味着抖动目标值为  $1\sigma \leq 167 \text{ ns}$ 。

## 抖动累积

上述误差会累积，最终会对系统的某些方面造成限制。定位器中的抖动会导致同步脉冲与激光扫描正时发生变动。定位对象接收和盖时间戳时的抖动导致更多的正时误差。



测量同步 LED 闪烁与激光扫描到达之间的时间差时，定位器和定位对象中的误差会累积起来。为了进行分析，绘制出捕捉激光扫描时那些相互累积的所有此类误差，会很有帮助。



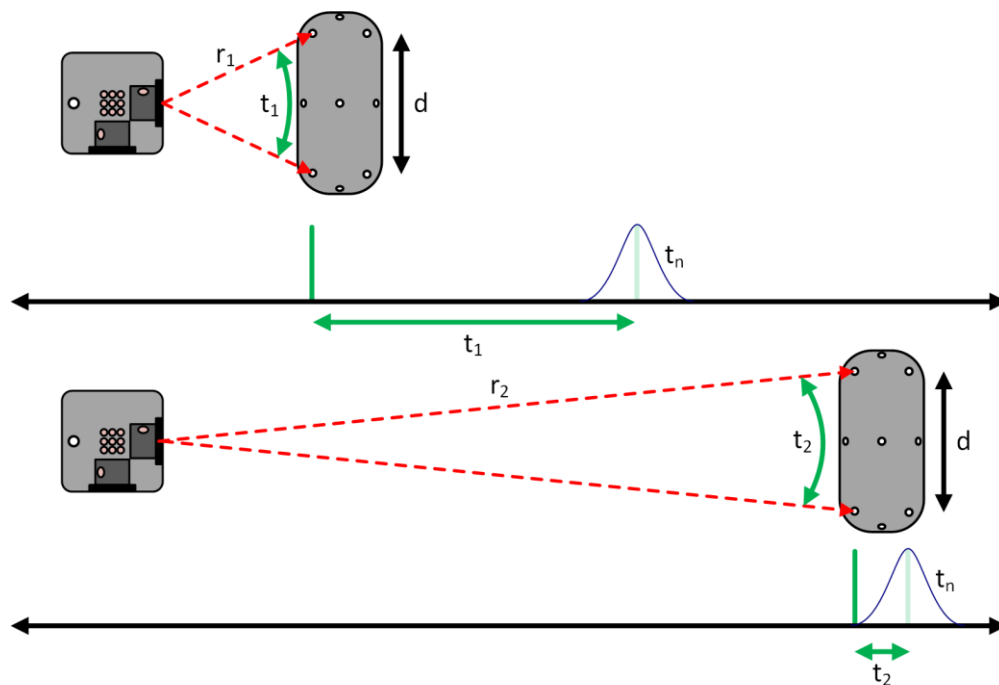
## 误差影响

务必认识到抖动对系统限制的影响。测量对象在三维空间中的位置可通过其平移和旋转来描述。平移指对象在三维坐标系中的位置。旋转指对象的翻滚、俯仰和偏航方位。系统中的抖动会增加平移和旋转测量的噪声。当噪声开始在时间测量中产生决定性影响时，就会达到系统限值。了解这些限值可帮助设计师了解如何优化传感器的位置，以最大程度减小抖动的效应并获取 SteamVR™ Tracking 最佳性能。很多有关定位对象设计的文档都描述了对对象几何形状的设计流程以及传感器的布置流程，以减小测量系统中的噪声影响。文档**对象设计和集成概述**开篇就探讨了对对象的设计与优化。

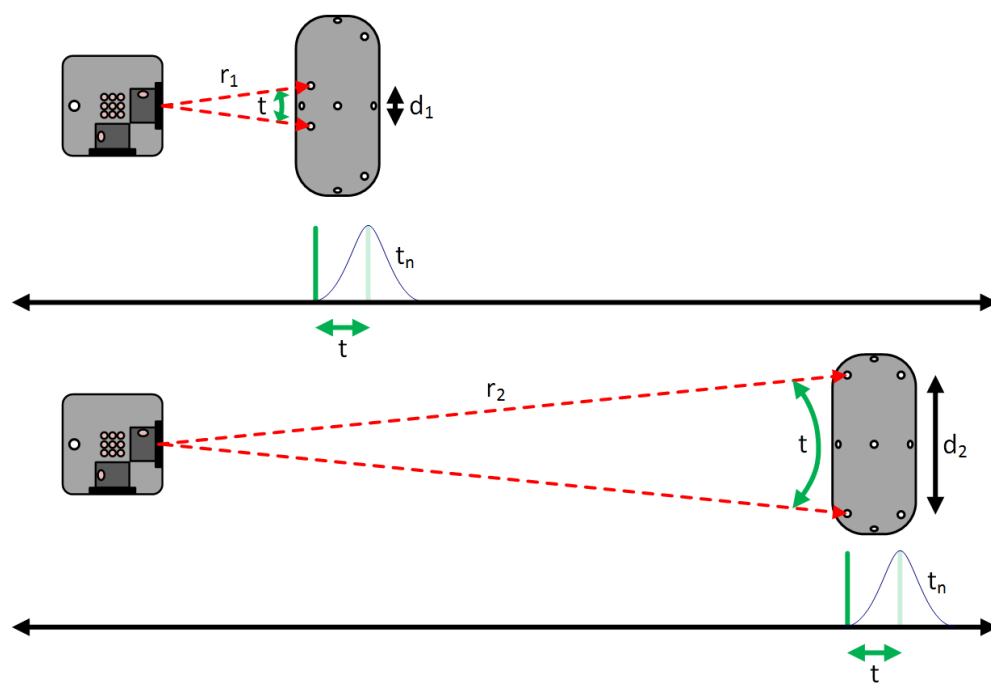
## 平移误差

平移误差指检测三维空间中某个对象的正确 X、Y、Z 位置时出现的误差。要可视化平移对测量的影响，我们从定位器的视角来绘制一个对象会非常有用。请记住，定位器会让一个电机持续旋转，而电机会让一束激光扫过空间，然后使用传感器之间的时间差计算对象位置。电机的角速度是恒定的，这意味着对象离定位器越远，该扫描激光束的切向速度就越快。让我们想象一下，当对象离定位器越来越远时，传感器之间经过的时间会发生什么情况。增加传感器与定位器之间的距离 ( $r$ )，激光束的速度 ( $v$ ) 就会增加，而传感器之间经过的时间 ( $t$ ) 就会缩短。我们可以想象到，当对象离定位器越来越远时，传感器看上去会越来越靠近，就像当铁轨延伸至远处时，看上去会靠得更紧一样。

如果时间测量值 ( $t$ ) 因系统中的抖动而产生误差 ( $t_n$ )，我们可以很容易地想象到，当达到某个平移距离时就会出现噪声  $t_n$  在测量值 ( $t + t_n$ ) 中起到决定性影响的情形。从此分析中可以看到，平移误差主要受定位对象与定位器的平移距离的影响，因为当传感器之间的角度减小时，抖动对测量值的影响就会增大。

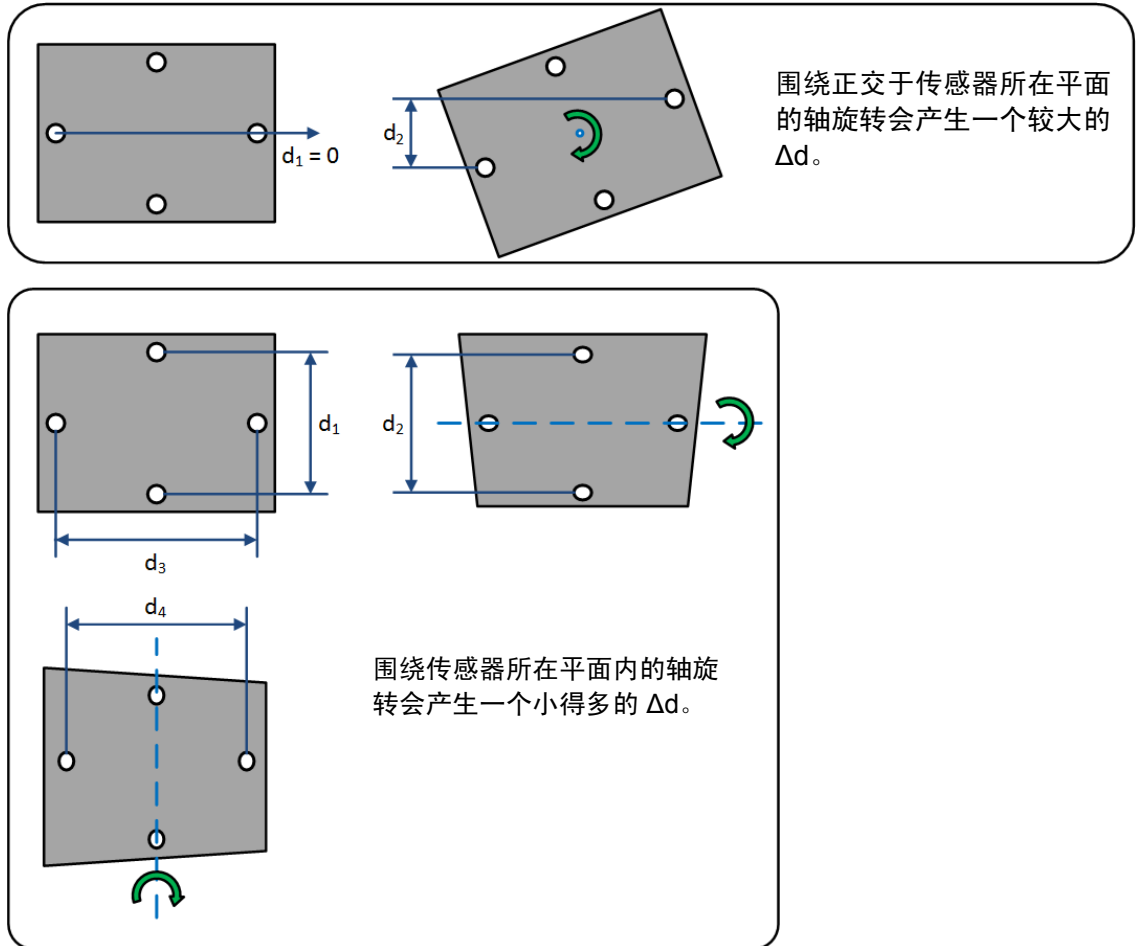


此外，务必注意，增加传感器之间的距离是扩展系统作用范围的一种方式；因为，在传感器之间的感知距离缩短至误差在测量值中产生决定性影响之前，定位对象可在 Z 方向上做更多平移。



## 旋转误差

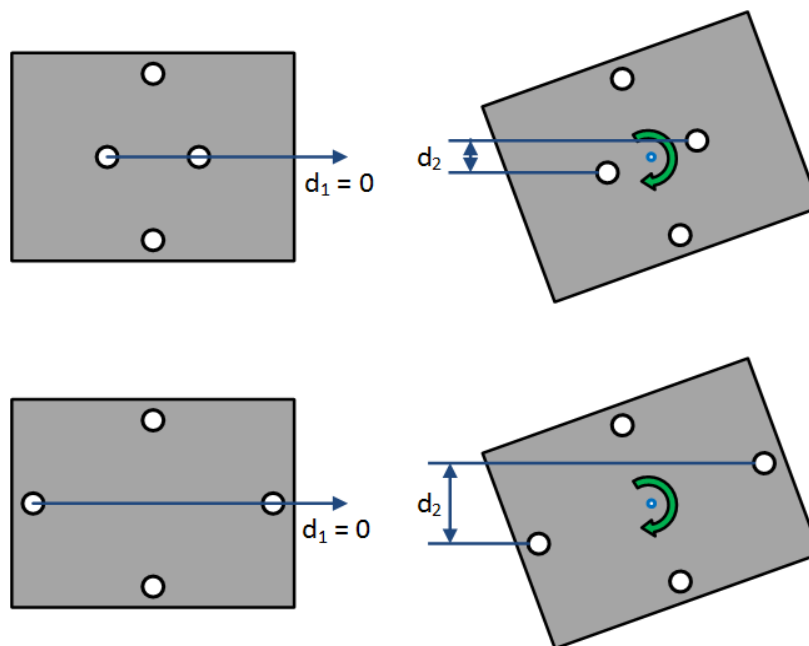
旋转误差指检测三维空间中某个对象的正确翻滚角、俯仰角和偏航角时出现的误差。要可视化旋转误差的推动因素，记住当对象旋转时，SteamVR™ Tracking 在测量两个传感器之间的距离的变化，这一点非常有用。如果旋转使传感器之间的位置产生的相对变化未能远远大于测量系统中的误差，则旋转误差会产生决定性的影响。因此，当传感器均位于同一个平面内，且对象围绕该平面中的一个轴旋转时，旋转误差会最大化。



基于对旋转误差的这一了解，可以轻松看到在所有三个平面 XY、XZ 和 YZ 中布置传感器的重要性。当可见传感器存在于所有三个平面中时，任意轴上的旋转都会导致传感器位置出现很大的变化。

正如平移误差那样，增加传感器之间的距离会减小抖动效应。在所有三个维度中最大程度增大传感器之间的距离，对于给定旋转角度，可最大程度增大相对位置的变化。





## 总结

SteamVR™ Tracking 是一个可在边长约 5 米的立方体空间内达到亚毫米级精度的姿势定位系统。SteamVR™ 生态系统营造出一个当前沉浸效果最佳的 VR 体验平台 - 尽管 SteamVR™ Tracking 的用途并不限于 VR 和游戏。

SteamVR™ 生态系统包括发射红外参考信号的定位器，这些信号被定位对象接收并打上时间戳。这些时间戳通过无线或 USB 链接传输至计算机，并由计算机进行分析，以定位对象在三个维度中的位置。SteamVR™ 在所有位置和方位上都至少需要五个可见传感器，方可实现稳健的定位。位置计算受定位器和定位对象中的误差的影响。这些误差中，有些必须加以避免（例如因传感器覆盖物的红外折射而导致的误差）。其他误差（例如传感器未对准）可在制造期间通过校准清除。系统中因周期性测量参考信号时的抖动而导致的误差无法通过校准清除，必须通过良好的设计实践尽可能将其减小。抖动会加剧平移和旋转误差，它会限制 SteamVR™ Tracking 的距离和分辨率。设计对象时，应让所有三个轴中的传感器在任何旋转姿势下都可以接收参考信号同时增大传感器之间的距离，这样定位对象将能够实现 SteamVR™ Tracking 所承诺的亚毫米级精度，并让用户实现最流畅和最具沉浸效果的 VR 体验。