

# 相机通用模型，校准和应用

杨炳成 Bingcheng (Arthur) Yang

May Solutions LLC

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

[ayang@MaySolutionsLLC.com](mailto:ayang@MaySolutionsLLC.com)

## 摘要和提纲

V0.99 2018-11-10

相机由图像传感器（CMOS/CCD Sensor 等）配以合适的光学镜头组成。镜头使 CMOS 生成了场景的图像，同时也给图像带来了失真。修正失真变形是相机使用时必不可少的处理。*像素光线矢量矩阵*（Pixel Ray Vector Matrix, PRVM）是一种适用于任何相机的通用数学模型。PRVM 可以准确地描述相机所有每个像素的几何属性，而无论相机具有普通常规镜头还是复杂不规则的光学系统。与所有其他传统相机模型相比，PRVM 模型的主要区别和优点是，相机中的像素不再只是*标量*，而是*矢量*。在 PRVM 中，每个像素敏感的方向由空间（通常是在世界坐标系 WCS）中的一个*单位矢量*来表示。而该矢量可以使用 2 个处在空间已知位置的参考光源来独立校准。

每个像素的*光强特性*（Intensity Property, 或称光学-电气响应特性）也可以得到校准。对光强特性可以先作单独的线性化处理，再把它们放在一起作全局的归一化处理。这样，每个像素都有一个独立的光强特性曲线方程。把它们放在一起就可以配置成一个*像素光强矩阵*（Intensity Matrix, IM）。

矩阵 PRVM 表达了在 WCS 中像素的位置和其感测方向，矩阵 IM 则使所有这些像素都具有相似的光电响应特性。这两个矩阵一起，使每个传感器像素成为独立的测量单元。根据具体的应用需求，我们可以先在空间创建任意一个理想无变形的*虚拟相机*（Virtual Camera），再由 PRVM 导出一个与之相对应的*逆映射矩阵*（Inverse Mapping Matrix, IMM）。所有的*虚拟像素光线矢量*（Virtual Pixel Ray Vectors）都将均匀地、或按某种期望的规律分布在 WCS 中。也可以把 IM 和 PRVM 合并在一起，构成扩展的或广义的 PRVM。

针孔相机模型成功并广泛地用于相机建模和应用。但是使用该模型，其几何误差可能很大，并且是不均匀且无规律地分布在相机传感器上或图像上的。对于低成本或几何失真大的镜头，在相机传感器靠近边缘的区域，模型误差可能高达几个甚至数十个像素。针孔模型也并不适用于使用特殊镜头（如远心镜头）的相机。相比之下，PRVM 是无预设模型的。传感器的每个像素光线矢量都独立于任何其他像素。剩余误差非常小或几乎可以忽略不计。对于所有像素，其误差特性在统计意义上都是相同

的。此外，它可以很容易地转换为针孔模型或任何其他模型。这可以使 PRVM 模型完全向后兼容所有已有的软件程序。使用 PRVM 模型升级和移植当前现有系统和应用程序，无需对硬件作任何修改。使任何低成本的商用现货 (Commercial Off-The-Shelf, COTS) 相机达到工业测量级，所需要的仅仅只是一台 LCD 平板显示器加一个线性滑轨 (可选件)。

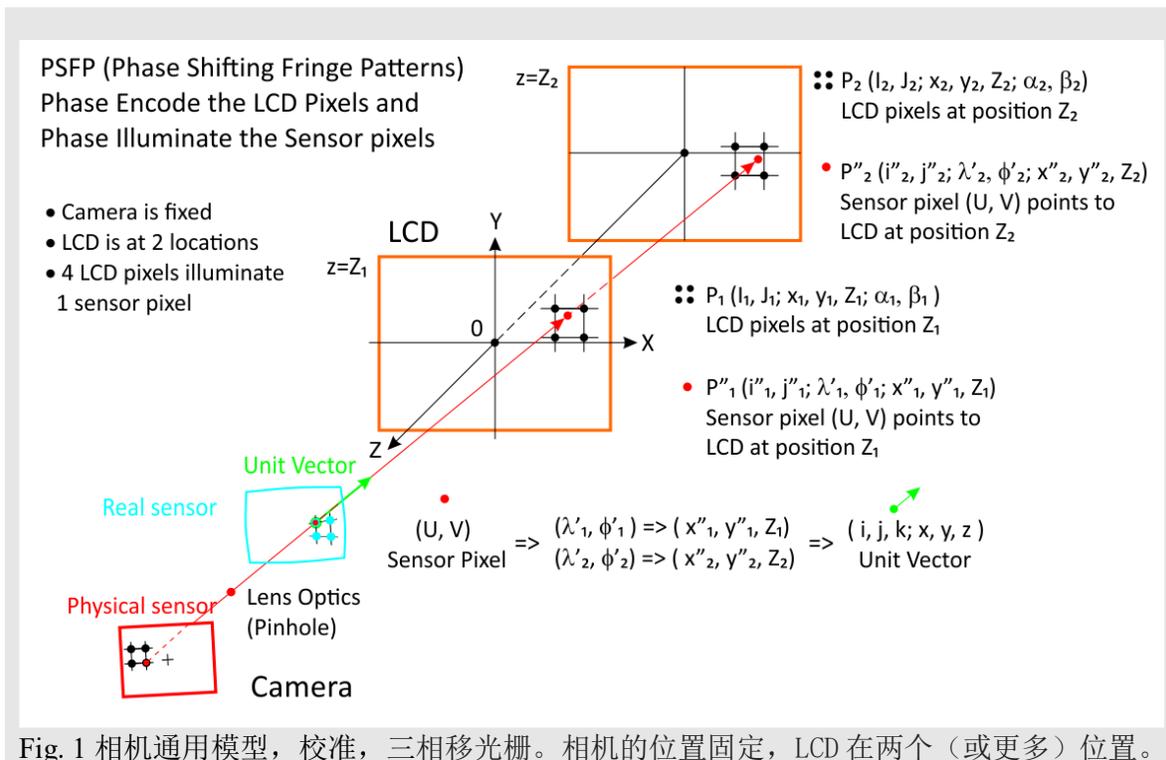


Fig. 1 相机通用模型，校准，三相移光栅。相机的位置固定，LCD 在两个（或更多）位置。

### 校准原理

用位置已知的单独光源照亮单个传感器像素在物理上似乎是不可行或不可能的。但将其数学化却是可行且实用的。用一 LCD 平板显示器，将其像素用 *相移光栅图* (Phase Shifting Fringe Pattern, PSFP) 编码，就可以完成这一任务。图 Fig.1 至 Fig.3 描绘了其原理。其中，LCD 显示的三幅光栅图和 CMOS 相机拍到的三图像都是 8 位单色灰度的。在介绍基本原理时，彩色光栅图仅仅是为了更直观地描述三单色光栅图之间的相位关系。在实际使用中，对于彩色 LCD 和彩色 CMOS，应当把它们都转换成单色的来处理。

一组 PSFP 有 3 个相移光栅图，它们的相位彼此之间相差 120°。被相位编码过的 LCD，通过镜头把 CMOS 全部像素一起照亮并编码。由于透镜光学系统的作用，一个 CMOS 像素亮度的主要贡献者是该像素光线矢量所通过的 4 个相邻的 LCD 像素，其亮度和相位由这 4 个 LCD 像素点经物理插值确定。LCD 只有有限个像素。由 PSFP 编码后，

由它们提供离散的光源和光栅相位角。PSFP 概念和光学器件的物理插值现象协同工作，使 LCD 面板的功能就像是个编码调制过的有源照明面板。它具有连续分布的相位角和均匀分布的相位亮度。它不仅照亮了整个 CMOS，而且同时还把每个像素通过编码区分开来。

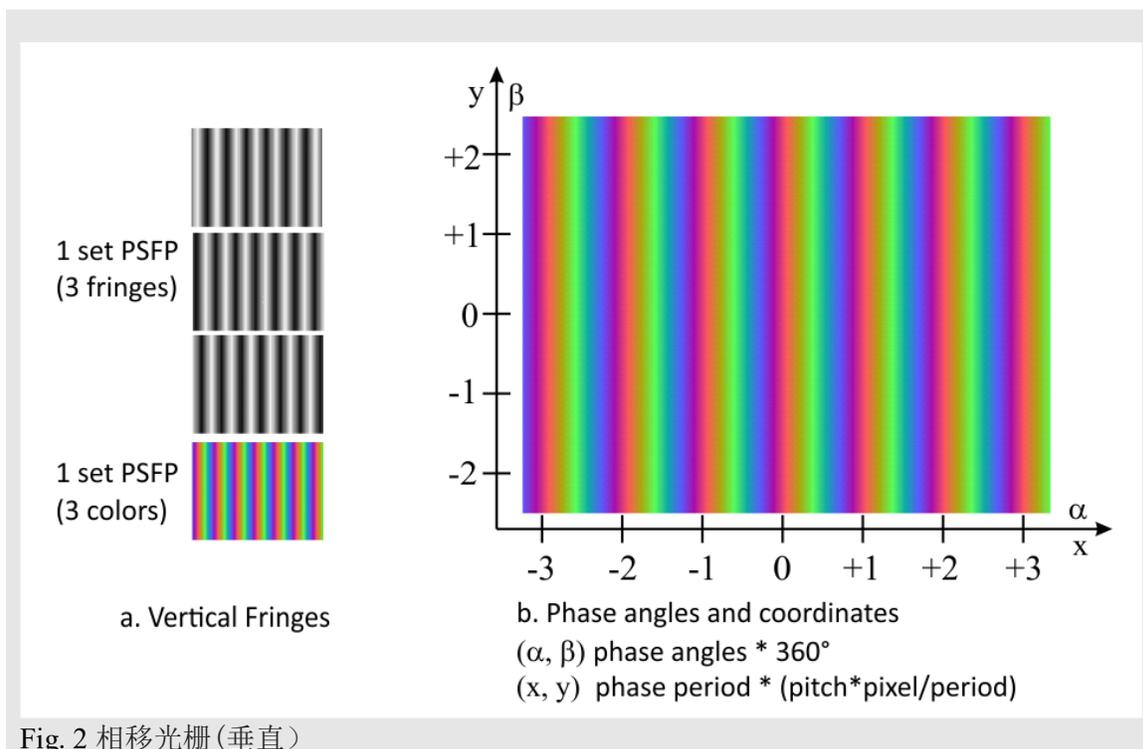


Fig. 2 相移光栅(垂直)

该原理和技术的本质是：像素位置精度极高的 LCD 和 CMOS，借助三相位移光栅的数学特性，通过虽不理想的镜头，建立了它们二者像素之间，即 4 个 LCD 像素（经物理插值到 1 个等效 LCD 像素）与 1 个 CMOS 像素，在空间的精确关系。综合 LCD 在 2 个位置时得到的全部数据、已得到的有失真图像、和期望得到的零失真图像的信息，就可以建立起相关的一系列矩阵。用由此算出的逆映射矩阵对图像作重采样，就可以使输出图像的保真度达到（甚至超过）LCD 和 CMOS 位置精度的水平。三相位移光栅的特性还同时抑制了实际上并不均匀的 LCD 亮度特性和不均匀的 CMOS 光电响应特性可能带来的不利影响。正是借助了三相位移光栅的这些特性，我们把镜头，LCD，CMOS 三者的几何的和物理（光和电）的缺陷都巧妙地避开了，而充分的利用了 LCD，CMOS 位置精度极高的特点，把物理镜头变成了数学镜头。

## 相机模型

在相机中，CMOS 像素以几微米的间隔（点距）均匀地分布在 CMOS 芯片上，具有非常高的点距精度。镜头使 CMOS 像素感测空间景物的光强度得到图像。在此同时，不完美的镜头也使图像失真。传统的针孔模型试图用几十个参数来描述其几何误差特性。但是装有现代镜头（如智能手机镜头）或某些特殊镜头（如远心镜头）的相机可能并不能满足建立该模型时的基本假设和要求。这使得该数学模型不太适用或误差太大。

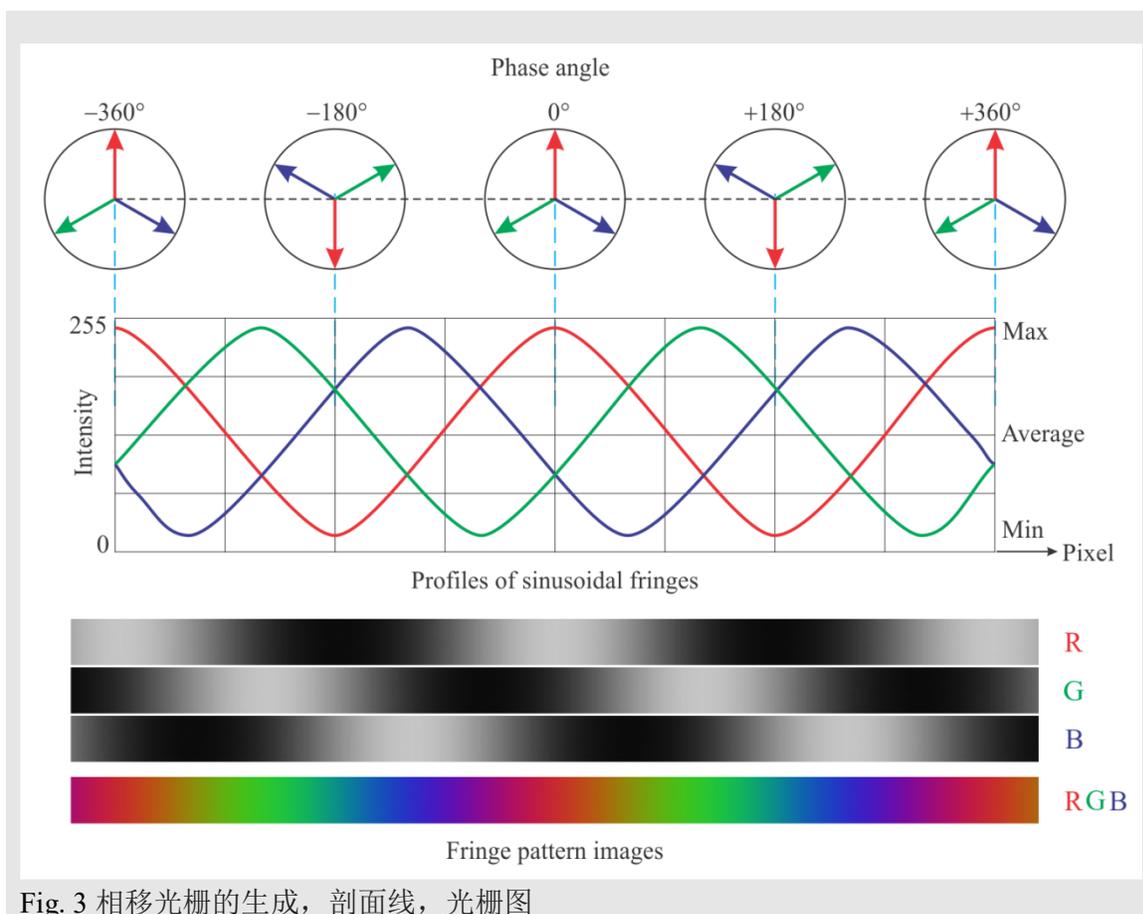


Fig. 3 相移光栅的生成，剖面线，光栅图

为了确定每个像素在空间中的光线矢量，我们需要有位于光路上的至少 2 个参照点。像素光线矢量可以由这 2 个参照点构成。把所有这些像素光线矢量放在一起形成一个矩阵，即像素光线矢量矩阵（PRVM）。

## 标定板

为了准确且独立地校准每个相机像素光线矢量，标定板上的已知参考点应该够多、够精确。参考点的密度（或分辨率）应该与 CMOS 的密度相似或更高。参考点的精度应该是 0.1 个像素级或更好。通过这种方式，就可以准确且独立地校准所有相机像素的几何误差特性。相比之下，传统相机模型的标定板使用棋盘格或有均匀分布点的平面板。它们的共同点是只能提供数量有限的（数十到数百个）参照点，且每个参照点的精度比较低（像素级）。相机模型的参数只能靠这些精度不高且数量有限的参照点来拟合得到。一般在 CMOS 的边缘区域，模型误差可能高达几个或数十个像素。

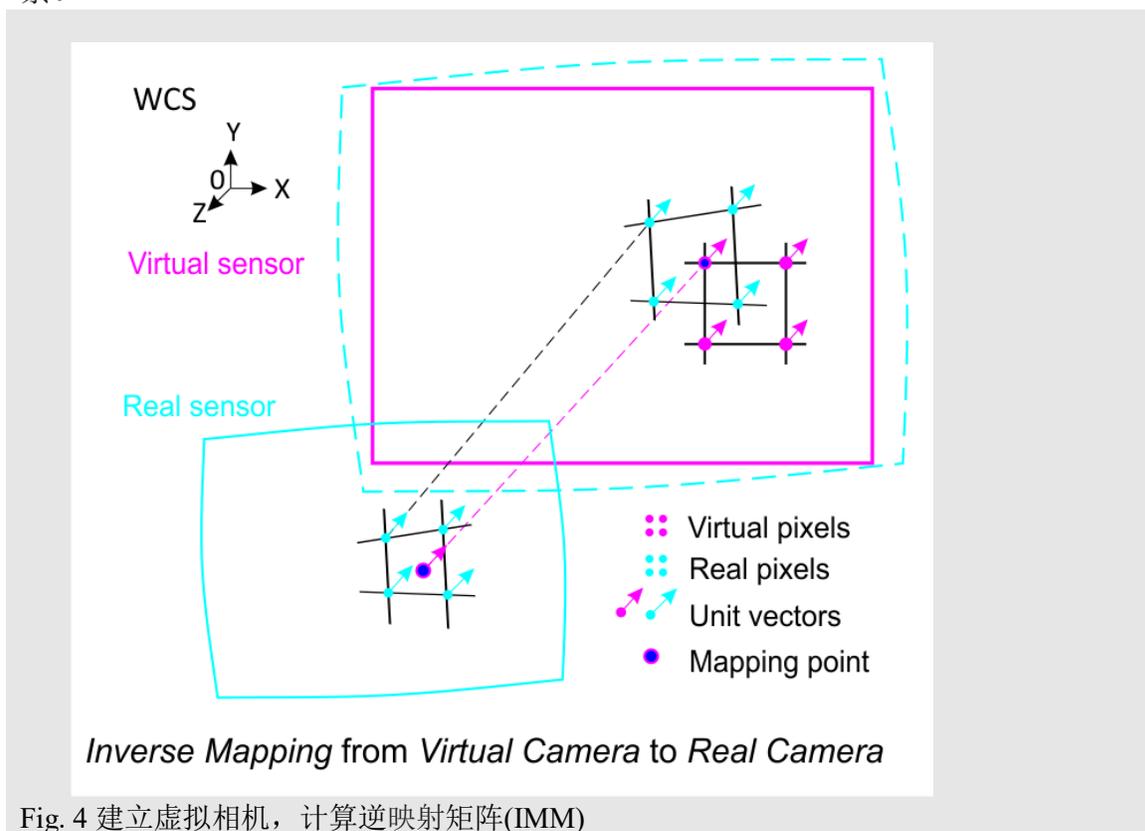


Fig. 4 建立虚拟相机，计算逆映射矩阵(IMM)

将 LCD 作为标定板，不仅可以作几何误差特性的校准，同时还可以作光强特性的校准。与 CMOS 芯片类似，LCD 的像素均匀分布在 LCD 面板上，具有非常高的点距精度。其特点是：

1. 高密度。8K LCD 显示器，有 7,680 x 4,320 像素，可提供 3,300 多万个参考点。低成本的 1080p LCD，有 1,920 x 1,080 像素，即 2 百万参考点，足以校准数百万、甚至上千万像素级的 CMOS。
2. 高精度。LCD 像素的点距精度很高。非常适合用做校准相机的几何误差特性。
3. 高匀度。作为亮度分布连续且较均匀的光源，比较适合用做校准相机的光强特性。

## 校准机制

PSFP 图像可将 LCD 的每个像素与所有其他像素分开。在 LCD 上显示一组或多组 PSFP 图像可以使每个像素具有唯一的编码相位，并且相位角在整个 LCD 上均匀（或线性）分布。光栅将分别按垂直和水平排列，可以在  $x$  方向和  $y$  方向上分组像素点。光栅剖面线的光强亮度分布一般选用正弦曲线。当我们生成光栅图并将其显示在 LCD 上时，每个像素的位置  $(I, J)$ ， $x$  和  $y$  方向上的坐标  $(x, y)$  和光栅相位角  $(\alpha, \beta)$  都是已知的。LCD 的点距可以从其规格指标中获得，也可以直接测量得到。

LCD 可以放在线性滑轨上，沿着  $Z$ -方向移动。线性滑轨的轴线矢量必须垂直于 LCD 的面板平面（换句话说，平行于 LCD 面板的法向矢量）。这样，在每个线性滑轨的  $Z$  位置处，每个像素的  $(x, y, Z)$ ， $(I, J, Z)$  和  $(\alpha, \beta, Z)$  都是已知的。

相机抓拍在 LCD 上显示的所有 PSFP 图像。用一组（3 垂直+3 水平）图像，通过相位计算公式，可直接确定在每个 CMOS 像素点  $(U, V)$  处的相位角  $(\lambda, \phi)$ 。对应的坐标  $(x', y')$  与相位角  $(\lambda, \phi)$  成正比。将 LCD 放在 2 个  $z$  位置  $Z_1$  和  $Z_2$ 。对于每个 CMOS 像素  $(U, V)$ ，我们就得到了 2 个坐标， $P_1'(x_1', y_1', Z_1)$  和  $P_2'(x_2', y_2', Z_2)$ 。空间中的这 2 个点形成射线矢量，该矢量可以由射线上的任意一点  $(x, y, z)$  和一个单位矢量  $(i, j, k)$  来表示。可以将所有这些都投影到 WCS 中任意一个平面上（例如  $Z = 0$ ）。通过这一平面的所有单位向量一起就构成了 PRVM 矩阵。可以将用 PRVM 描述的相机和传感器称为**真实相机**（Real Camera）和**真实传感器**（Real Sensor）。而 CMOS 在镜头的另一侧，可以称其为**物理传感器**（Physical Sensor）。

一组相移光栅含有 3 个图像。如果光栅剖面线的亮度幅值是按照正弦波规律分布，则 3 个光栅可以由 3 个余弦（或正弦）方程生成，它们之间具有  $120^\circ$  的相位差。将 3 个强度表示为  $(I_0, I_1, I_2)$  或  $(r, g, b)$ ，则这 3 个函数是：

$$I_0 = r = (Max+Min)/2 + (Max-Min)/2 * \cos(\theta) \quad (1)$$

$$I_1 = g = (Max+Min)/2 + (Max-Min)/2 * \cos(\theta - 120^\circ) \quad (2)$$

$$I_2 = b = (Max+Min)/2 + (Max-Min)/2 * \cos(\theta + 120^\circ) \quad (3)$$

$$\theta = n * \Delta\theta, \Delta\theta = 360^\circ / (6k) = 60^\circ / k; \quad k = 1, 2, 3, \dots; \quad n = 0, 1, 2, \dots, 6k-1;$$

$$0 \leq Min < Max \leq 255$$

一个光栅周期所占像素的个数应当是 6 的倍数，以使 3 个光栅的一个周期都发生在整数像素上。于是，一个光栅周期所占像素的个数为  $(6k)$ ，一个完整周期落在  $(6k+1)$  个像素上（首、尾像素的灰度值相等）。一个光栅周期中的亮度幅值数为  $(3k+1)$ ，这包含了最低亮度值和最高亮度值， $k = 1, 2, 3, \dots$ ，典型值为  $k = 10$ 。对于 32 位深度的 LCD，单色位深度是 8，共有 256 级灰度，取值范围  $[0, 255]$ 。

另一方面，如果在 CMOS 某像素点上，光栅图的 3 个亮度值已知，则其相位值  $\theta$  可由以下公式直接得到：

$$\theta = \text{atan2}(\sqrt{3} * (g-b), 2*r-g-b), \theta \in (-180^\circ, 180^\circ] \quad (4)$$

相机的光强特性校准（获取 CMOS 对 LCD 的响应曲线）应当在几何特性校准（获取在 WCS 空间中的 CMOS 像素的光线矢量）之前完成。有时，通过对计算机显卡，LCD 和 CMOS 三者的 Gamma 值的联合调整，可以直接将其响应曲线调整为线性。如果响应曲线不是线性的，或者在 PSFP 光栅的创建期间没能补偿其非线性误差，则相位角与对应的像素点坐标的关系将会是非线性的。相位误差与位置误差成正比，它将在 LCD 面板上呈周期性地分布。即使在这种情况下，也还是可以采用线性化和误差补偿的方法和算法在事后作修正。

典型实例：LCD 分辨率 1,920x1,080，点距 0.22mm。选  $k = 10$ 。则光栅每个周期占  $(6k) = 60$  个像素；每个周期的灰度值有  $(3k+1) = 31$  个。全屏幕在水平方向有  $1,920/60 = 32$  个周期，在垂直方向有  $1,080/60 = 18$  个周期。LCD 上相邻两像素之间的相距是  $360^\circ / (6k) = 6^\circ$ 。CMOS 得到 3 幅灰度图后，某一像素用其 3 个灰度值算得一相位角，将其除以 LCD 的相距（本例的  $6^\circ$ ），就直接得到了对应 LCD 像素的（经物理）插值位置。再乘以 LCD 的点距（本例的 0.22mm），就得到了其坐标。可以再简述一下过程：CMOS 相机抓拍到由 LCD 显示的 3 幅灰度光栅图。对 CMOS 每一像素，由 3 个灰度值算出 1 个相位值，除以 LCD 相距（ $6^\circ$ ），乘以 LCD 点距（0.22mm），就得到了像素矢量在空间一点的  $x$ -坐标。这是沿  $X$ -方向的，对沿  $Y$ -方向做同样的操作即可得到  $y$ -坐标。将 LCD 放在另一  $Z$ -位置时，可以得到另一点的  $x$ -坐标和  $y$ -坐标。综合 LCD 在两个  $Z$ -位置时得到的两点坐标，就可构成一空间矢量。要特别注意的是，以上所有的光栅图都是灰度图。所有的照片也都是灰度的。如果是彩色的，应先将其转换成单色的再作处理。

## 虚拟相机

在 PRVM 中，像素光线矢量在空间不是均匀分布的。真实传感器平面上的任何 4 个相邻像素形成一个任意四边形。镜头不仅造成了位置误差，同时还造成了矢量误差，使得光线矢量彼此不平行（对于远心相机），也不能聚到单个点（针孔相机中的光学中心）。在将这个任意四边形投射到不同平面上时，它们的尺寸和形状都将改变。对于大多数的应用，需要用图像映射来获得这 4 个实际像素之间的点的颜色或强度。为了使图像处理更加准确和高效，可以先创建一个无误差的虚拟相机（Virtual Camera）及虚拟传感器（Virtual Sensor）。在实际使用时，可以先将原始图像转换为无失真的虚拟图像，然后再作进一步处理。Fig. 4 描绘了真实相机和虚拟相机的视场（FOV）。从图中可见：

1. 虚拟传感器可以位于 WCS 中的任何位置和方位。
2. 虚拟相机的 FOV 可以选的小于实际相机的 FOV，这可使每个虚拟像素都有图像。
3. 虚、实相机的几何规格（如分辨率，纵横比等）可以选的不同（或不同）。
4. 创建虚拟相机时有两种选择。一种选择是使虚拟相机继续保持其无预设模型、无误差的特点；另一种选择是将其转换到使用传统的相机模型。

通过以上设定，就可以生成*虚拟 PRVM*和算出*逆映射矩阵*（Inverse Mapping Matrix, IMM）。在虚拟 PRVM 中，每个像素的位置可以根据应用假设直接确定，而对应的单位矢量，则有 2 种选择。对于第一种选择，IMM 可以对所有虚拟像素矢量进行逆映射。这样的*虚拟 PRVM*保留了与*真实 PRVM*相同的无模型、无误差属性，可称其为*无模型虚拟 PRVM*（*Model-less Virtual PRVM*）。对于第二种选择，虚拟 PRVM 中单位矢量的分布具有某种模型。对于与针孔模型相机，所有虚拟矢量将会聚到单个点，即光学中心（Optical Center, OC）。对于远心相机，所有虚拟矢量将彼此平行。对于*有模型虚拟 PRVM*（*Modeled Virtual PRVM*），其虚拟向量不再是没有误差的。其误差可以用一个*误差向量矩阵*（Error Vector Matrix, EVM）来表达，它可以用*无模型虚拟 PRVM*和*有模型虚拟 PRVM*，作简单的矢量差导出。可以用 PRVM 中所有的单位矢量拟合得到相机的光学中心。它也将是*虚拟针孔相机的虚拟光学中心*。为了算出 IMM，先通过使用 PRVM 将所有*实际像素*从*实际传感器平面*投影到*虚拟传感器平面*，得到*投影实际像素*（ $I, J; x, y, z$ ）。在虚拟传感器平面内，对于每个期望的（也是已知的）*虚拟像素*（ $U, V; x', y', z'$ ），可以找到 4 个相邻的投影实际像素（ $I, J; x, y, z$ ） $\times 4$ 。注意，这 4 个像素构成的是一个任意四边形，不是正方形。由这 1 个*虚拟像素*与 4 个投影实际像素之间的关系，就可以计算出 4 个系数及与其对应的（上面找到的）像素位置。将其保存在 IMM 中即可。用 IMM 作逆映射运算的直观概念是，每个虚拟像素的亮度值是由 4 个实际像素的亮度值作插值来确定的，而这 4 个实际像素的位置和加权系数就存在 IMM 矩阵中。为进一步提高精度，还可以选用多至 9 个点来作插值，这只要在计算 IMM 时作相应扩展即可。

在应用阶段，IMM 矩阵用于将得到的有失真的原始图像作逆映射运算以获得无失真的虚拟图像，这就是在 2D 应用中我们想要得到的。而对于 3D 应用，如果物体表面是在虚拟传感器平面上或附近，则矢量误差可以忽略不计。若物体表面离虚拟平面较远，则可使用 EVM 矩阵来补偿矢量误差。必要时还可以临时重新构造虚拟传感器到适当的空间位置，并得到相应的矩阵。逆映射运算可以通过 IMM 中的参数对有失真的原始图像通过简单的 4 次乘法和 4 次加法来完成。计算时间相近于对图像作重采样。在逆映射之前，应该先使用 IM 矩阵来补偿修正像素的光强误差。IM 和 IMM 这两个矩阵的另一可能用法是将它们保存到相机中，如果相机有处理能力，就可以直

接输出无失真的虚拟图像。如果相机没有处理能力，则可以由外部计算机调取其相机矩阵，进行相关的计算。

### 降维 PRVM

大多数消费类相机(如手机相机，监控相机等)对成像的保真度要求并不苛刻。这时，我们可以采用降维的 PRVM。它保留了 PRVM 所有概念，但实现起来却非常简便：只要拿相机对显示着光栅图的 LCD 拍 6 幅照片即可。由这 6 幅照片就可以得到 IMM。对照片作重采样后，其失真度将小于 1 个像素。相机镜头的光轴，或相机的视线，应当垂直于 LCD 平面。这可以借助于一面镜子来帮助实现。也可不用镜子而用 LCD 来动态显示相机视频的方法来辅助实现。再增加驱动控制器件，还可实现整个校准过程完全自动化。

### 小结

可以通过建立一组矩阵 (PRVM, IM, IMM, 虚拟 PRVM, EM 等) 来完全描述相机整体和每个像素的物理特性和几何特性。每个像素的特性都被独立校准和表达了。校准的机制、方法和算法准确、可靠、简单、低成本。PRVM 适用于所有相机。使用 IMM 对原始图像进行逆映射可以获得完全无失真的虚拟图像。高保真的虚拟图像还保持了最佳的图像锐度。降维的 PRVM 以一次性的简单操作，就可以使普通相机得到高保真的图像，使失真小于 1 个像素。IM 使每个像素的光强属性被线性化并归一化了。获得虚拟图像的计算成本不超过普通的图像重采样。虚拟相机将加工的不理想的物理镜头转变成了完美无瑕的数学镜头，或者说将物理相机转变成了数学相机。数学镜头(数学相机)的特性使它可以在空间做任意拓扑变换而使图像不失真。它们可以被重构使其能最大限度的利用先进的现代计算机硬件，如 CPU, GPU, SoC 等。由其输出的虚拟图像可以被所有的使用旧相机模型的软件直接使用，保证了最佳兼容性。通过引入 PRVM 和数学相机的概念，以及使用新的校准技术和图像映射重采样，使相机输出的图像再也没有失真变形这一自相机诞生之日起就一直存在的缺陷。感谢科学技术的不断进步，人类终于可以零失真地观看、记录和测量这个真实的世界了。

**相机 2.0**，以成像零失真为标志的新时代，已经开启！

## 实现和应用

### 校准实现

相机成像和测量系统中存在大量误差源。误差可能是由光学器件，电路元件或数学模型引起的。所有造成的误差都将在物理上或数学上传波到最终结果。在每个阶段从源头起就保持最小的误差就可以建立一个更好的系统。

#### 1. 标定板

可以用 LCD 或其它平板显示器做标定板。

- 1.1 LCD 的屏幕尺寸必须足够大，以覆盖在所有  $z$  位置时的相机的整个视场。对于相同的屏幕尺寸，优先选用更高分辨率的 LCD。
- 1.2 LCD 表面应该平整无凹陷，不应是曲面的。
- 1.3 具有较宽视角和均匀亮度的平板显示器，如 IPS, OLED 等，其性能优于 TN, TFT 或其他类型。
- 1.4 对测量级应用，LCD 的折射率 ( $\sim 1.5$ ) 和涂层厚度 ( $\sim 0.1\text{mm}$ ) 带来的误差，可以建模补偿。
- 1.5 LCD 可放置在 3 个或更多  $z$  位置。通过高斯滤波，NURBS 模型或其他数学方法，可以更准确地拟合和优化 PRVM。这样可以在保证足够的相对几何精度的前提下，最大限度地减少矢量误差噪声。
- 1.6 为了提高精度，光栅可以具有更高的空间频率（更短的空间周期）。为消除多相位选择问题，可能需要使用具有较低空间频率（较长的空间周期）的光栅。
- 1.7 为了减少噪音，在产生光栅时，最好不要使用亮度值的两端。例如：对于每色 8 位深度 (bit-depth) 的 LCD, 将亮度保持在  $[20, 240]$  内，会好于选在  $[0, 255]$ 。
- 1.8 选择较大的位深度（每通道 10-bit 或更大）的计算机图形卡和 LCD，可用于获得质量更好的光栅图像。
- 1.9 采用图像抖动或其它图像增强技术，也可以使光栅图像更连续和平滑。
- 1.10 从计算机图形卡到 LCD，首选数字接口（HDMI, DP 等），以避免电缆可能引起的任何传输噪音。

#### 2. 线性滑轨

2.1 校准大视场（例如：1,280x1,024mm）的相机时，LCD 可能会太大、太重。在这种情况下，LCD 可以固定不动，相机可以放在线性滑轨上移动。在这两种情况下，线性滑轨的轴都必须垂直于 LCD 的表面（与 LCD 表面的法向矢量平行）。这可以借助于一次表面镜和激光笔（或相机）来实现该对准。

2.2 线性滑轨的 6 自由度 (6-DOF) 误差将影响到校准精度，特别是对于 3D 应用。应选择足够精度的线性滑轨。

2.3 如果线性滑轨由动力驱动并可以由计算机控制，则可以自动完成校准。校准只需几分钟甚至数秒钟。

2.4 对于 DIY 或没有线性滑轨可用时，可以手持 LCD 在相机前移动。当显示和抓拍一组光栅图案时，务必使 LCD 在每个位置和方位上保持不动。求解传感器像素光线矢量的算法与有线性滑轨的不同。

### 3. 相机

3.1 如果相机可以支持高的位深度 (bit-depth) 图像输出，则应使用最高的 bit-depth 图像。

3.2 如果相机可以支持外部触发/同步信号，则应使用它与 LCD 同步。这将大大降低图像噪声。可能需要一个同步电路以确保图像的曝光时段仅发生在 LCD 的一个帧内（不跨越 2 帧）。

3.3 可以在图像抓拍期间采用图像平均方法，以进一步减小噪声。

3.4 相机拍摄的图像不应饱和，也不应太暗。可以相应地调整相机参数（例如曝光时间，增益等）。

3.5 在作几何校准之前，应调整并锁定相机镜头的焦距和光圈。校准后也可以稍微调整镜头光圈，但不建议这样做。在校准期间和校准后不应触碰相机，以避免改变镜头和 CMOS 之间的相对位置，或一对立体相机中 2 个相机之间的几何结构关系。

3.6 相机光强校准（LCD 到 CMOS 传递特性）应在相机几何校准之前完成。可以将相机放在直接面向 LCD 的位置，并且使相机图像在 LCD 表面虚焦，以此减小 LCD 本身像素亮度不均匀带来的影响。校准后可以生成响应曲线或查找表 (Look-Up-Table)。

### 虚拟立体相机

大多数 3D 扫描仪和 3D-DIC (三维数字图像处理) 系统使用一对立体相机。它们可以由 2 个相机组成，或由一个带分光镜头的单传感器相机组成。为了获得较好的 3D 结果，可以使用移轴镜头 (Shift Lens) 或其他光学结构来使所有匹配的像素对 (*Matched Pixel Pair*) 具有完全相同的聚焦特性并消除透视失真。可以将两个相机作对准 (*Alignment*)，使它们能够具有最大的共享视场或最大的 3D 容积。可以创建两个具有针孔模型的虚拟立体相机，并得到 2 个虚拟 PRVM。这样需要添加比建立单个虚拟相机时更多的条件和参数。

*针孔模型虚拟立体相机 (Pinhole Model Virtual Stereo Cameras)* 中的 2 个虚拟立体传感器，可以被放在一个符合对极几何 (*Epipolar Geometry*) 条件的校正共同视场平面 (*Rectified Common FOV Plane*) 上。虚拟传感器平面和虚拟像素的每一行将

平行于由 2 个真实相机的 2 个光学中心形成的基线矢量。在共同视场上，2 个虚拟传感器的虚拟像素位置完全重合。但是 2 个虚拟相机的单位矢量的方向是不同的。他们分别汇聚到 2 个拟合得到的光学中心。依此就可以相应地创建 2 个虚拟相机的针孔模型虚拟 PRVM，IMM 以及 EVM。来自 2 个相机的原始图像将通过使用与其对应的 IMM 分别进行逆向映射变换到共同视场平面。该虚拟立体相机使对极几何从 2-D 匹配降维到 1-D 匹配。这不但大大简化了匹配算法，而且使其可以充分利用新一代 CPU 和 GPU 的计算机功能和特性（如并行计算等）。对于 3D 扫描仪，这使系统能以最高的效率和精度进行像素匹配和 3D 重建。而对于 2D/3D-DIC 系统，在作子集选取、匹配和相关性处理时，一个相机正方形子集中的每一行都正好只与另一个相机正方形子集中的同一行相匹配，无须反复重做对极变换投影等运算。更进一步，对于由移轴镜头构成的 3D-DIC 系统，所有的子集不存在透视误差。这就彻底消除了由透视效应带来的原理性误差。最后，在 3D 系统传感器和镜头所有可能的组合中，终极最佳的配置是带移轴镜头特性的分光镜头的单传感器立体相机。3D 系统中的移轴镜头的特性是，两个相机的光学聚焦面是重合的。并且在整个景深范围内，在所有与此平行的平面上，两个相机的所有像素的光学聚焦特性都是完全一样的。而在移轴分光镜头单传感器立体相机中，所有的匹配像素对都具有完全相同的物理特性和几何特性：光电转换特性，电子学特性，光学特性等等。为了获得最佳结果，当物体表面远离共享视场平面时，误差向量矩阵（EVM）可用于补偿误差。通常，两台相机应一起校准，以使两台相机在校准期间共享同一标定板 WCS。它们也可以单独校准。在这种情况下，在校准期间可以将每台相机正对 LCD，以使所有像素都获得最佳结果。在校准 2 台相机后，应该进行额外的坐标系合并转换处理，使这对立体相机构建在同一个 WCS 中。在虚拟立体相机中，针孔模型的内部参数中与误差相关的系数都将为 0，因为虚拟图像是零失真的。

## 彩色相机

对于可以输出拜耳（Bayer）图像的彩色相机，每个像素的确切物理位置是固定的，为防止串色和减小亮度噪声，不同颜色的像素可以分别校准。如果相机不能直接输出拜耳图像，则可以用彩色图像将其解码得到。可以建立 3 个独立的 PRVM 或一个统一的 PRVM。对于 3-CCD 彩色相机，3 片 CCD 光路之间可能存在位移、旋转和倾斜等相对安装误差。3 个独立的 PRVM 可以使它们每一个对应的虚拟彩色像素完全重合。

## 智能手机相机

智能手机相机的镜头不是用符合传统针孔相机模型的技术制造的。因此使用针孔相机模型来校准时，造成的误差可能会太大。这时就可以使用无模型假设的 PRVM 或用带误差修正的有模型假设的 PRVM。

若采用降维 PRVM, 手机可生成光栅图, 输出到 LCD 并拍照。移动应用 (Mobile App) 可以使校准操作全自动化。而对准操作 (使相机光轴垂直于 LCD 平面) 可以是半自动化或全自动化 (需借助可控二轴转台或万向节框架)。将期望的十字线和抓拍到的十字线作图像融合, 并动态显示到 LCD, 可以帮助快速完成精确的对准操作。

### 特殊镜头相机

带有特殊镜头的相机通常不符合传统数学模型的基本要求或假设。这些镜头包括远心镜头 (Telecentric Lens), 倾斜/移轴镜头 (Tilt/Shift Lens), Scheimpflug 原理镜头, 微型镜头等。对于这些镜头或其它任意结构的镜头, PRVM 都可以完美使用。

\* \* \*

### 名词术语

**物理传感器。**它是物理的 CMOS/CCD 传感器, 所有像素都均匀分布在物理传感器平面上。

**实际相机。**它是由 PRVM 描述的相机 (所有像素矢量的集合)。在 *实际传感器* 中, *实际像素* 的位置都在同一个 *实际传感器平面* 上, 但其位置和矢量方向的分布都是不均匀的。相邻的 4 个像素形成一个任意四边形 (不是正方形)。实际像素矢量的分布不如设计的理想。例如: 它们不会聚合到单个点 (光学中心, 如针孔模型相机); 也不会彼此平行 (如远心相机)。因此, 上面的任意四边形在投影到别的平面时, 其大小和形状都会发生变化, 即使该平面与 *实际传感器平面* 平行时也是这样。

**虚拟相机。**它是由 *虚拟 PRVM* 描述的相机。*虚拟传感器* 的 *虚拟像素* 均匀分布在 *虚拟传感器平面* 上。相邻的 4 个 *虚拟像素* 形成正方形。取决于额外的选择, *虚拟像素矢量* 可以是 *无模型的* 或者是 *有模型的* (针孔, 远心等)。对于 *无模型虚拟 PRVM* (*Model-less Virtual PRVM*), 其 *虚拟像素矢量* 保留了 *实际相机 PRVM* 的零误差特性。对于 *有模型虚拟 PRVM* (*Modeled Virtual PRVM*), 其 *虚拟像素矢量* 要么会聚到单个点 (如针孔相机), 要么彼此平行 (如远心相机), 或按其它某种规律分布。若使用 *有模型虚拟 PRVM*, 需要生成一个 *误差向量矩阵* (EVM) 以描述使用 *有模型虚拟 PRVM* 时造成的矢量误差。用 *有模型虚拟 PRVM* 和对应的 IMM 逆向映射得到的图像, 经过 EVM 补偿后, 也同样可以输出无误差的虚拟图像。