

光学元件与镜头

选择合适的光学元件

对于每个视觉系统应用，光学系统对整个图像的质量、准确性、速度和重复性都至关重要。

Greg Hollows, Edmund Optics机器视觉解决方案总监

构建视觉系统时，必须考虑应用、分辨率、照明、景深(DOF)、视场(FOV)、处理速度和其他要素。但是，构建的系统往往无法达到性能预期，或者使用了指定条件过多的组件。这两种缺陷都需要付出高昂的代价，因为由于指定条件不足而出现故障的系统必须重新设计；指定条件过多的系统包含高价格组件。

视觉系统从图像中提取必要的信息，因此应用将决定所需的图像质量。

系统成像能力是由组件成像能力决定的。每个视觉系统都需要照明、

镜头、相机以及监视器或计算机/捕获板来分析图像。用户应该选择适合应用且相互补充的组件。避免对系统的某些部件指定过多质量条件，可以确保所有组件的价格不超出项目预算。

要为应用选择适当的镜头，需要了解多种参数和概念。这些概念包括视场、工作距离、分辨率、对比度、远心度和照明衰减等。

视场

视场(FOV)是被观察物体的可视区域。换句话说，就是整个物体中填充相机传感器的部分。FOV可

定为一个固定数值(如25mm)。但是，如果使用了不同尺寸的成像阵列，所有这些规格都会发生变化。

请记住，市场上有许多不同尺寸的阵列。要为您的应用选择合适的镜头，就必须了解阵列的实际尺寸。阵列变大，FOV也会随之增大；反之，传感器变小，FOV也会随之减小。通过镜头的放大倍率，可以指定相应的FOV以顾及不同的成像器幅面。镜头的放大倍率是系统的主要放大倍率，被称为PMAG。

主要放大倍率

主要放大倍率(PMAG)描述了可以在特定传感器阵列中看到的物体范围，其计算方式为：

$$\text{PMAG} = \text{传感器尺寸} / \text{FOV} \quad \text{或} \quad \text{FOV} = \text{传感器尺寸} / \text{PMAG}$$

最后，需要寻找与所选相机配合使用时能满足FOV需求的镜头。通过为这一公式求解，可以了解需要哪种放大倍率的镜头，或者放大倍率或传感器尺寸变化后可以获得多大的视场。此外，还必须了解传感器尺寸(也称为芯片或传感器幅面)才能使用这

可以采用多种形式指定：对于缩放或变焦镜头，可以使用范围的形式来指定(如10~50mm)；对于工作距离较广的镜头，可以指定为一个角度规格(如25°)；对于固定放大倍率镜头，可以指

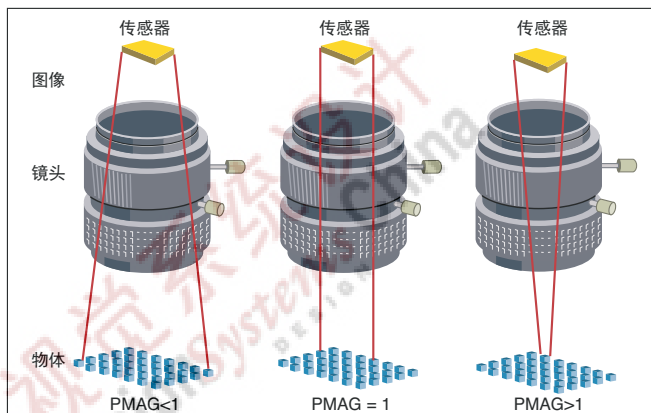


图1: PMAG是镜头的一项属性，描述了可以在特定传感器阵列中看到的物体范围。通过镜头的放大倍率，可以指定相应的FOV以顾及不同的成像器幅面。

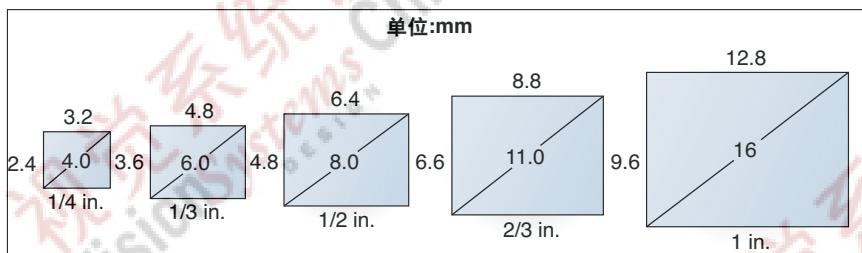


图2: 成像传感器具有多种标准幅面尺寸。阵列变大, FOV也会随之增大; 反之, 传感器变小, FOV也会随之减小。

些公式。例如:

所需 FOV=12.8mm、水平传感器尺寸=6.4mm时, PMAG=6.4mm/12.8mm, PMAG=0.5X。

或者, 所需 FOV=12.8mm、水平传感器尺寸=8.8mm时, PMAG=8.8mm/12.8mm, PMAG=0.69X。

每个镜头都会产生一个 PMAG 或 PMAG 范围, 这不受所使用传感器的尺寸影响, 因为 PMAG 是镜头的一种属性 (见图 1)。需要注意的是, 如果镜头的焦距接近无穷远, 则其 PMAG 接近于零。在这些情况下, 使用视场角值可以更加轻松地确定 FOV。请记住, 视场角因传感器尺寸而异:

$$FOV = 2 \times (\text{工作距离} \times \tan[\theta/2])$$

其中, θ = 特定成像器尺寸的镜头视场角。

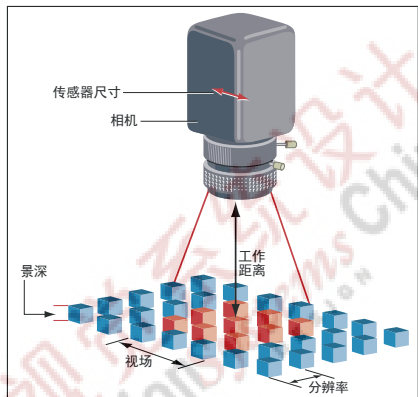


图3: 工作距离是指从镜头前端到被观察物体之间的距离。分辨率是被观察物体的最小特征尺寸。镜头的景深是镜头在物体位置靠近或远离最佳焦点时, 保持所需图像质量的能力。

成像传感器幅面

许多成像阵列的宽高比都为 4:3 (见图 2)。请注意, 传感器幅面尺寸并不等于传感器的有效区域。视频镜头通常可与任何相机配合使用, 但先决条件是镜头设计幅面必须要大于或等于相机幅面。如果传感器过大, 则会出现渐晕 (管状视野) 现象。因此, 大多数镜头都会指定可配合使用的最大幅面或最大对角。

工作距离

工作距离是指从镜头前端到被观察物体之间的距离 (见图 3)。一些镜头 (如物镜) 具有固定的工作距离, 但也有许多镜头的工作距离是在特定范围内的。尽管工作距离可能是需要指定的参数中最简单的一个, 但用户在确定适合应用的最佳工作距离时, 仍然必须考虑一些细节。总的来

说, 在考虑工作距离时, 系统尺寸、移动部件、飞扬的碎屑以及照明等各方面都必须列入考量范畴。此外, 镜头系统的放大倍率越高, 工作距离就越长。如果需要在工作距离较长时达到较高的放大倍率, 系统尺寸可以进一步增加。

分辨率

分辨率是被观察物体的最小特征尺寸。通过分析分辨率和对比度之间的关系, 用户可以了解极为实用的调制传递函数 (MTF)。分辨率是对成像系统再现物体细节能力的测量。例如, 假设一个白色背景上有一对黑色方形。如果这两个方形在邻近的像素上成像, 则会在图像中显示为一个大的黑色矩形。为了加以区分, 这两个方形之间需要留出一定的空间。只要找出看见两个方形所需的最小距离即可了解系统的分辨率极限。交替的黑白方形之间的关系通常被描述为线对。

通常, 分辨率由频率决定, 而频率则通过每毫米线对数 (lp/mm) 来测量。这里涉及到两种不同但相互关联的分辨率: 物方分辨率 (可以分辨的物体要素的尺寸) 和像方分辨率 (镜

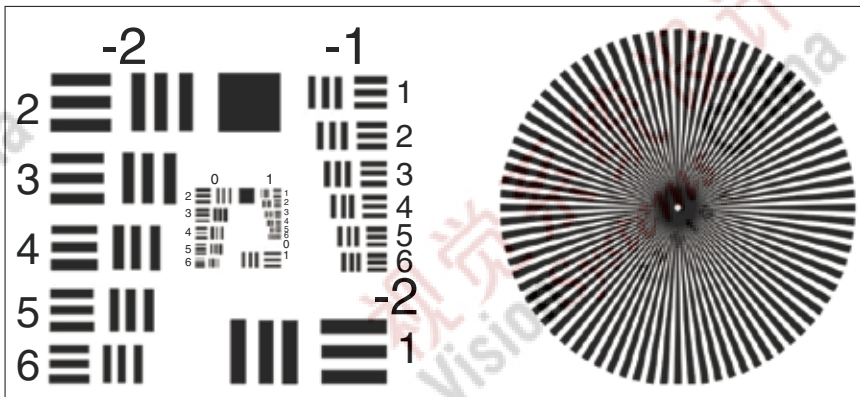


图4: 条状目标由不同频率的线对组成, 而星标则由具有连续频率的楔形组成。条状目标中的正交线非常有用, 因为通过图像中x和y平面中所显示不同的误差, 用户能成功地测试出系统是否存在误差 (散光误差)。条状目标受到有限的频率等级限制。星标没有这一缺陷, 但它们的解释难度更高。

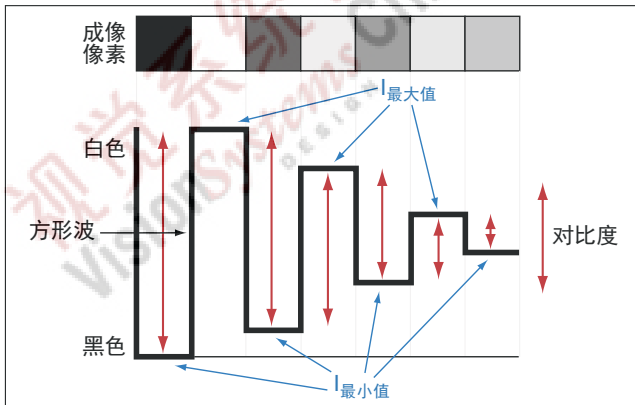


图5: 黑白线条之间的强度差异越大, 对比度就越高。人眼可以观察出低至1%~2%的对比度。典型的对比度极限(10%~20%)通常用于定义CCD成像系统的分辨率。

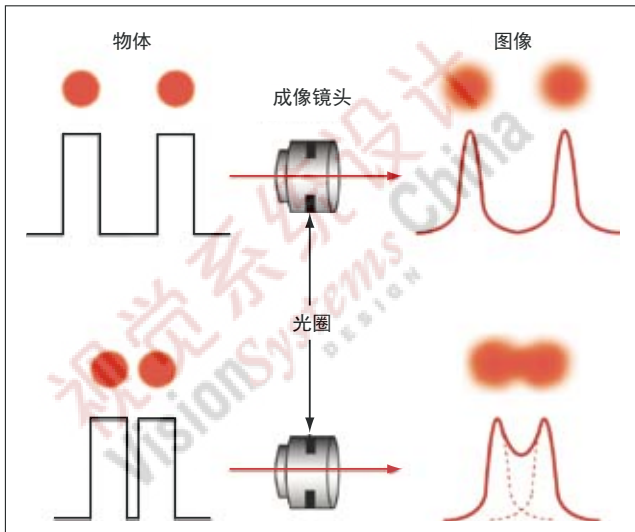


图6: 对比度并不是常量, 它取决于频率。图中上方的圆点可以通过镜头成像。它们略微模糊。如果斑点进一步移近, 模糊部分将重叠, 且对比度下降。斑点靠近到足以使对比度达到极限的距离时, 其间距即为分辨率。

头分辨率和相机分辨率的结合)。传感器的线对分辨率不能超过传感器像素数量的一半, 因为要分辨一个黑白区域, 至少需要一对像素。像方和物方分辨率(以lp/mm描述)采用系统主要放大倍率表示。系统的分辨率极限, 可以通过对测试目标成像(见图4)来确定。

对比度描述黑色与白色的区分程度。在现实情况中, 黑白线条会在某种程度上模糊成灰色。噪音和边缘模糊会导致对比度降低。图像边界区域相互间差异的有效再现能力, 通常都以灰度或信噪比来定义。在定义清晰的图像中, 黑色细节必须显示为黑色, 白色细节必须显示为白色(见图5)。

明暗线条之间的强度差异越大, 对比度越高。对比度是黑白之间强度的分离程度。再现物体对比度与再现物体

细节(即分辨率)一样重要。镜头、传感器和照明, 在确定最终图像对比度方面都发挥着重要作用。

对比度

镜头对比度通常以再现物体的对比度百分比来定义。图像的分辨率和对比度可以单独定义, 但同时也密切相关。实际上, 没有指定特定对比度的分辨率往往毫无意义。同样地, 对比度也取决于分辨率频率。

假设两个圆点相互靠近并且通过镜头成像(见图6)。鉴于光的性质, 即使经过完美设计和制造的镜头, 也无法准确再现物体的细节和对比度。在衍射极限下使用镜头时, 图像中的圆点的边缘仍然会模糊不清。如果圆点之间的距离较远(在低频状态下), 则能清楚分辨, 但随着它们相互靠近, 模糊区域将重叠, 直至无法再分辨出这些圆点。分辨率取决于成像系统检测圆点间距的能力。因此, 系统的分辨率取决于衍射及其他光学误差所导致的模糊程度、圆点间距以及系统检测对比度的能力。

光学工程师通常会在特定分辨率下指定一个对比度等级。如果将一系列频率下的对比度绘制成图, 将得到一条MTF曲线。假设对黑白平行线条进行了目标成像。分析一下逐渐增加目标行间距频率的效果, 以及这一行为将如何影响对比度。正如人们所预料的, 对比度会随着频率增加而降低。可以采用通过一系列不同线对所得出的对比度值来绘制MTF曲线。

根据这些位置绘制出的曲线显示了所有分辨率(而不仅仅是极限分辨率)下的调制, 即对比度(见图7)。需重点强调的是, 曲线的高分辨率端并非总是MTF最重要的部分。对于许多应用, 在低频率下达到高对比度比达到分辨率极限更加重要。对于此类应用, 高分辨率的镜头非但无法提高整个系统的性能, 反而会大大提升成本。相反, 用户只需要提供更加稳定或明亮的照明即可。

此外, 如果能够在应用所需的分辨率下提高对比度, 实际上也就降低了系统的处理时间。这是因为, 如果提高了图像的对比度, 就能更快地找到和测量物体和边缘。

视场内各个位置的分辨率和对比度都各不相同。距离图像中心越远, 分辨率和对比度就会越低。这并非大问题, 因为许多镜头都能在所有FOV位置上展现出优于与它们配合使用的传感器的性能。如果不考虑这一点, 那么在许多应用中, 视场边缘测量的准确性都会受到影响。这可能会导致不合格部件通过检测, 或良好部件未通过检测。

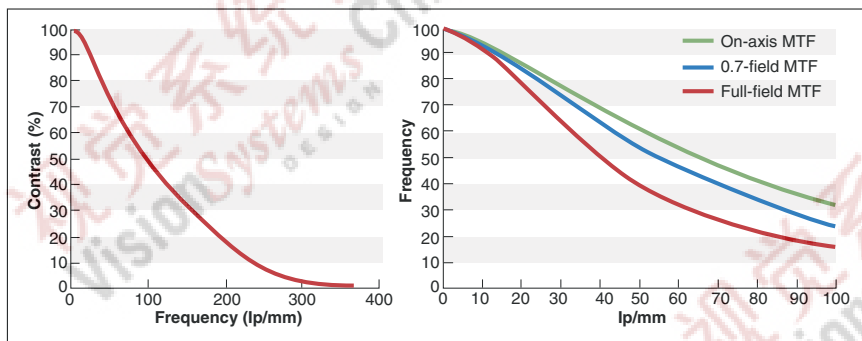


图7: 调制传递函数(MTF)曲线表示镜头在特定频率(分辨率)下再现对比度的能力。由于视场内不同位置的MTF各不相同,因此需要绘制多条曲线才能了解镜头的真正性能。右侧的图表显示了视场内三个位置(中间视场、0.7视场和图像角落的全视场)的MTF。视场内的所有位置(不仅仅是中间)都应该满足应用要求,以确保系统准确性。

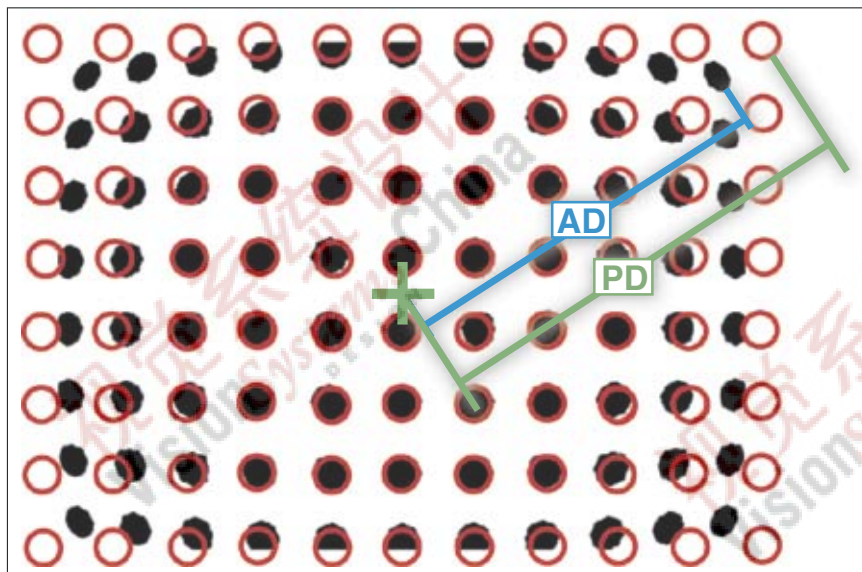


图8: 图中的畸变具有负值,这是因为视场边缘过于靠近图像中心:畸变(%)=实际距离(AD)-预计距离(PD)×100PD。

同样,这一信息也可通过 MTF 曲线表示。

还有一些其他措施也可以提高系统内的镜头性能。如果只使用一种颜色,则不需要考虑色差问题。如果系统不需要在整个光谱上进行色差校正,那么镜头设计将会更加简单。采用单色设计也可能简化照明系统,因为相较于白炽灯,单色 LED 的功率更低、产生的热量也更低。将彩色滤光片与白光光源配合使用也能达到此效果。滤光片能以极低的成本大幅提高系统的能力。

此外,单色光源和滤光片还能进行色彩分析。

景深

镜头的景深(DOF)是镜头在物体位置靠近或远离最佳焦点时,保持所需图像质量的能力。景深也适用于具有一定深度的物体,因为高景深的镜头可以清晰呈现整个物体的图像。当物体放置得过近或过远而偏离工作距离时,镜头就会失焦,分辨率和对比度也都会受到影响。因此,只有同时定义了关联分辨率和对比度的 DOF

才有意义。

标准行业惯例是利用从衍射极限所计算得出的单一值来指定 DOF。但是,很难真正对镜头进行比较,因为许多成像镜头都没有衍射极限。尽管两个镜头可能具有相同的 f 数(如相同的衍射极限),但它们不一定具有相似的性能或可比较的 DOF。对于对景深有极高要求的应用,最好联系镜头制造商定制。

畸变

畸变是一种几何光学误差(像差)。在畸变中,有关物体的信息只是在图像中发生了错位,而非真正丢失。畸变可能具有几种不同的形式:一种是单向畸变,也就是从图像中心向边缘偏移的一致性正/负畸变。单向畸变具有两种形式:桶形(负)和枕形(正)。

非单向畸变在从视场中间偏移到边缘的过程中会反复发生正负畸变。非单向畸变可能是由镜头设计过程中,为减少镜头总体畸变而产生的特殊结果,或者与设计类型相关的特别因素导致。在单向和非单向设计中,畸变与偏离视场中心的距离之间没有直接关联。

无论畸变是否为单向,都可以通过软件对其分析消除,从而准确测量图像。可使用测量软件和已知尺寸的圆点目标,测量偏离图像中心不同距离的畸变(见图8)。完成测量后,可以在图像中对畸变进行处理,或者在测量时将畸变因素考虑在内。去除图像畸变或重新绘制图像可能需要耗费大量处理器资源。很多时候,只需简单使用畸变计算即可,而且这还有助于缩短处理时间。

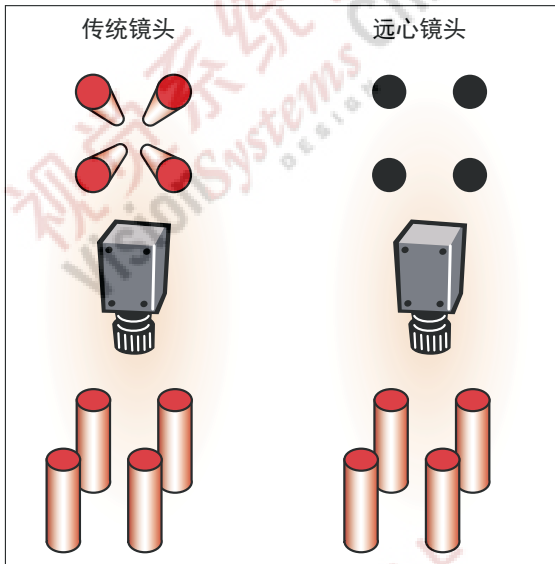


图9: 柱面轴与光轴平行的柱面物体在远心镜头的图像平面中显示为圆形。使用非远心镜头时, 同一物体看起来将处于倾斜状态; 物体上方显示为椭圆形而非圆形, 可以看见侧壁。

远心度

视角误差, 也称为视差, 是人类日常体验的一部分。实际上, 大脑需要通过视差来解释三维世界。近处的物体相对于远处的物体显得更大。传统的成像系统中也存在这种现象。在这些系统中, 物体的放大倍率会随其偏离镜头的距离而变化。远心镜头会对这种情况进行光学校正, 让物体无论距离镜头多远, 看起来都一样大。该效果运作的距离范围由镜头定义。

那么, 为什么需要远心度? 它有哪些优点、缺点和限制? 许多应用都需要远心度, 因为它能在一定范围的工作距离内提供近乎稳定一致的放大倍率, 几乎可以消除透视角误差。这意味着物体移动不会影响图像的放大倍率。在具有物方远心度的系统中, 物体朝向或背向镜头移动不会导致图像变大或变小, 深度或广度沿光轴延伸的物体, 看起来不会有倾斜感(见图9)。

在具有像方远心度的系统中, 移

动图像平面以聚焦系统或有意使系统失焦不会改变图像尺寸。这一属性是光刻行业的基础, 在该行业, 特征尺寸容差一般小于 $0.1\mu\text{m}$ 。此外, 像方远心度可以产生极为均匀的图像平面照明。因为所有的主光线都与图像平面呈 θ 角, 因此不会再出现光轴到视场边缘平时会出现的图像平面照明 $\cos^4\theta$ 衰减。

不过, 远心镜头也存在一些固有的不足。首先, 远心度区域内(图

像侧或物体侧)的光学元件的尺寸常常变大。在双远心设计(物方和像方)中, 最前和最后几组镜头需要分别比物体和图像更大。例如, 如果物体为 100mm^2 , 并且需要使用远心镜头观察, 则镜头系统前端元件的尺寸必须大大超出部件的对角线长度, 这样才能提供无渐晕的物体视场。该物体的对角线约为 6in. , 因此镜头的直径应该超出 6in. 。这样的镜头非常大、非常重, 安装时需特别小心。在将机器安装到相应位置前, 必须先考虑其尺寸。

对于DOF和远心度的常见误解是认为它们的DOF比普通镜头更大。实际上, 远心度并不代表大DOF, DOF只取决于F数和分辨率。使用远心镜头时, 物体在离开最佳焦距之后还是会变得模糊, 不过是以对称的方式模糊, 因此也有一定的好处。只要物体的特征在远心工作距离之内, 放大倍率就不会改变。换言之, 特征靠近镜头时并不会比远离镜头时显得更大。

在使用较大传感器幅面或行扫描相机的应用中, 必须考虑 $\cos^4\theta$ 衰减。对于要在相当短的工作距离内获得较大FOV的应用, 也需要考虑这种衰减。从本质上说, $\cos^4\theta$ 衰减是聚焦在图像中心与图像边缘的光线的相对差异。它通过计算图像中心的主光线与图像边缘的主光线所形成夹角的 \cos^4 确定。在许多应用中, 这并不是太大的问题, 但如果这些夹角大于 30° , 则可能会难以处理。在行扫描应用中尤其如此, 因为在此类应用中, 系统可能由于曝光时间较短而出现光线不足的情况。将系统推离到过远的位置可能会产生以下不良后果:

$$\theta = 30^\circ \quad \text{相对照明} = 0.56$$

$$\theta = 45^\circ \quad \text{相对照明} = 0.25$$

$$\theta = 60^\circ \quad \text{相对照明} = 0.06$$

对于工作距离极短但又试图获得相对较大FOV的系统, 必须时刻注意衰减, 因为这种设计可能会在镜头图像侧形成较大的夹角, 而且这与传感器尺寸无关。可以通过将镜头设计为像方远心来控制衰减。市面上的像方远心镜头数量有限, 因此可能需要定制解决方案。

另一个抵消衰减的方案是在物体本身创建不均匀的照明。可以在靠近物体边缘的位置调配更多光线, 或者在光源前端添加中性密度的滤光片, 从而降低物体中间的相对照明。

最后, 尽管要构建一个完整的系统, 但必须了解其中的每个元件才能达到理想效果。所使用的光学元件可以显著影响整个图像的质量, 确保准确性和重复性, 并且提高系统的总体速度。应用成功的基础是完全承认没有哪个镜头可以解决所有应用问题。⊕