



机器视觉工程师必须知道的

工业镜头 36 问

目录

1、工业镜头都有哪些重要参数?	3
2、什么是工业镜头的焦距?	3
3、什么是工业镜头的视场角?	3
4、视野和焦距的计算关系是怎样的?	3
5、什么是工业镜头的光圈数?	4
6、什么是工业镜头的景深?	4
7、如何确定弥散斑的直径大小?	5
8、如何确定有效 FNO 的大小?	5
9、什么是工业镜头的畸变?	6
10、什么是工业镜头的靶面大小?	6
11、什么是镜头的分辨率?	6
12、怎样搭配镜头的分辨率与相机的分辨率才更有效?	6
13、工业镜头的接口类型有哪些?	7
14、什么是镜头的 MTF 曲线? 怎样看懂 MTF 曲线?	7
15、什么是线阵镜头?	8
16、什么是显微镜头?	8
17、什么是微距镜头?	8
18、什么是远心镜头?	8
19、什么是物方远心镜头?	9
20、什么是像方远心镜头?	9

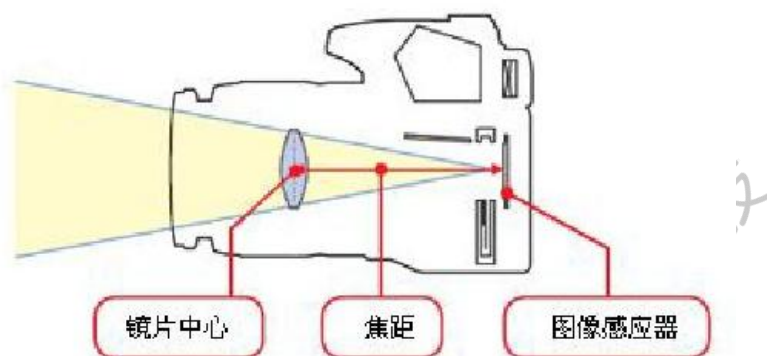
21、物方远心镜头与像方镜头的区别是什么?	9
22、什么是双远心镜头?	10
23、远心镜头与普通镜头的差异是什么?	10
24、远心镜头有哪些特性可以有效的降低噪声及变形?	10
25、远心镜头为什么价格高?	11
26、远心镜头为什么倍率越低镜头价格越高?	11
27、同轴光镜头开启同轴光时, 图像中间亮旁边暗, 是什么原因? 怎样补救?	11
28、拍摄精度要达到 $1\mu\text{m}$, 选用什么镜头?	11
29、成像的放大倍率如何计算?	11
30、远心镜头除了 C 口之外, 还有其它的接口形式吗?	12
31、没有专业的测量环境, 在简易条件下对比不同型号的镜头需要从哪些方面考虑?	12
32、简易条件下怎样评价 CCTV 镜头的性能?	12
33、选择合适的工业镜头必须确定哪些需求?	12
34、怎样根据已知需求确定镜头的焦距或者放大倍率?	13
35、什么是变焦镜头? 什么情况下需要选用变焦镜头?	13
36、什么情况下需要选用远心镜头?	13

1、工业镜头都有哪些重要参数?

工业镜头的主要参数有: 焦距、视场角、光圈数、景深、畸变、靶面大小、分辨率、接口类型等。

2、什么是工业镜头的焦距?

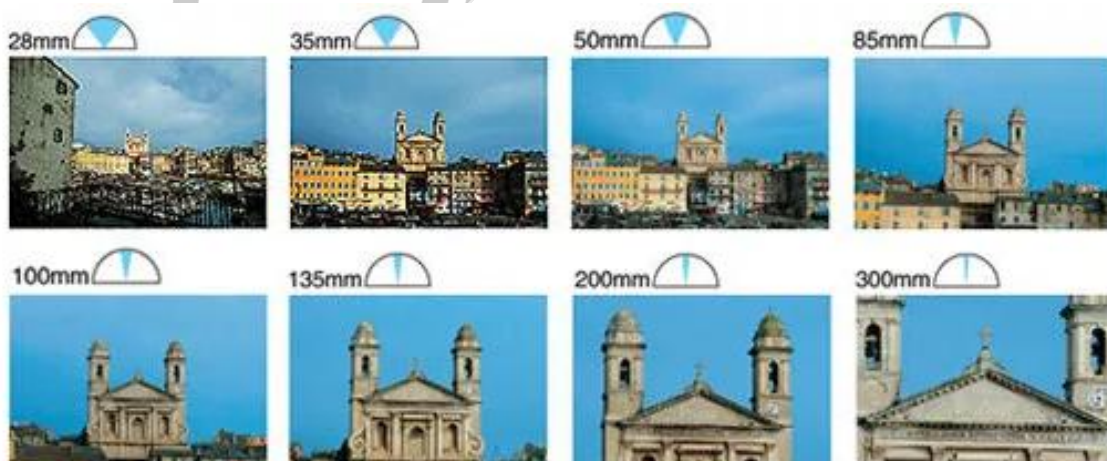
焦距是指平行光入射时从镜头的后侧主点到成像平面的距离, 是光学系统中衡量光的聚集或发散的度量方式。工业镜头的焦距是指焦点到像方主面的距离, 是镜头的主要性能指标之一。目标的成像位置和成像大小由焦距决定。



镜头焦距示意图

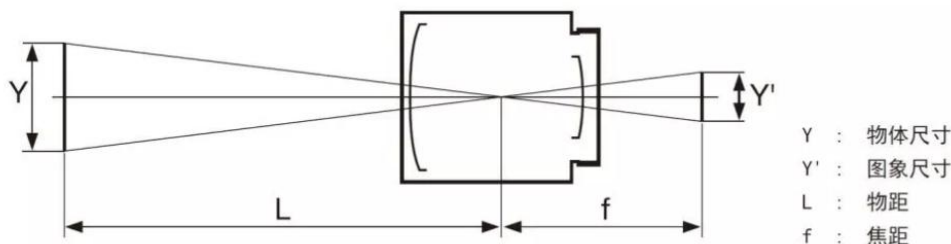
3、什么是工业镜头的视场角?

以光学镜头为顶点, 以被测目标可通过镜头成像的最大范围的两条边缘构成的夹角, 称为视场角。视场角用来衡量镜头的成像范围。镜头焦距决定了视场角的大小。焦距越长, 视场角越小; 相反, 焦距越短, 视场角越大。



4、视野和焦距的计算关系是怎样的?

视野的大小和焦距的大小关系, 通过下图可以简洁明了的展示:



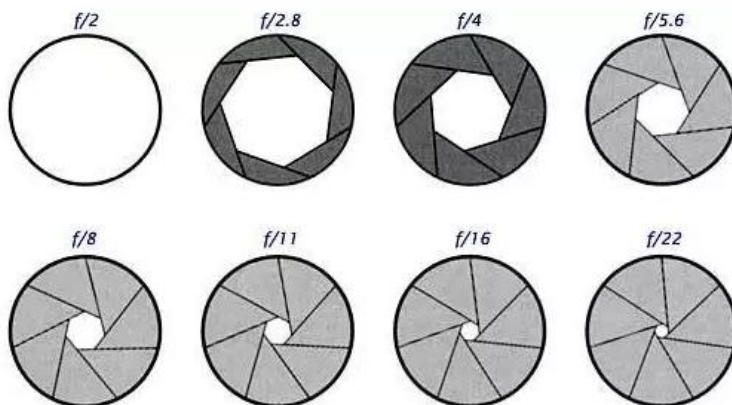
我们利用相似三角形的推断关系可以得出:

1. 视野 $Y = Y' \cdot L / f$
2. 焦距 $f = Y' \cdot L / Y$

由公式可以看出: 在物距一定的条件下, 焦距越长, 视场越小, 即视场角越小; 相反, 焦距越短, 视场越宽广, 即视场角越大。

5、什么是工业镜头的光圈数?

光圈数又称为光圈 F 值, 用来衡量镜头光圈的大小, 是镜头焦距与镜头孔径 (入瞳直径) 之比。它描述的是闭合值而不是打开值。光圈数 F 值越小, 光圈也就光的越小, 即打开的越大, 进入系统的光线越多, 图像越亮。



光圈大小与光圈F值的关系

6、什么是工业镜头的景深?

景深, 即 DOF (Depth Of Field), 指在感光芯片上能获得清晰成像的物距范围。景深的理论计算公式为:

$$\text{景深} = 2 \times \text{有效 FNO} \times \text{弥散斑直径} \div \text{倍率}^2$$

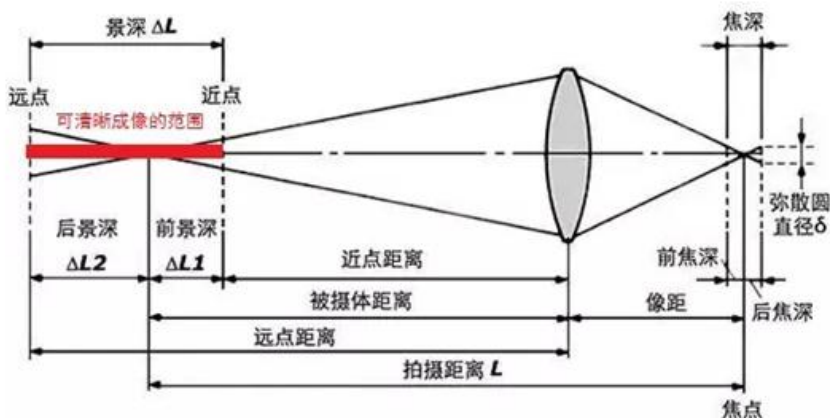
从公式可以看出, 景深与“有效 FNO、弥散斑直径、倍率”三个参数有关。倍率越大, 景深越小。光圈越大, 有效 FNO 越小, 景深越小。弥散斑直径越大, 景深越大。

此外, 景深分为前景深和后景深, 计算公式如下:

$$\text{前景深} \Delta L_1 = (\delta \cdot F \cdot L^2) / (f^2 + \delta \cdot F \cdot L)$$

$$\text{后景深} \Delta L_2 = (\delta \cdot F \cdot L^2) / (f^2 - \delta \cdot F \cdot L)$$

$$\text{景深} = \Delta L_1 + \Delta L_2$$



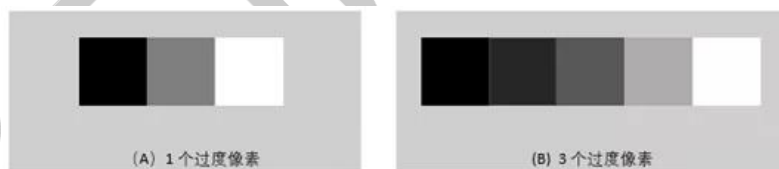
上图左侧红色范围即为景深

由上可知, 在其他条件不变情况下:

1. 光圈数 F 值越大, 光圈越小, 景深越大; 反之, 景深越小。
2. 镜头焦距 f 越短, 景深越大; 反之, 景深越小。
3. 物距 L 越大, 景深越大; 反之, 景深越小。
4. 后景深大于前景深。

7、如何确定弥散斑的直径大小?

弥散斑直径的定义, 在实际应用中, 我们通过去数有几个过渡像素来判断图像是否可接受。如下图, (A) 中从黑到白仅 1 个过渡像素, (B) 中从黑到白有 3 个过渡像素。假设在实际项目中, 可接受的过渡像素是 3 个, 那么此 3 个过渡像素的长度就作为弥散斑的半径, 此时计算该应用中的景深所用的弥散斑直径就是 $2 \times 3 \times$ 像元尺寸。



8、如何确定有效 FNO 的大小?

我们在计算景深的理论值时, 会用到公式:

$$\text{景深} = 2 \times \text{有效 FNO} \times \text{弥散斑直径} \div \text{倍率}^2$$

其中有效 FNO 的值按照以下方式确定:

1. 对于远心镜头, 厂商会直接给出“有效 FNO”的值, 直接使用此值即可;
2. 对于微距镜头和 CCTV 镜头, 厂商会给出“FNO”的值, “有效 FNO”与“FNO”的换算公式如下:

$$\begin{aligned} \text{有效 FNO} &= \text{FNO} \cdot [1 + \text{倍率} \cdot (\text{入瞳直径} \div \text{出瞳直径})] \\ &\approx \text{FNO} \cdot (1 + \text{倍率}) \end{aligned}$$

3. 对于 CCTV 镜头, 在不加接圈时, 倍率一般都会小于 0.1 倍, 此时可用“FNO”代替“有效 FNO”。

9、什么是工业镜头的畸变?

畸变指光学系统对被摄物所成的像相对于物体本身的失真程度。畸变分为桶形畸变和枕形畸变。



失真度也叫图像与实际画面的差异度,是利用图像上的点到图像中心位置的距离与标准图像(即未失真的图像)上的实际距离之间的差异来计算的。再好的镜头也无法避免失真度。例如,在标准图像上一个点与中心的距离是 200 个像素,但在实际图像中是 198 个像素,则失真度为:

$$(198-200) \div 200 = -2 / 200 = -1\%$$

正向放射性失真被称为枕形失真,负向放射性失真被另称为桶形失真。图像的失真可被看做真实画面经过二维几何性变形的结果,由于通常不是线性改变,而是二或三度的多项式变形,图像会被些许的拉扯及扭曲。

10、什么是工业镜头的靶面大小?

工业相机的靶面大小指图像传感器的对角线尺寸。镜头的靶面尺寸一般指镜头所能匹配的最大的相机靶面大小。在选择镜头时,需保证镜头靶面尺寸大于或等于相机的靶面尺寸。若镜头靶面尺寸过小,则图像边缘会出现暗角现象。

11、什么是镜头的分辨率?

镜头的分辨率指镜头每毫米能分辨出的黑白相间的线对数,单位是 lp/mm (每毫米线对数)。它体现了镜头清晰的再现被拍摄物体细节的能力,是评价镜头质量的一个重要参数。分辨率越高,所拍摄的图像越清晰细腻。

镜头之所以存在分辨率,是因为像差和衍射导致的,使从“物”到“像”发生了失真。“点”经镜头成像后不再是一点,而变成一个光斑。分辨率受镜头的结构、材质、加工精度等因素的影响。一般来讲,镜头的相对孔径越大、光波波长越短,分辨率越高;同档次定焦比变焦分辨率高;短焦镜头一般边缘较中心低;长焦镜头一般中心较边缘低。

理想光学系统的最小分辨率公式为:

$$b = (0.61\lambda) / n \cdot \sin\omega_{\max}$$

其中 λ 为光波波长, n 为像空间介质折射率, ω_{\max} 为像方孔径角。

12、怎样搭配镜头的分辨率与相机的分辨率才更有效?

假设使用 0.5x 的镜头拍摄 22 μ m 的物体,经过镜头后变成 11 μ m 的像,如果相机的像元大小是 2.2 μ m,那么要用 11 μ m/2.2 μ m = 5 个像素来显示。单位距离的像要用 5/11=1/2.2 个像素来显示。

即相机图像分辨率为 $1/2.2$ (单位 $\text{pixel}/\mu\text{m}$)，实际就是像元尺寸的倒数。从这个推导中我们得出像元尺寸越小，单位距离内相机的分辨率越高。

镜头分辨率跟相机分辨率有效的匹配方法有两种：

方法一：用物方分辨率乘以镜头放大倍率，得到像方分辨率；用算得的像方分辨率跟 2 倍的像元尺寸作比较：

1. 如果镜头像方分辨率 = 2 倍的像元尺寸，说明匹配刚刚好，谁都不浪费。
2. 如果镜头像方分辨率 > 2 倍的像元尺寸，则浪费了相机的分辨率。
3. 如果镜头像方分辨率 < 2 倍的像元尺寸，则浪费了镜头的分辨率。

举个例子，相机的像是 $10\mu\text{m}$ ，那么：



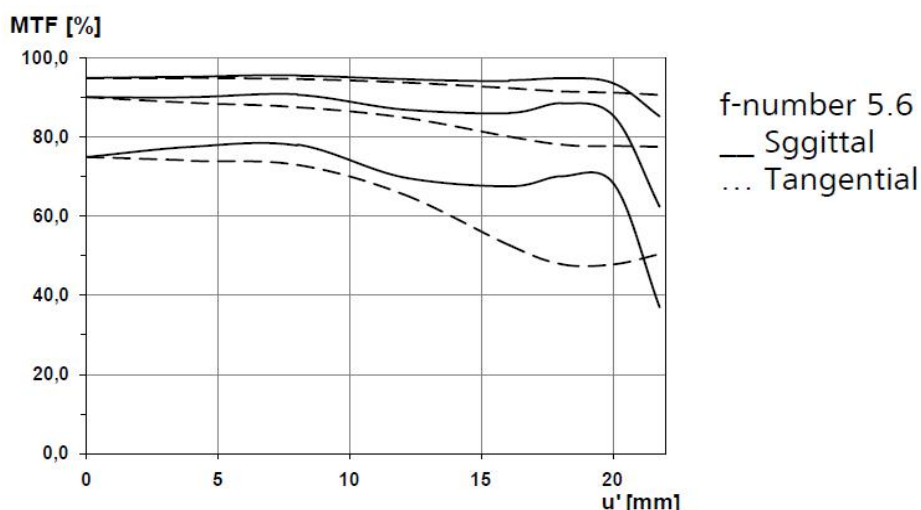
方法二：镜头分辨率表示为每毫米线对数 LP/mm 。假设镜头的分辨率是 $n \text{ LP}/\text{mm}$ ，那么必须保证感光芯片上每毫米有 $2n$ 个像素，才能充分发挥镜头的分辨能力。例如镜头分辨率是 $200\text{LP}/\text{mm}$ ，用每毫米有 400 个像素的感光芯片才不会浪费镜头的分辨率，计算下来像元尺寸大小为 $2.2\mu\text{m}$ ，选用像元大小为 $2.2\mu\text{m}$ 的相机合适。

13、工业镜头的接口类型有哪些？

工业相机常用的镜头接口都有国际标准，接口类型的不同和镜头性能及质量无直接关系。最常见的三种接口类型是 C 口、CS 口、F 口。随着相机靶面的逐步增大，现在也出现了 M42、M58、M72 等接口，在不影响成像靶面和通光量的前提下，它们都可以通过某些转接环转变成 F 口。另外还有 Schneider 公司专用的 V 口，主要用于大靶面或一些特殊用途中；Canon EF 口，一般需要自动聚焦自动光圈时会考虑此接口。

14、什么是镜头的 MTF 曲线？怎样看懂 MTF 曲线？

MTF 的全称是 Modulation Transfer Function，俗称“调制传递函数”。MTF 综合反映了镜头的反差和分辨率特性，它是用仪器测量的，可以完全排除胶片等客观因素的影响和人工判读的主观因素影响，是很客观很准确的一种镜头评价方法。



看懂 MTF 曲线可以分为三步:

- 1. X、Y 坐标的含义:** 横坐标 0 代表为镜头中心, 另一侧代表镜头边缘; 纵坐标从 0 到 100 为镜头性能百分数。MTF 曲线越高, 代表了镜头 MTF 得分越高, 性能越好。MTF 下降的越缓慢, 代表了镜头中心和边缘的一致性越好。
- 2. 实线、虚线的含义:** 实线表示平行于直径方向产生的 MTF 曲线, 称为弧矢曲线, 标为 S (Sagittal); 虚线表示垂直于直径方向产生的 MTF 曲线, 称为子午曲线, 标为 M (Meridional)。实线和虚线越接近, 代表了镜头子午和弧矢两个方向的 MTF 表现越接近, 镜头性能越好。
- 3. 不同的实/虚线组:** 代表着不同疏密程度下 (如 10lp/mm 或者 30lp/mm 或者频率更密集的线对) 的 MTF 性能表现。高密度的 MTF 曲线得分越高, 代表了镜头可观测细小物体能力更强。

15、什么是线阵镜头?

配合线阵相机使用的镜头就是线阵镜头。从成像的角度讲, 线阵镜头和其它类型的镜头并没有本质的差异。只是对镜头的使用方式不同而已。

16、什么是显微镜头?

显微镜头一般使用在高分辨率的场合, 为了看清目标的细节特征。它们基本的特点是工作距离短, 放大倍率高, 视场小。成像比例大于 10:1, 但由于现有工业相机像元尺寸已做到 3 μ m 以下, 所以一般成像比例大于 2:1 时也会选用显微镜头。

17、什么是微距镜头?

专门用来近物距成像的镜头。成像比例 2:1~1:4 的范围内特殊设计的镜头。在对图像质量要求不是很高的情况下, 一般可采用在普通镜头和相机之间加近摄接圈的方式或在镜头前加近拍镜方式来达到微距镜头的效果。

18、什么是远心镜头?

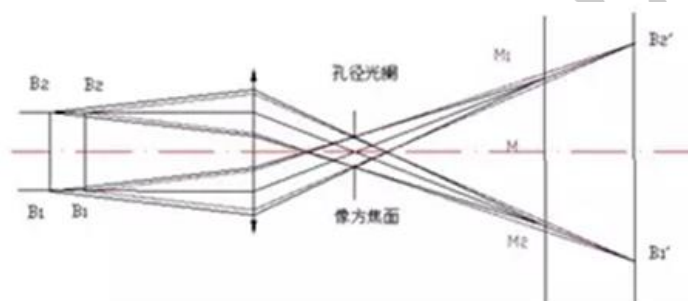
对于传统镜头, 物体离相机越近图像看起来越大, 物体离相机越远图像看起来越小, 这在高精

度测量应用中是一个不利因素。为了克服这个问题,诞生了远心镜头。远心镜头就是为纠正传统镜头的视差而特殊设计的镜头,它可以在一定物距范围内使图像放大倍率不会随物距变化而变化,以便获得大小相同的物体图像,图像大小与物体在空间中的位置无关。这对被测物不在同一物面上的情况是非常重要的应用。

相比于传统镜头,远心镜头通常体积较大且比较昂贵,因为它需要较多的镜头元件,并且镜头需要与被成像的物体一样大。目前市场上有三种类型的远心镜头——物方远心镜头、像方远心镜头和双远心镜头。

19、什么是物方远心镜头?

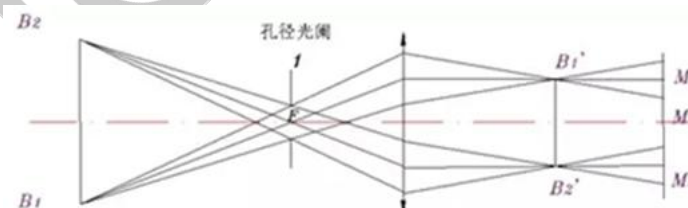
物方远心镜头是将孔径光阑放置在光学系统的像方焦平面上,如下图所示。当孔径光阑放在像方焦平面上时,即使物距发生改变,像距也发生改变,但像高并没有发生改变,即测得的物体尺寸不会变化。



物方远心透镜在物体侧是远心的。像的大小对物距不敏感,但对像距很敏感,可以消除相机感光芯片位置不准或者由于调焦不准带来的测量误差。

20、什么是像方远心镜头?

像方远心光路是将孔径光阑放置在光学系统的物方焦平面上,而像方的主光线平行于光轴。如下图。即使感光芯片的安装位置有改变,在感光芯片上投影成像大小依然不变。



像的大小对物距很敏感,但对像距不敏感,可消除物距变化带来的测量误差。像方远心镜头更常用于图像投影设备中,在机器视觉领域的应用较为少见。例如在光刻系统中,投影镜头是典型的像方远心镜头,用于将光刻掩模成像到硅晶片上。这种像方远心镜头的优点是,它们能在视场范围内提供均匀的光透射。

21、物方远心镜头与像方镜头的区别是什么?

在测量系统中,物距常发生变化,从而使像高发生变化,测得的物体尺寸也发生变化,即产生了测量误差;另一方面,即使物距是固定的,也会因为感光芯片敏感表面不易精确调整在像平面上,

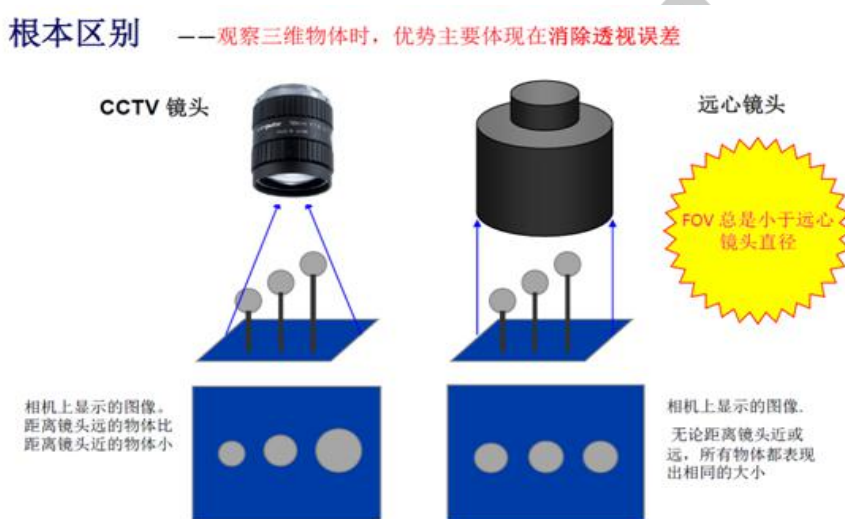
同样产生测量误差。为了解决上述问题,可以采用远心镜头。其中像方远心镜头可以消除物距变化带来的测量误差,而物方远心镜头则可以消除感光芯片位置不准带来的测量误差。

22、什么是双远心镜头?

双远心镜头在物体侧和成像侧都是远心的,即使在相机不能保证总是处于光路中的精确位置的情况下,双远心镜头也能提供恒定的放大率。这种双远心镜头经常与准直背光光源一起使用,以保证高对比度图像,从而实现精确的图像测量。

23、远心镜头与普通镜头的差异是什么?

远心镜头与普通镜头的直观对比如下图所示:



普通工业镜头目标物越靠近镜头(即工作距离越短),图像就越大。在使用普通镜头进行尺寸测量时,会存在如下问题:

1. 由于被测物体不在同一个测量平面,造成同一被测物体不同部位放大倍率不同,产生“视差”;
2. 镜头的解析度不高;
3. 镜头畸变较大;
4. 由于视觉光源的几何特性,造成的图像边缘位置的不确定性。

远心镜头可以有效的解决上述问题,用于高精度测量。

普通镜头优点是成本低、实用、用途广,缺点是放大倍率会有变化有视差,一般用于大物体成像。远心镜头的优点是放大倍数恒定、不随景深变化而变化、无视差,缺点是成本高、镜头尺寸大、重量重,用于高精度测量。

24、远心镜头有哪些特性可以有效的降低噪声及变形?

1. 放大倍率的一致性

在远心系统内,唯有与轴心平行或接近平行的光束会被接受。远心镜头能容许一定程度的距离改变,在“限定景深”或“远心度区间”内,影像不会因物体与镜头间距离的改变而放大或缩小。由于只有与光轴平行的光束会被接收,因此远心镜头必须大于或等于被摄物体的直径。

在远心系统内, 成像大小的变化取决于“telecentric 曲线”, 一个高品质远心镜头的曲线角度 δ 能趋近于 0.1° (0.0017rad), 代表当物体移动 1 毫米 ($\Delta s=1\text{mm}$) 时, 其成像将只会有 $\Delta H = \Delta s \cdot \delta = 0.0017$ 毫米的改变。因此相较于标准镜头, 远心镜头能将放大倍率的误差缩小至 1/10 或甚至 1/100。

2. 低失真度

一般镜头会有几度甚至几十度的失真度, 但高品质的远心镜头只具有低于 0.1% 的失真度。虽然这个数看起来很小, 但在高分辨率相机下仍能造成将近一个或者几个像素的误差。如果此时还不能容忍, 就必须做软件校正。另外必须格外留意物体与镜头的距离, 物体和远心镜头之间必须尽量保持垂直以避免梯形性失真。

3. 视角误差

使用一般镜头拍摄管柱形物体时, 管柱顶端与底端会成被拍摄成同心圆而非重叠的两个圆, 这就是视角误差。只接收平行光束的远心镜头则不会有同样的问题, 管柱顶端与底端会完全重叠。一般镜头通常会将 3D 物体的立体影像包括空间距离转换成 2D 图像, 而远心镜头只会纪录 2D 平面影像而不受物体的立体距离影响, 这个特性在影像量测系统中具有极大的优势。

4. 高分辨率

远心镜头的高分辨率搭配高分辨率相机得到更优秀的图像。

5. 锐利的边缘成像

拍摄图像时, 背景的强光会与物体边缘的阴影重叠, 除此之外, 当光线从不同角度投射到物体上时, 某些光源被物体反射后仍然被镜头所接收, 从而造成边缘判定上的误差。这个问题在远心镜头下能被明显的改善, 当光圈缩小时, 只有与光轴平行的光束能通过镜头, 图像的精准性也就能明显提升。另外, 有一些远心镜头搭配有自己的同轴或者点光源, 让噪声能大幅的降低。

25、远心镜头为什么价格高？

相比于普通镜头, 远心镜头通常体积较大且比较昂贵, 因为它需要较多的镜头元件。

26、远心镜头为什么倍率越低镜头价格越高？

远心镜头为了要减少失真, 只让平行光进入, 镜头必须设计的比被照物体大, 因此低倍率镜头口径都很大, 所需的镜头原件数量更多、材料成本更高, 所以镜头价格更高。

27、同轴光镜头开启同轴光时, 图像中间亮旁边暗, 是什么原因? 怎样补救?

同轴光镜头的投射光线集中于中心 5~6mm 左右。如果看的范围较大, 边缘附近光线较暗, 这是低倍率同轴光镜头常有的现象。可以外加环形光源来弥补光线不足的地方。

28、拍摄精度要达到 $1\mu\text{m}$, 选用什么镜头?

拍摄精度要达到 $1\mu\text{m}$, 必须用高倍显微物镜, 工作距离变得很小 (毫米量级)。

29、成像的放大倍率如何计算?

放大倍率 = 感光芯片的横向尺寸 / 目标视野的宽度

或者

放大倍率 = 感光芯片的纵向尺寸 / 目标视野的高度

30、远心镜头除了 C 口之外，还有其它的接口形式吗？

除了 C 口之外，还有 $\phi 17\text{mm}$ 和 $\phi 12\text{mm}$ 二种接口，是针对笔型相机专用的镜头。

31、没有专业的测量环境，在简易条件下对比不同型号的镜头需要从哪些方面考虑？

1. 远心度：在做非平面测量时，影响镜头消除透视误差的能力。这个性能是无法用软件来做任何校正的，必须从硬件上来保证。因此这个参数对评价远心镜头性能而言，十分重要。
2. 传递函数 MTF：俗称清晰度。表征着镜头每个位置的成像能力好坏。MTF 也必须从硬件上来保证的，这个参数对评价镜头（包括远心镜头和非远心镜头）极其重要。
3. 畸变率：近几年图像处理软件标定算法已十分成熟，畸变通常都可被软件标定校正。这个参数可从硬件上优化，也可从软件上优化，故其重要性下降。
4. 相对照度：是表征镜头成像中心到边缘亮度明暗变化的参数。是肉眼最易直接观察到的参数，其重要性相对较低。

不同型号的镜头做对比测试时，要保证使用相同的相机，相同的曝光时间，相同的光源亮度，相同的镜头光圈，相同的视野（不同的镜头在相同倍率时工作距离可能会有差异，保证相同的视野是最准确的）。

32、简易条件下怎样评价 CCTV 镜头的性能？

需要用到的工具有直尺、分辨率测试板、畸变率测试板（实心圆或者棋盘格都可）。

操作步骤：

1. 观察不同品牌镜头的包装、做工、内部是否有微小杂质等。这些小细节，通常能体现品牌的品质管控水平。
2. 缺乏 MTF 测试设备时，可用分辨率测试板放在视野的不同位置，拍摄多张图片，进而判断出镜头在不同位置时成像的分辨率和对比度好坏。
3. 拍摄畸变测试板（棋盘格或者实心圆都可），然后用图像处理软件获取每个圆或者格子的中心位置，与标定板的已知位置做比较，从而获得畸变数据。

这几个参数是独立的，判断时应避免因为一个参数而否定其它参数。

33、选择合适的工业镜头必须确定哪些需求？

1. 目标视野的大小和工作距离：以此确定镜头的焦距大小或者光学放大倍率。
2. 相机感光芯片的大小：确定镜头的靶面大小。
3. 相机的镜头接口类型：必须匹配或者有可行的转接手段。
4. 相机的像元尺寸：确定镜头的分辨率是否合适。
5. 景深要求：景深有要求的项目，尽可能使用小的光圈。如果项目要求比较苛刻时，倾向选择高景深的尖端工业镜头。

6. 注意与光源的配合, 选配合适的工业镜头。
7. 可安装空间: 以此考虑镜头的尺寸。

34、怎样根据已知需求确定镜头的焦距或者放大倍率?

镜头的焦距, 取决于物体距相机或者镜头系统的工作距离、所要求的视野和相机靶面的尺寸。镜头的焦距可由以下公式确定:

1. 普通镜头:

$$\text{焦距 } f = (L \times Np) \div (Zw + Np)$$

注: Zw 为视野宽度, Np 为相机靶面长度, L 为工作距离即物距

2. 远心镜头:

$$\text{倍率 } m = h' / h = L' / L$$

$$\text{焦距 } f = L / (1 + 1/m)$$

注: L 为物距, L' 为像距, h 为物高, h' 为像高

35、什么是变焦镜头? 什么情况下需要选用变焦镜头?

变焦镜头是指焦距不是一个固定的值, 而是一个范围, 例如 3.5~8mm 或 6.5~52mm, 镜头的焦距可以在这个范围内调节。对于给定的工作距离, 变焦镜头要达到调节视野大小的目的, 通常会调节镜头的焦距、光圈和重新聚焦。

在某些应用中视野的大小可能会随时改变, 这种情况下要选择变焦镜头。除此之外, 尽量选择定焦镜头。定焦镜头因为使用更少的光学元件, 具有低光学失真和相对便宜等优点, 在机器视觉系统中被广泛使用。

36、什么情况下需要选用远心镜头?

如果机器视觉系统的最终目标是在小视野范围内实现高精度的测量、定位等目标, 推荐使用远心镜头。

联系我们: 北京志强视觉科技发展有限公司
电话: +86 (010) 80482120
传真: +86 (010) 80483130
邮箱: 51camera@51camera.com.cn
网址: www.51camera.com.cn