

了解机器视觉系统的镜头选择

根据不同的应用，机器视觉系统集成商可以选择现货、定制或混合镜头设计。

作者：Greg Hollows，Edmund Optics公司机器视觉解决方案总监

工业成像传感器越来越多地将更小的像素纳入到尺寸越来越大的传感器上。因此，对于任何传感器/镜头组合而言，获得最高分辨率的限制因素不是传感器的像素尺寸，而是所需要的光学元件。事实上，现在许多系统需要镜头接近或几乎达到物理定律所决定的性能极限——这项要求对于考虑成本效益的镜头制造商而言，极具挑战性。

从镜头设计的角度来看，理想的选择是：生产一个单独的镜头，该镜头工作于某个特定的视场、特定的工作距离，并且用于一个特定的传感器。虽然这样的镜头设计能够最大限度地减少像差的影响，实现最佳性能；但是这也意味着要针对每项应用的需求，生产定制镜头。

这种做法不符合成本效益，是不切实际的，这也是很多镜头的设计并不是仅仅针对一个视场、一个工作距离和一种传感器尺寸的原因。相反，很多镜头适用于较大的覆盖范围，使得镜头制造具有更大的成本效益，能够满足多种应用的需要。当然，这需要进行一系列权衡，其

中最重要的是，一款镜头将永远不可能在任何特定的视场、工作距离或传感器下实现最佳性能。这种类型的镜头“虽然样样能做，但是样样不精通”，目前市场上的大多镜头产品属于此类。

像差的影响

然而，也有其他选择。为了了解有哪些其他选择，有必要理解哪些因素会影响光学设计。在光学设计中，必须尽可能地降低像色差、畸变、像散、球差和场曲之类的像差。几乎所有的这些像差都与镜头的工作距离、视场与传感器大小的比值（倍率）有直接关系。由于所有这些像差并不是线性相关的，当工作距离、与传感器的距离以及放大倍率改变，和/或传感器的尺寸、视场改变时，镜头的性能也发生变化。然而，当镜头的设计仅针对一个视场、一个工作距离和一个传感器尺寸时，所有这些像差都能获得最大限度的降低。

在这种情况下，工作距离和/或放大倍率的微小变化，都将导致镜

头快速偏离理想性能。在针对各种应用的设计中，目标是在一定范围的工作距离和放大倍率内平衡像差。在性能方面，这类镜头永远无法超越针对特定的工作距离和放大倍率而设计的镜头，但是能在某个特定范围内良好运行。然而，当像素越来越小时，这类设计的缺陷就会变得更加明显。

混合方案

在时间充裕且预算允许的情况下，针对一个具体的工作距离和放大倍率，定制镜头设计能够实现最佳性能。不过，因为情况并非总是如此，因此光学元件制造商们开发出了混合方案。

为了开发混合方案，可以将镜头设计为：元件或元件组之间的间距能够调节。当调节间距后，镜头设计稍有改变，能够在所需的放大倍率和工作距离下获得更好的性能。例如，对于为线扫描传感器而设计的镜头，可能有一个与它相关的特定放大倍率，这种情况下为0.33x（见图1a）。在具有60mm线扫描阵列的

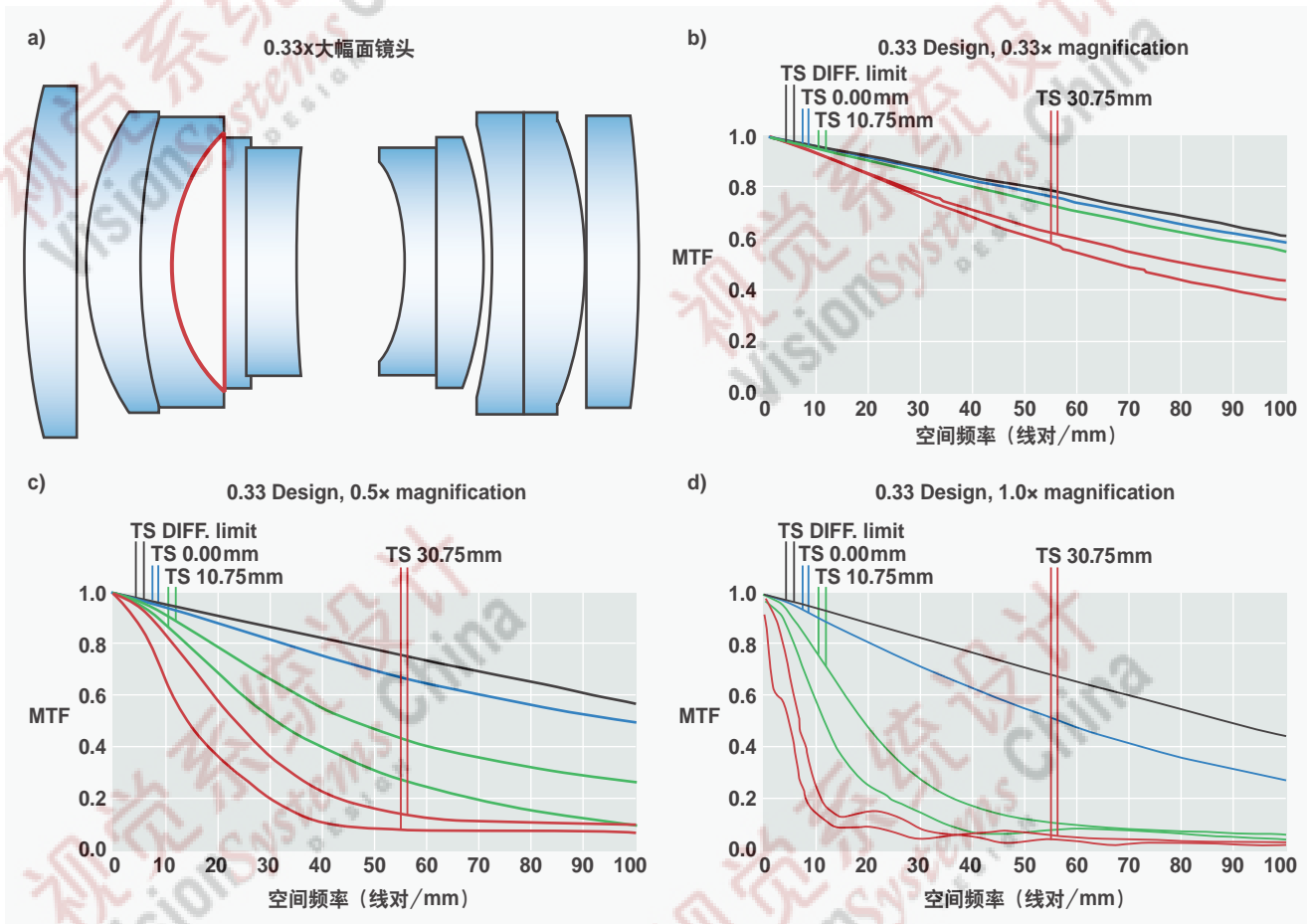


图1: (a) 为线扫描传感器而设计的镜头, 可能有一个与它相关的特定放大倍率, 这种情况下为0.33x; (b) MTF显示了镜头在该放大倍率下的性能; (c) 放大倍率为0.5x (视场为120mm) 时的MTF曲线; (d) 放大倍率为1.0x (视场为60mm) 时的MTF曲线, 可以看出, 这导致了性能的下降。

相机上, 这将产生 180mm 的视场。

通过参考其调制传递函数 (MTF) 曲线, 可以分析镜头的性能, 利用该曲线能够评估多种频率 (以线对 /mm 表示) 下的分辨率和对比度性能 (见图 1b)。这显示了放大倍率为 0.33x 时镜头的相关 MTF 曲线。线对值越高, 表示系统可以实现的分辨率越高。该例子显示了像素大小为 $5\ \mu\text{m}$ 的 12k 线扫描传感器的分辨率。这可以获得 100 线对 /mm 的上限。线对 /mm 简单地表明了 1mm 内有多少组两个像素。两个像素是可以区分镜头产生的信息之间间距的最小样本集。在本例中, 1 个线对

等于 $10\ \mu\text{m}$ ($2.5\ \mu\text{m}$ 像素) 的总间距, 1mm 内有 100 组 $10\ \mu\text{m}$ 。因此 100 线对 /mm 是相机的极限分辨率。

该曲线显示了传感器上不同位置的性能。黑色曲线显示了该镜头的衍射极限, 这是该镜头理论上可以实现的最高性能。蓝色曲线表示传感器中心位置镜头的实际性能; 红色曲线显示的是传感器边缘 (视场边缘) 的性能。绿色曲线表示传感器上的中间位置。图中给出了两条绿线和两条红线, 以突出显示沿着镜头中心位置的弧矢和切线方向的分辨率, 由于一些畸变可能引起非对称效应, 导致在不同方向测得

不同的分辨率。

尽管不能达到理论上的最佳性能, 在整个传感器范围内镜头仍具有良好的性能。如果镜头被移动到更近的工作距离, 以减小视场、实现更高的放大倍率, 镜头的性能将会改变。图 1c 和图 1d 中, 分别给出了放大倍率为 0.5x (视场为 120mm) 和放大倍率为 1.0x (视场为 60mm) 时镜头的 MTF 曲线, 正如所看到的, 这导致性能下降。

为了克服这一缺点, 要求能够调节镜头元件之间的间距。图 2a 给出了相同的镜头系统 (但放大倍率调整为 1.0x) 的光学布局。图 1a 和

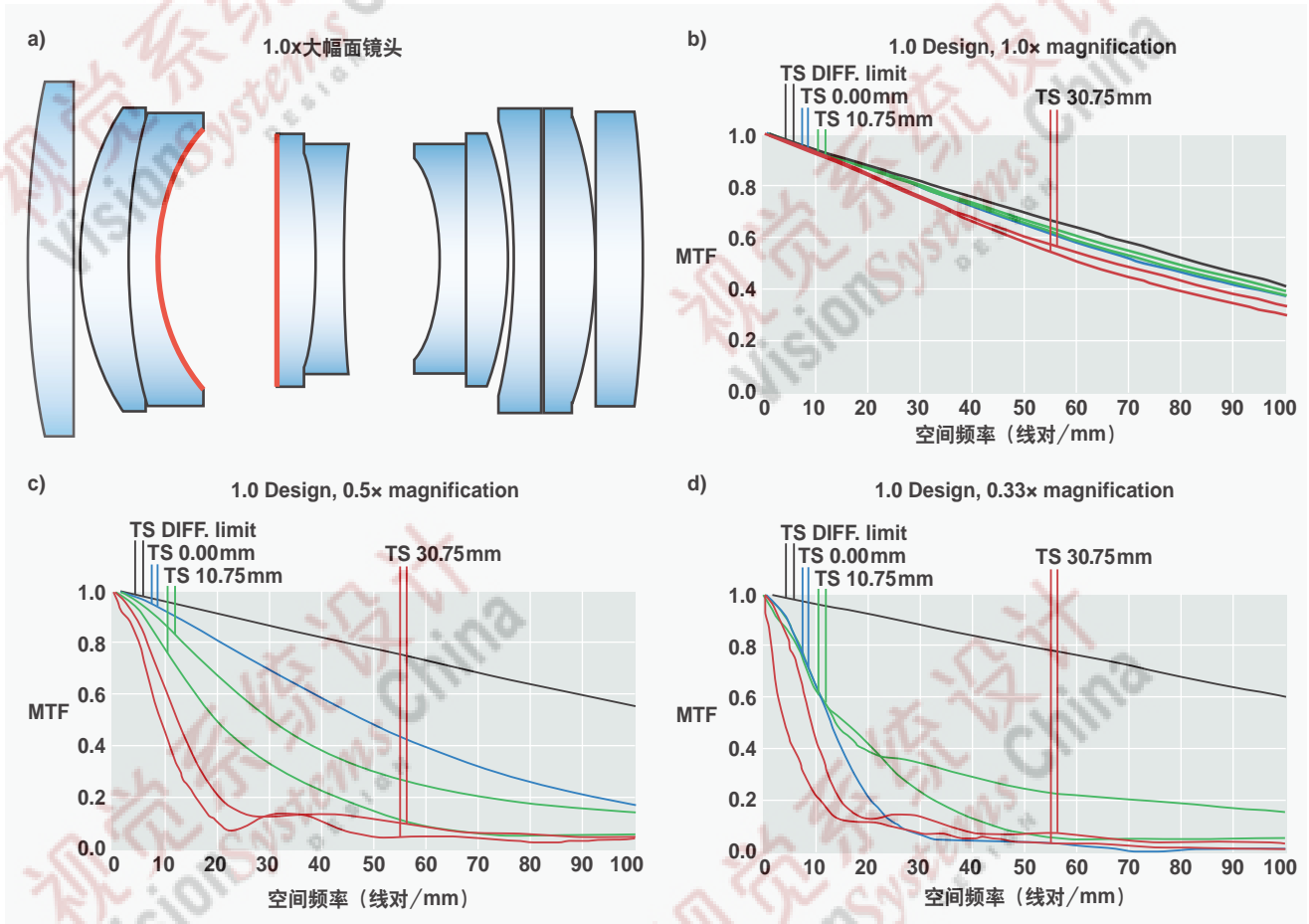


图2: 为了提高性能, 可以调节镜头元件之间的间距。(a) 相同的镜头系统 (但放大倍率调整为1.0x) 的光学布局; (b) 该镜头放大倍率为1.0x时的MTF性能。注意图2b和图1d之间在性能上的极大差异; 设计放大倍率为1.0x 的透镜工作于0.5x的放大倍率和 (c) 0.33x的放大倍率下的MTF曲线。可以再次看到, 当理想的1.0x放大倍率改变时, 镜头的性能迅速变化。

图 2a 中, 用红线标记出了镜头元件之间的间距差别 (本质上改变了空气镜头的厚度), 进而能针对不同的放大倍率进行优化。

图 2b 给出了放大倍率为 1.0x 时镜头的 MTF 性能。请注意图 2b 和图 1d 之间在性能上的极大差异。这两个镜头使用了相同的元件, 并且是同时设计的, 但间距的变化导致性能上产生了巨大差异。图 2c 和图 2d 分别给出了设计放大倍率为 1.0x 的透镜工作于 0.5x 的放大倍率和 0.33x 的放大倍率下的 MTF 曲线。可以再次看到, 当理想的 1.0x 放大倍率改变时, 镜头的性能迅速变化。

与设计单个镜头来满足多种应用相比, 这种混合方案获得了更好的效果, 因此能更加有效地解决许多应用中的问题。使用这种方案, 对于任何给定的镜头设计, 可以获得 2-9 种或更多选择, 以提升系统性能。因此, 现成的解决方案比定制解决方案具有更合适的价格。

虽然这种混合解决方案提升了性能, 但也有自身的缺点。首先, 它仍然无法达到针对一个工作距离和放大倍率的定制解决方案的全部性能水平。此外, 由于像素越来越小, 为了满足系统要求, 对光学元件的要求会更高。其次, 与针对特

定镜头方案的设计类似, 这种混合镜头将会面临性能迅速变化的问题。第三, 如果镜头没有用于与设计放大倍率非常接近的放大倍率下, 将得不到希望的结果。最后, 由于这样的混合方案需要许多不同的镜头, 并且每个镜头都需要一定量的特定材料, 因此其价格将高于通用镜头。此外, 为了搭建所有的特定放大倍率将需要更多的时间, 并且可能有必要使用大的、复杂的安装聚焦配件, 以使传感器 / 镜头系统能按要求工作。☹