

【产品与技术】利用棱镜分光的三传感器短波红外相机

背景

短波红外波段（简称 SWIR，通常指 $0.9\sim 1.7\mu\text{m}$ 波长的光线）能够呈现出许多人眼无法观察到的图像，在工业分选领域具有广泛的应用。例如，不同种类、品质的废旧塑料、坚果壳仁、茶叶、谷物等物体，在可见光下无明显的外观差异，却在短波红外波段的不同光谱中呈现不同的吸收、透过特性，经红外相机拍摄接收到不同的响应信号后，利用事先对相应特性的光谱图像的研究结果，即可对产品的属性做出筛选。

由于物体在短波红外波段的不同波长处有不同的光谱响应特征，在某些分选场景下，需要对不同波长范围进行分别成像，采集相应的光谱特征，从而对物体特性做出更准确的判断。这时候可以采取三路分立的、不同发光波长的红外光源对物体逐一进行照明，相机分别捕捉到三次信号，这种方法的问题是三次信号的捕捉不可能在同一时间进行，拍摄的图像会有所差异。另外一种方式是采用三台配备不同波段滤光片的短波红外相机，同时拍摄被检物体，采集三个波段同一时刻的反射、透射信号，但这种方式最大的问题是三个镜头拍摄的图像存在因拍摄方位不同引起的视差，影像图像的识别判定。

为此，我们开发了利用棱镜分光的单镜头三传感器短波红外相机系统，解决上述两种方案存在的弊病。

技术原理

该系统主要由短波红外镜头、三胶合分光棱镜、带通滤光片及三个图像传感器组成，如图 1。短波红外镜头负责采集 $0.9\sim 1.7\mu\text{m}$ 波段的光线信号，将其传输到三胶合分光棱镜中，再利用分光棱镜各表面的镀膜或全反射特性，将 $0.9\sim 1.7\mu\text{m}$ 的光谱细分为三个波段，分别反射到棱镜的三个出光面。在棱镜的出光面处各置一窄带滤光片，对特定的波长进行选通，最终，镜头采集到的短波红外波段下三个不同波长的图像信号，分别进入了三个传感器。

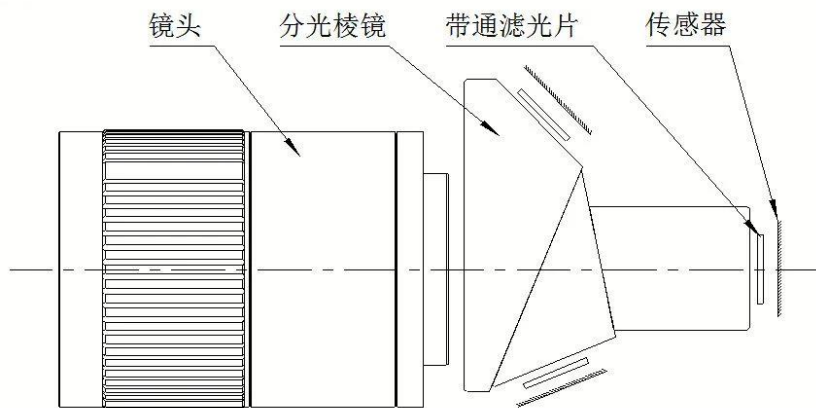


图 1

需要指出的是，三个传感器相对于棱镜的位置并非是随意安放的，而是通过精密装调，达到各传感器中心轴与镜头光轴共轴的效果，所以三个传感器接收到的图像内容是完全一致的，不存在视差。通过后期算法的融合，三路图像信号可以叠加融合为一个画面。和单镜头单传感器的方案相比，核心的不同点在于，系统可以对三个不同波长的光谱信号分别进行独立的处理分析，根据不同波长下的光谱特征，对物体属性做出更精确的分选判断。

具体实施方式

针对 $0.9\sim 1.7\mu\text{m}$ 波段专门设计了宽光谱共焦的短波红外镜头，对该波段的轴向色差、垂轴色差进行了校正，作为工业检测镜头，光学畸变控制在 1% 以内。由于镜头后方需要放置分光棱镜，所以镜头的光学后焦长于常规镜头，这是本项目镜头设计的一个难点，其像差是结合棱镜引入的像差后综合校正的。设计完成后，镜头能够覆盖 $\phi 15\text{mm}$ 的成像圆，匹配 $7\mu\text{m}$ 传感器，MTF 达到了 70lp/mm ，镜头的 MTF、点列斑等图表见图 2。

镜头的镀膜采用 $900\sim 1700\text{nm}$ 的宽带增透膜，且光路采用主动无热化设计，在 $-10\sim 60^\circ\text{C}$ 环境下画面清晰度均不会有明显变化，具有良好的环境适应性。

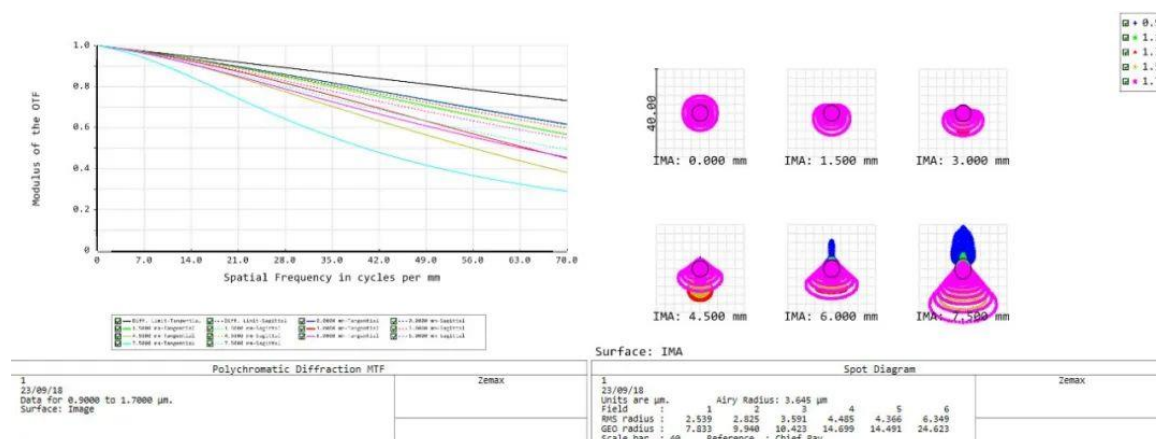


图 2

如图 3 所示，棱镜采用三胶合形式，通过在 S2、S5 两个分光面设计特殊的分光膜层，将整个短波红外波段分为 $900\sim 1150\text{nm}$ 、 $1150\text{nm}\sim 1400\text{nm}$ 、 $1400\sim 1700\text{nm}$ 三个小波段，分别进入 S3、S7、S8 三个出光面。S1 面镀制的是 $0.9\sim 1.7\mu\text{m}$ 整个波段的宽带增透膜，S3、S7、S8 面则分别镀制对应出光波段的增透膜。S2 和 S5 面反射的光线分别到达 S1 和 S4 面时，利用全反射再次反射到 S3 和 S7 面。

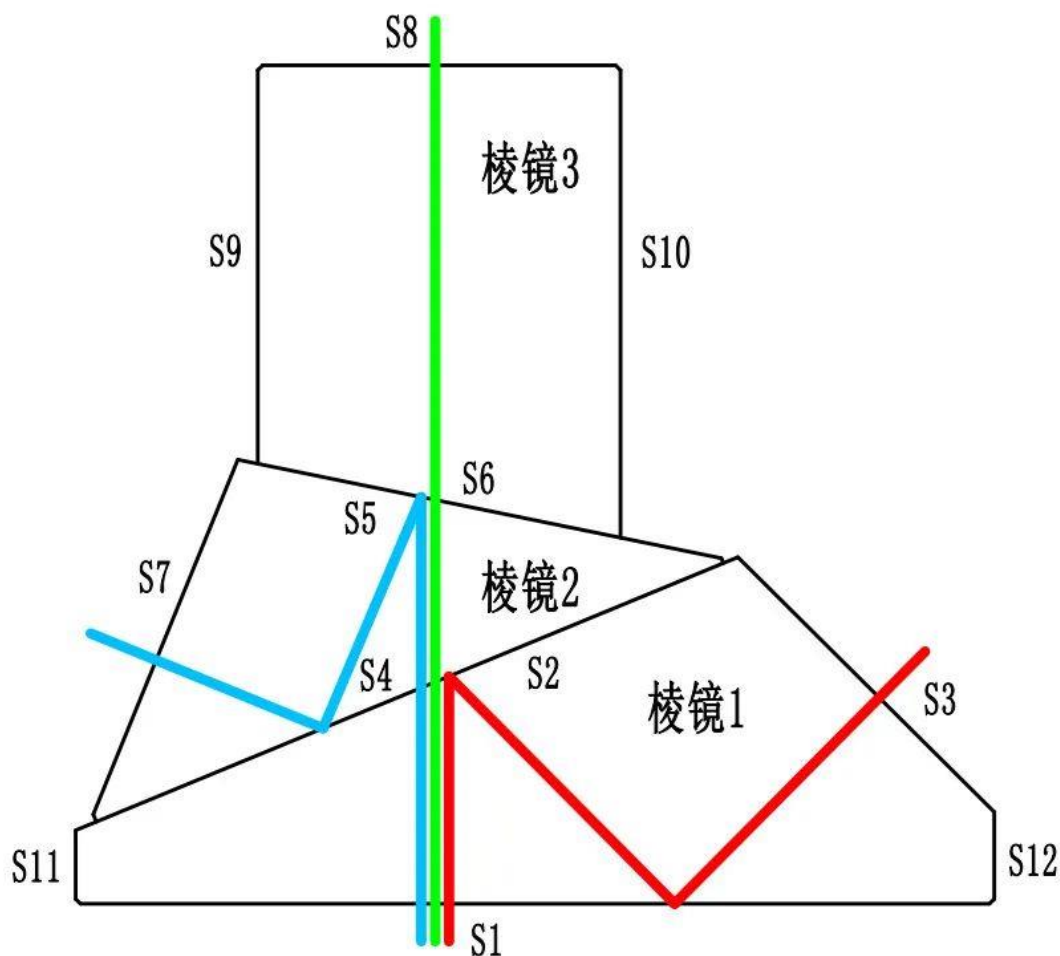


图 3

在棱镜的三个出光方向分别放置三块传感器，将镜头对准靶标进行拍照。若不对传感器位置进行精密调校，三个传感器的成像区域中心和镜头光轴不会严格重合，拍摄到的三幅画面不会完全一样，图像无法融合，更无法对被摄物体光谱特性展开进一步分析。需要先锁定第一块传感器，微调第二块传感器位置，使其图像和第一块传感器的图像完全重合，然后锁定第二块传感器。再用同样的方法微调、锁定第三块传感器，最终使整套短波红外相机系统达到共轴重合的状态。以上调校是通过专门设计的靶标以及微调工装实现的，重合精度可以达到 0.3 个像素以内。

在传感器和棱镜之间留有足够的空气隙，此处机械结构上设计了可替换滤光片的插槽，根据不同的待检物体所需要的特征波长，可以在插槽内更换不同波长的带通滤光片，扩展产品的检测应用场景。

当以上装置均按设计方案调校到位后，相机即可将拍摄到的同一场景、无视差的图像分成三个不同波长的信号输出到后端，进行分析及分选工作。

小结

文章介绍了采用棱镜分光的单镜头三传感器短波红外相机，从使用背景、技术原理，进一步展开到介绍具体的实施办法。利用福特科在复杂光学系统领域多年的经验积累，该产品在技术上分别解决了宽光谱长后焦光学镜头设计、复杂分光棱镜加工及镀膜、多传感器共轴融合精密微调等难点。目前，产品已经通过客户的实际测试，性能不输于国外同类产品，在工业分选领域具备广阔的市场前景。