

棱镜式线阵扫描相机与单传感器多线相机在彩色和多光谱成像方面的对比

相机技术的选择很大程度上取决于机器视觉应用的需求。线阵扫描相机通常被用于需要高速度的应用，比如捕获快速移动物体的图像。随着高速工业生产中越来越多的质量控制流程需要彩色和多光谱成像，线阵扫描技术必须具备适当的功能来满足这一需求。一种方法是使用多线单传感器。典型配置包括双线插值颜色、RGB 三线和用于多光谱应用的 RGB + NIR 四线。其中一些相机甚至为每个信息通道配备了多线，以支持合并或集成功能，从而能够在不太理想的光照条件下提高敏感度。另一种线阵扫描方法是使用多传感器，并借助二向色棱镜将入射光线分为所需的波段。三通道（R-G-B）和四通道（R-G-B-NIR）配置最为常见。这些型号还可以使用多线传感器，通过合并提供更出色的敏感度。虽然两种方法都能高速成像（包括最新一代 CMOS 棱镜式相机），但图像质量可能存在很大差异。例如，许多机器视觉应用中的速度都不一样或者未知。在这种情况下，由于结构的原因，单传感器、多线相机都难以保持图像质量，而棱镜式相机的图像质量却不会受影响。此外，当相机需要以倾斜角度拍摄物体表面，且不能垂直放置于物体表面时，棱镜式相机也是理想的选择。同样，对于涉及金属、塑料和纸张的卷筒纸检验应用中常见的物体振动和起伏，测试表明，使用棱镜式线阵扫描技术可以获得最佳的图像质量。本白皮书对单传感器多线相机与多传感器棱镜式线阵扫描相机进行了对比。

1. 背景和动机

工业流程自动化要求检验系统能够对商品进行 100% 的质量控制。自动化检验可避免人为失误，有助于实现高效的质量控制。近年来，终端用户的质量意识显著提高，与此同时，设备制造商也在不断地寻找能给最终产品增加价值的技术补充。许多工业产品及其包装都会使用纸张、塑料和金属箔，这些材料通常被附在“卷筒纸”上，“卷筒纸”则以滚动的方式不断供给材料，并且需要在制造过程或增值流程（如印刷、转换、压纹或层压）中接受检验。

由于高速制造的性质，只能使用专注于对物体进行逐行扫描的线阵扫描相机来检验此类产品。使用这种检验方式，能够对较长的物体或无限延展的物体（如卷筒纸）进行检验。在过去十年中，线阵扫描技术的应用范围从卷筒纸和文档扫描延伸到了交通执法和道路收费；蔬菜、矿物、颗粒物分类；铁路

运输、轨道检验等户外应用；道路和跑道检验；以及木材和玻璃检验。图 1 展示了基于当今最流行应用的线阵扫描市场，其中大部分都与彩色和多光谱有关。纵轴突出显示了应用对传感器分辨率的典型需求，横轴从左至右表示逐渐递增的典型速度需求。

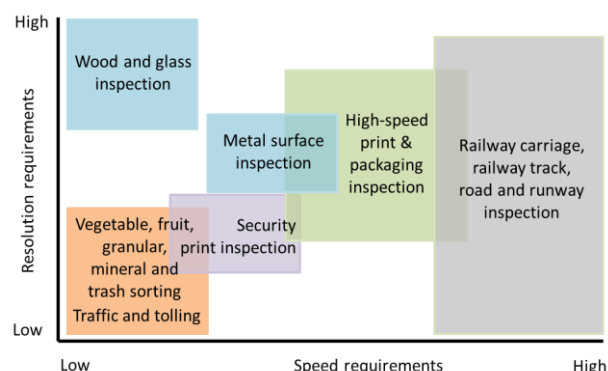


图 1：线阵扫描市场概览

必须指出的是，尽管图 1 给出了线阵扫描市场的总体概览，但它并不代表每个用例的具体情况。特定用例的速度和分辨率需求可能有所不同。

从图 1 可以明显看出，线阵扫描技术的应用范围很广。可以借助单传感器多线相机或多传感器棱镜式线阵扫描相机，来解决这些应用所面临的挑战。图 2 和图 3 描述了通过这些方法可以实现的线配置。

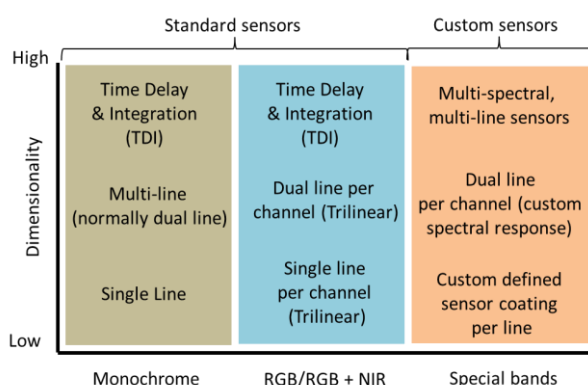


图 2：单传感器线阵扫描相机配置

顾名思义，单传感器多线相机由单传感器结构组成，但可以使用不同的配置来捕获其表面的光线（图 2）。另一方面，多传感器棱镜式线阵扫描相机由一个相机设备中多个传感器结构组成（图 3）

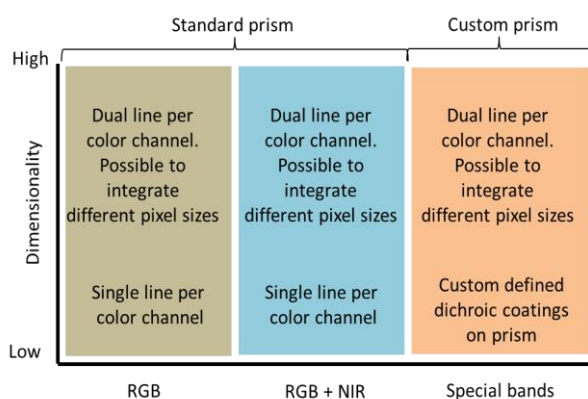


图 3：多传感器棱镜式线阵扫描相机配置

在相机内部使用棱镜有助于将光线分为各种光谱波段。因此，在单色应用中不再需要使用棱镜式 R-G-B 相机。

2. 多传感器棱镜式线阵扫描相机对比单传感器多线相机

从应用的角度来看，单传感器线阵扫描相机和多传感器线阵扫描相机有两个不同之处。尽管下方介绍的对比差异是针对棱镜式相机和三线相机，但此原理同样适用于其他单传感器多线相机。这些差异将有助于为具体应用选择适当的技术。与单传感器线阵扫描相机相比，在相机内部使用棱镜还具备除高速度之外的一些其他优势。

2.1 晕轮效应

在线阵扫描应用中，由于采用光学设计这一特性，多传感器棱镜式相机比三线相机更具技术优势。由于机器内部的空间限制，通常情况下，安装相机的唯一方法是与要检验的表面成一定角度。对于三线相机来说，传感器由每个彩色通道三条或更多条线组成，每条线在扫描方向上呈空间分布。从光学的角度来看，这些线是三个或更多个单独的光学路径

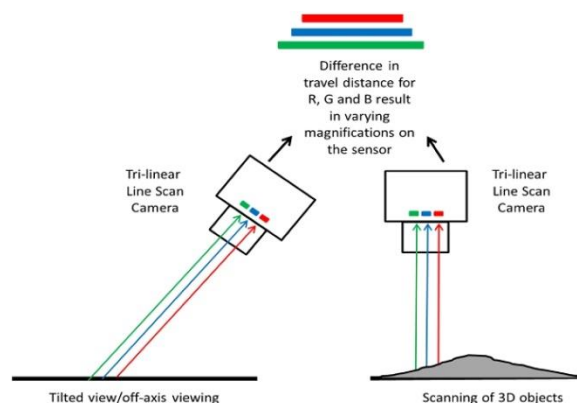


图 4：使用三线线阵扫描相机对 3D 物体进行离轴观察和检验

三线相机以离轴观察角度安置时会造成图像尺寸失真，使正方形或矩形看起来像梯形。造成此现象的另一个原因在于，从物体表面到传感器上最近的彩色通道之间的光学路径短于其他两个彩色通道。图 4 中，从物体到红色通道的光学路径短于蓝色和绿色通道。因此，红色的光学分辨率小于蓝色和绿色，从而形成了通常被称为“晕轮效应”的彩色条纹（图 5）。目前，三线相机采用相机内校正算法来修正梯形投影效果。这给倾斜视图带来了一些灵活性。但是，倾斜视图更正仅限于一定的像素数量（大多数情况下可高达 4 像素）。

同样的原理也适用于使用三线相机对 3D 物体所做的检验。3D 结构可导致红色、绿色、蓝色通道到传感器的光程出现差异（如图 4 所示），从而产生色晕。



图 5：有晕轮和无晕轮的图像对比

对多传感器棱镜式相机来说，每束单独的光线在与主要光学元件（即棱镜）交互之前都遵循一条单一的光学路径。当光线分离发生在棱镜内部时，每次分色的光学分辨率都保持不变。因此，3D 物体的倾斜角或高度与晕轮效应无关。

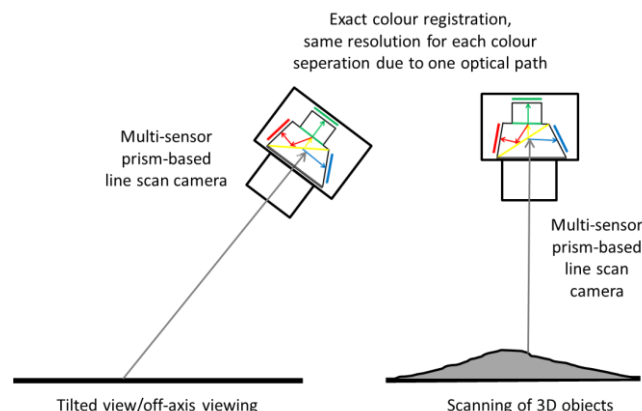


图 6：离轴和 3D 物体检验所使用的棱镜式线阵扫描相机

即使在典型的三线应用（如卷筒纸检验）中，卷筒纸的正常振动也可能引起关注。尽管人们对移动的卷筒纸所产生的振动已经有了深入的理解，并且在机器中设立了几种机制来尽可能削弱振动效果，但是光学检验的实施区域仍然存在振动。

如图 7 所示，棱镜式相机可帮助将此类应用中的振动效果降到最低。这得益于棱镜式相机的单光轴。卷筒纸在 Z 轴方向上的振动可能会改变物体的光学分辨率，但对于所有三个通道来说，情况是一样的。对于双线相机来说，需要补偿 1 条线的间隙。但是，由于间隙因振动而不能保持恒定，边缘处将会出现“渗色效果”。

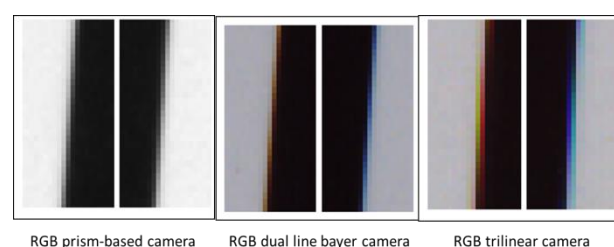


图 7：使用不同相机技术所获得的移动印刷卷筒纸图像质量

由于需要补偿两条线的间隙，使用三线相机获得的图像质量最差。

2.2 空间补偿和行频

由于三线相机的每个彩色通道都只有一条线，因此每条线之间都会有一个间隙。这个间隙可以是一个像素，也可以是多个像素（如图 7 所示）。在某些情况下，它也可能小于一个像素。为了重建 RGB 图像，可以使用相机头的空间更正算法对 RGB 线进行合并，并对这些线之间的空间进行补偿。

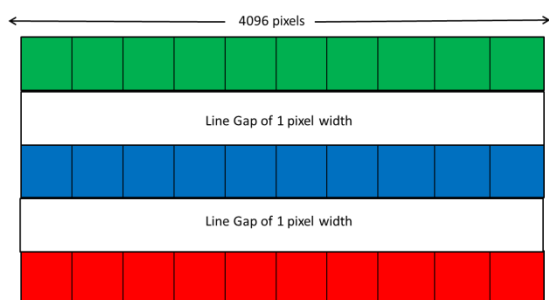


图 7：三线相机中的空间补偿（图像来自 AIA 培训材料）

空间校正的精确度取决于在子像素级进行微调校正的可能性。当扫描速度等于相机的行频时，空间校正等于各线之间的物理间隙。如果物体速度比拍摄速度快或慢，相机会自动修正由此产生的空间差异。然而，这种方法只适用于物体速度已知，并通过直接或间接编码器连接反馈至相机的应用。图 8 为三线相机空间补偿的示例图像。

对于物体速度未知或不可预测的应用（如水果、蔬菜和颗粒物，石头、宝石和大理石，棉花和叶片，以及各种药丸的分类），甚至于卷筒纸应用（如卷筒纸需不停摆动的印刷品、金属、纸张和箔片应用），无法通过任何设备有效地向相机提供关于空间补偿的反馈。在这种情况下，三线技术就无法有效地发挥作用。

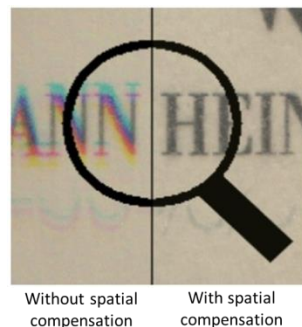


图 8：三线相机中的空间补偿（图像来自 AIA 培训材料）

为了克服这些挑战，多传感器棱镜式相机被投入使用。人们可以有效地利用单光轴所具有的优势（如图 6 所示）来扫描速度未知的物体。并且，不需要使用空间补偿，因为 R、G 和 B 的分离是在没有线间隙的单独传感器上进行的。

3. 结论和展望

尽管棱镜式线阵扫描相机的成本比三线或其他单传感器多线相机更高（因为相机的主要成本在于传感器，而棱镜式相机配备的传感器更多），但它所带来的优势是无可比拟的。除了二向色干涉涂层所固有的出色图像质量，外加优化图像质量方面的独特优势以外（例如，个体模拟增益、数字增益和每个传感器的曝光时间），棱镜式线阵扫描相机还具有有一体式光学平面，不需要使用空间补偿。棱镜式线阵扫描相机不仅可以在物体速度未知的应用中出色地工作，而且可以轻松地应对相机倾斜或检验 3D 物体，而不会产生任何图像伪影（如晕轮效应）。

棱镜式相机需要特殊镜头。这是因为棱镜式相机内部的光学路径不同于单传感器相机。幸运的是，市场上有各种各样适合优化棱镜成像的镜头。

本文是 JAI 棱镜技术白皮书系列的一部分。在本系列的第一篇白皮书中，我们讨论了棱镜相较于其他相机技术（如拜耳模式和三线技术）在实现出色图

像质量方面的优势，该篇白皮书的标题为：“棱镜技术如何帮助实现绝佳的彩色图像质量？”

关于作者



Paritosh Prayagi

全球产品经理 -
线阵扫描产品线
产品经理 - 欧洲、中东和非洲

Paritosh 于 2017 年 4 月加入 JAI 产品管理团队。他曾在德国开姆尼茨工业大学学习印刷和媒体技术，专门研究用于高速应用的多光谱相机系统。Paritosh 之前曾从事造纸技术研发、相机开发、3D 和光谱相机应用管理以及销售工作，拥有非常丰富的见识。

关于 JAI

JAI 提供针对工业机器视觉、医疗成像和高端监控系统应用的创新数字 CCD/CMOS 相机技术以及针对智能交通系统 (ITS) 交通成像/车辆识别的完整解决方案。公司通过设于丹麦、德国、日本、中国和美国的公司以及位于超过 35 个国家的分销合作伙伴在全球市场占据举足轻重的地位。

JAI 的视觉系统有助于以多种方式改善客户业务，无论是通过提高产品的质量和精度、降低生产线检测成本、提高产量，还是提高道路交通效率。我们全球客户的共同之处在于，他们非常看重我们产品的商标特点：久经考验的技术、高可靠性、始终如一的质量和优异的图像逼真度。

联系 JAI

皆爱科技（北京）有限公司
电子邮箱: camerasales.apac@jai.com
电话: +86-10-5397-4049