

高速成像

# 高速线扫描彩色成像技术

三线彩色相机可以为线扫描彩色成像应用提供最佳性价比。在自动光学检测方面，相比三芯片技术，三线彩色成像技术的色彩质量出众，速度更快，成本更低。而双线彩色相机，可以适用在成本更敏感的应用领域。

何星飞，Teledyne DALSA公司资深产品经理

如今，高速彩色成像在机器视觉领域扮演着非常重要的角色。在许多应用中，彩色成像是用于区分在黑白成像中颜色过于近似以至于无法区分的物体的唯一方法。工业线性扫描彩色相机采用 CCD 或 CMOS 传感器，已经广泛用于印刷检查、支票扫描、电子产品制造、食物分拣、运输安全等领域。对于成像技术的选择取决于性能及成本要求。

## 线扫描彩色成像技术

不同于面扫描相机，线扫描相机

一次采集一条线，并连续采集多条线组合成一副二维图像。由于硅芯片传感器无法自行区分波长，因此必须在成像芯片采集到图像前，先将颜色，即红色 (R)、绿色 (G) 和蓝色 (B)，根据光谱进行分离。目前主要采用三大技术：三芯片、三线及双线技术（见图 1）。

### (1) 三芯片技术

三芯片线扫描相机 (3CCD 或 3CMOS) 采用一个基于棱镜的分光器，将光分解成红绿蓝三个基色。棱镜利用光波干涉分解波长，其滤

波响应通常是平顶的，且两端垂直下降。随后，通过结合三个芯片采集到的红绿蓝图像，重新构成一张彩色图像。三芯片相机通过同一个光轴，可以同步采集到移动物体上同一位置的红绿蓝图像。因此，该项技术图像配准出众，非常适合对不平整表面、旋转表面、下坠物体等进行成像。

三芯片线扫描相机的劣势在于相机成本高，且需要搭配较为昂贵的光学镜头。由于棱镜会造成后焦偏移和像差，因此三芯片相机需要搭配特殊设计的镜头使用。相机机身通常较大，以便装载棱镜和三个芯片。Teledyne DALSA 的 Trillium 相机是首批上市三芯片相机之一。

### (2) 三线技术

大量应用已经采用三线技术，该技术使用成像芯片上的三线阵——分别为红色、绿色和蓝色通道。在操作中，各条线阵对应的每个颜色同时采集位于移动物体上略微不同位置的图像。硅片上的滤镜镀有吸收染料或颜料。由于线扫描成像通常要求强光条件，因此滤镜必须具备高耐光性 (7 至 8 度)。此外，其还必须能够承受 250℃ 的高温，这对

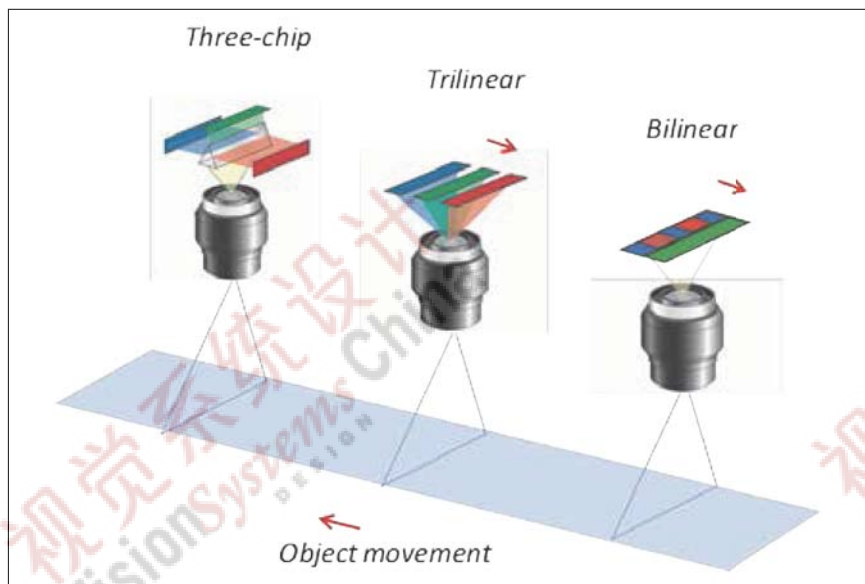


图1：线扫描彩色成像技术示意图：三芯片、三线及双线技术。三线技术采用空间校正重建全色彩图像。双线性技术的空间校正最小。

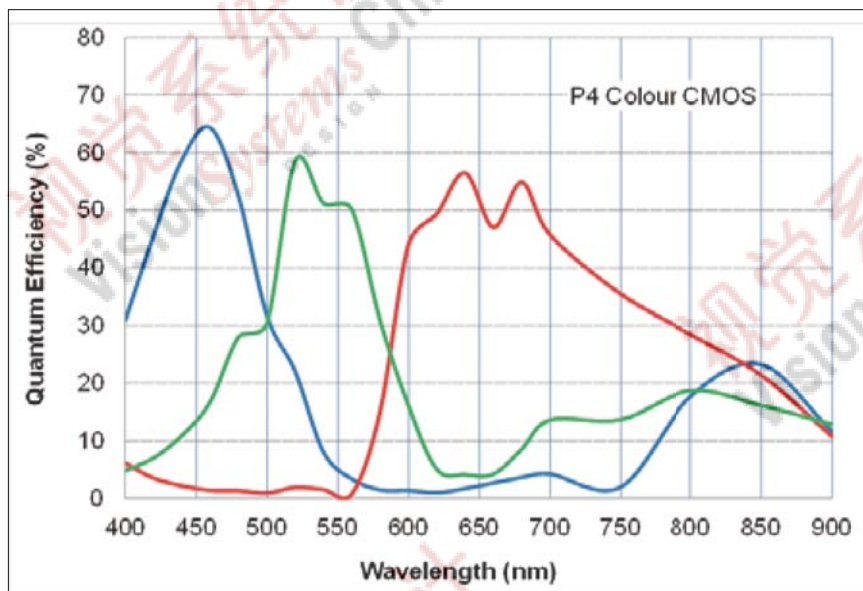


图2: Piranha4 Color CMOS相机的量子效率: 与现有Piranha Color CCD相机相比, 该款相机的量子效率显著提高, 尤其是蓝色效率提高了65%。

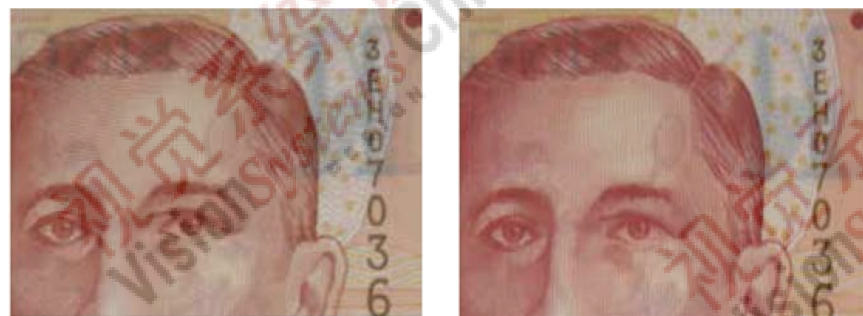


图3: Piranha Color三线相机(a)与三芯片相机(b)捕捉的纸币图像。

避免褪色非常重要。

为了将三条色彩通道结合成一张全彩图像, 相机必须弥补空间分离的问题, 也就是进行所谓的空间校正。通常将第一和第二线阵进行缓存, 然后与第三线阵匹配结合。得益于三线技术优越的性价比, 该技术正

在许多应用领域逐渐流行起来。该技术简化了相机设计, 提供出色的图像品质, 并且机身小巧。此外, 三线技术还通过搭配标准镜头进一步降低系统成本。Teledyne DALSA的Piranha Color三线2k/14 $\mu$ m及4k/10 $\mu$ m CCD相机是高速应用的理想选择。新款

表1: 彩色成像技术对比

	三芯片技术	三线技术	双线技术
色彩分离	干涉分光棱镜	吸收滤波	吸收滤波
光学镜头	特殊镜头	标准镜头	标准镜头
空间校正	无	有	有, 但最低限度
每个像素的原色	RGB	RGB	RG/BG
图像质量	最好	最好	良好
成本	高	中	低

Piranha4 Color 线性 CMOS 相机将速度提升至4k分辨率70kHz行频, 并且得益于最新设计, 其量子效率也获得了显著提高(见图2)。

三线相机能够提供出色的图像品质。图3(a)和3(b)分别显示了Piranha Color三线相机和三芯片相机捕获的部分纸币的图像。由于Piranha Color可以捕获图像细节, 同时兼具出色的色彩保真度, 因此已经被广泛应用于全球的纸币检测系统中。

### (3) 双线技术

双线相机与三线相机拥有许多相同的优势, 但是其成像芯片上仅有两个线阵。两个线阵通常并排排列, 从而降低对空间校正的要求。双线芯片可以捕捉每个像素的两种原色。为了重建全色图像, 需要插值计算得出第三色。

可以通过特定的传感器架构设计改善空间串扰, 同时也可以通过特定的滤镜布置降低光谱串扰。例如, Teledyne DALSA的Spyder3 Color CCD及Piranha4 Color 8k CMOS相机采用不同于贝尔阵列(见图4)的特殊RG/BG彩色阵列。对比贝尔阵列, 特殊RG/BG彩色阵列的一条线阵将红色和蓝色通道并排间隔分布(两者在光谱上的光谱重叠较少), 以降低串扰。此外, 另一线阵为100%填充因子的全绿色通道, 也可以被用作黑白通道。而且, 双线相机成本相对更低。此技术主要适用于电子产品制造、食物检查、材料分拣等领域。

图5(c)和5(d)分别显示了Piranha Color三线相机和Spyder3 Color双线相机获取的邮票图像。滤镜阵列有助于显著提高色彩保真度。

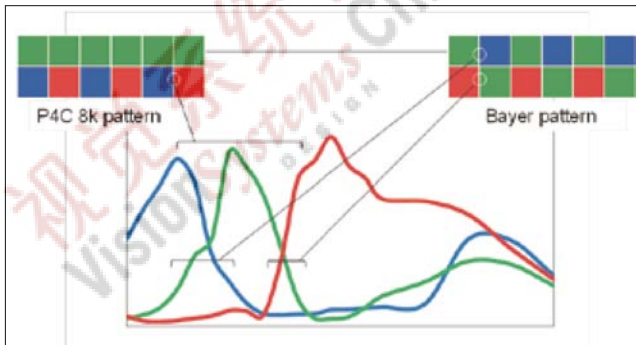


图4: 双线色彩阵列光谱重叠对比: Piranha4 Color 8k/7μm相机采用独特的色彩阵列, 可以将通道间光谱串扰降至最低, 同时提供100%填充因子的绿色单通道。

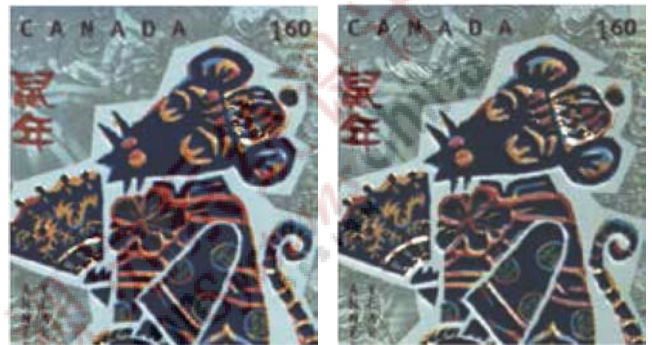


图5: Piranha Color三线相机 (a)与Spyder3 Color双线相机 (b) 捕捉的邮票图像。

### 亚像素精度的空间校正

空间校正, 在使用三线技术获取精确彩色图像的应用中至关重要。目前已经实现在亚像素级别对空间进行校正的先进技术。图 6a 显示了 3 种采样情形:

$d < p/\beta$ : 物体运行速度低于相机扫描速度;

$d = p/\beta$ : 物体运行速度等于相机扫描速度 (方形像素);

$d > p/\beta$ : 物体运行速度高于相机扫描速度。

其中  $d$  代表一个外部同步周期中的物体移动的距离,  $p$  代表传感器的像素大小,  $\beta$  代表光学放大,  $p/\beta$  代表每个像素采样的实际尺寸。

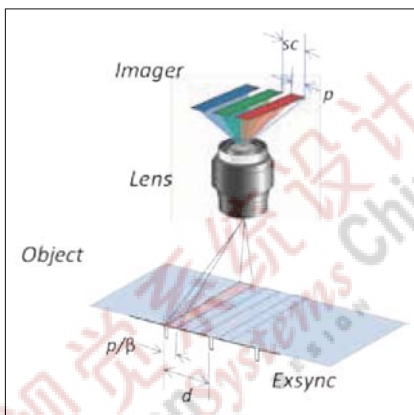


图6a: 空间校正参数(sc)取决于物体在一个外部同步周期中移动的距离(d)与像素采样的实际尺寸( $p/\beta$ )。其中,  $p$ 代表传感器的像素大小,  $\beta$ 代表光学放大。

就方形像素而言, 一个外部同步周期中物体移动的距离 ( $d$ ) 与像素采样的实际尺寸 ( $p/\beta$ ) 相同。在这一情况下, 空间校正等于 RGB 阵列行间间距数量。就 Piranha Color 和 Piranha4 Color 三线相机而言, 是整数 3。当相机在此情况下运行时, 相机自动延迟 3 行, 以将 RGB 三通道同时匹配输出。

但是, 在一些应用中, 相机在  $N:1$  纵横比的情况下运行。例如, 在许多检测系统的设计中, 物体运行速度比相机的扫描速度快许多, 以便提高系

统处理能力。这就导致图像出现非方形“压缩”像素。另一方面, 由于受到编码器及镜头放大等限制, 物体运行速度也可能低于相机扫描速度。这就导致非方形“拉伸”像素。在非方形像素情形下, 以整数 3 进行空间校正将导致边缘颜色失真 (见图 6b)。

亚像素空间校正可以补偿精确到小数点的行延迟, 以校正  $N:1$  纵横比情形下的误差。图 6b 即显示了在不同采样情形下的黑白方块的图像, 沿垂直方向扫描。在方形像素的情况下, 采用空间校正参数  $sc=3$  重建图像。但是, 在非方形像素情况下, 需要精确到小数点的行延迟 (分别为  $sc=4.3$  和  $1.73$ ) 以校正误差。亚像素空间校正是 Teledyne DALSA 的 Piranha4 Color 相机的一个显著特征。此外, 亚像素空间校正还可用于补偿和重建相机与物体表面不垂直的情况下捕捉的图像。

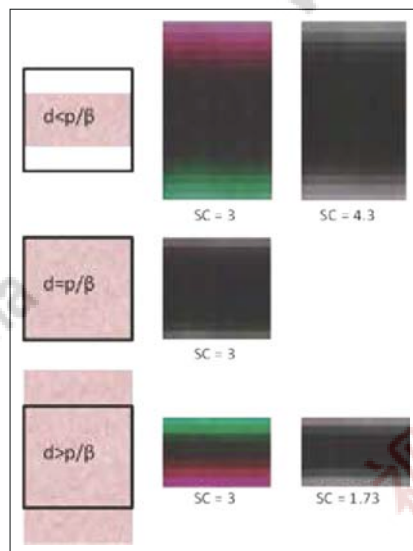


图6b: Piranha4 Color三线相机在不同示例情境和空间校正参数(sc)中捕捉的黑白条图像。在  $d \neq p/\beta$  的情况下, 精确到小数点的行延迟能够校正非方形像素采样情况下的边缘颜色失真。

### 易于使用

Piranha4 Color 相机具有多项实用功能。例如, 在镜头均匀性校正过程中, 高分辨率相机可能检测到过多目标细节, 如纸张纹理等, 而这将会为校正带来问题。从物理角度来说, 操作人员可以通过镜头散焦或移动物

体等方式来避免这个问题。但是，这样的操作极为不便。Piranha4 相机通过滤波功能实现“散焦”，而无需触碰镜头或目标。在大多数应用中都需要进行白平衡。为了获得更准确的颜色，此相机通过 Gretag-Macbeth 24 色卡进行色彩校正。

## 自动光学检测

100% 印刷检测是最具挑战的应用之一。大多数系统都是为实现纸币、支票、化妆品、广告、药品以及食品包装印刷的高速线性扫描检查而设计的，其物体分辨率从 250 $\mu\text{m}$  到 50 $\mu\text{m}$  不等，具体视应用要求而定。4k 分辨率被广泛采用，所用行频通常为 15~50kHz。

图 7 显示了德国汉堡 EyeC GmbH 公司 (www.eyec.de) 研发的 ProofRunner 450 Press 检测系统。系统核心是 Teledyne DALSA 的 Piranha Color 4k/10 $\mu\text{m}$  三线相机。该款相机以 17kHz 的速度运行，物体运行速度为 112m/min，覆盖视野达 450mm。ProofRunner 可以检测 110 $\mu\text{m}$  物体分辨率下所有颜色的缺陷，实现对标签、传单、箔材、包装、纸币等 100% 印刷检测。它适用于印刷机（柔版、平版、网版和凹版印刷）、加工纸机、折叠胶粘机以及分拣机器。

Piranha Color 相机还用于监控大幅面印刷系统。图 8 显示了德国维尔茨堡 Koenig & Bauer AG 公司 (www.kba.com) 研发的 Rapida 145 Press。它能以 17,000 张 / 小时的速度打印 1050mm  $\times$  1450mm 的印刷纸。Piranha Color 4k 相机应用于 QualTronic ColorControl 装置中，可以实时测

量并控制色密度。相机扫描每张打印纸，并将结果以每十张一次的频率反馈至 ColorTronic 墨斗。这可以确保整个印刷过程中图像质量保持一致。

## 未来趋势

随着对系统处理能力需求的提升，线扫描相机的速度

也需要随之提高。Teledyne DALSA 的 Piranha4 Color 2k/14 $\mu\text{m}$  和 4k/10 $\mu\text{m}$  三线相机，其最大线速可达 70kHz，响应率得到提升，是能够达到前述要求的最新产品。最终每条颜色通道配有多线使用时间延迟积分技术 (TDI)<sup>[1]</sup> 的方式，以进一步提高传感器的灵敏度，实现更高速的成像技术。未来，彩色时间延迟积分相机有望成为标准产品。

与此同时，彩色成像解决方案的设计将趋于更加复杂，例如多谱线成像以及可见光以外的光谱成像。例如，普通 RGB 波段间的波长或近红外线波长，可以提高自动光学检测的检测能力。基于单芯片的带红、绿、蓝以及近红外线通道的多谱线相机，可以作为经济型解决方案，满足未来对成像更为严苛的要求。为了真正

获得独立多谱线通道，所有滤镜必须在硅片上经过涂层处理。⊕

## 参考文献

1. X.-F. He 和 N. O (2012), 《时间延迟积分高速成像》, Photonics Spectra. 46 卷, 第 5 期, 第 50-54 页。

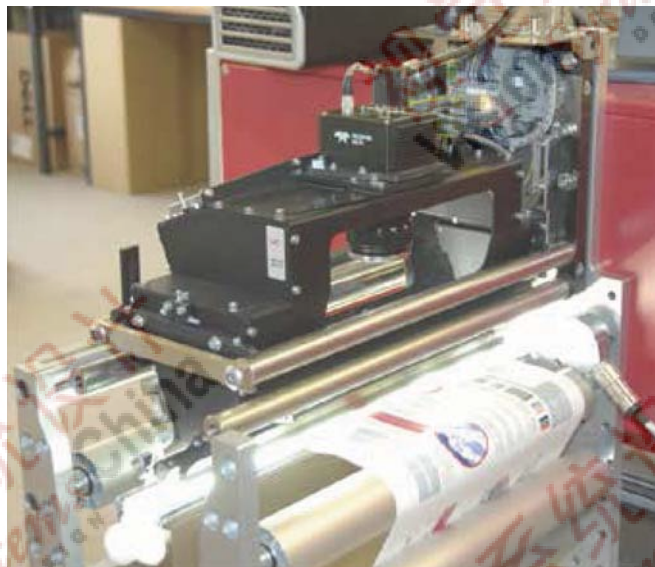


图7: 德国汉堡EyeC公司研发的ProofRunner 450 Press检测系统。该系统采用 Teledyne DALSA的Piranha Color 4k/10 $\mu\text{m}$ 三线性相机, 可以实现对图文的全色彩100%检测。



图8: 德国维尔茨堡的Koenig & Bauer AG公司研发的Rapida 145: Piranha Color 4k相机应用于QualTronic ColorControl装置中, 可以实时测量并控制色密度。