

## 3D测量

## 基于主动式光栅投影的三维视觉测量系统

文/Makoto Iwamoto/姚欢/武威, 茱丽特

机器视觉行业, 为实现非接触式三维测量, 最常用的方法有激光扫描法、立体视觉法以及主动式光栅投影法。激光扫描法利用高功率激光和面阵或线阵相机来实现; 立体视觉法利用两个面阵相机来实现; 主动式光栅投影法利用光栅投影装置和面阵相机来实现, 如图 1 所示。



在当今机器视觉市场, 由于关键硬件的发展, 主动式光栅投影法正变得越来越受欢迎。最重要的硬件进步之一是高速高分辨率面阵相机的可用性。另一个影响深远的进步是称为 LCOS (Liquid Crystal On Silicon) 和 DMD (Digital Mirror Device) 的实用型光电器件在成像系统中的使用。这两种器件连同高功率 LED 光源及投影镜头系统一起, 可实现快速的主动式光栅投影。该系统可以将各种已编

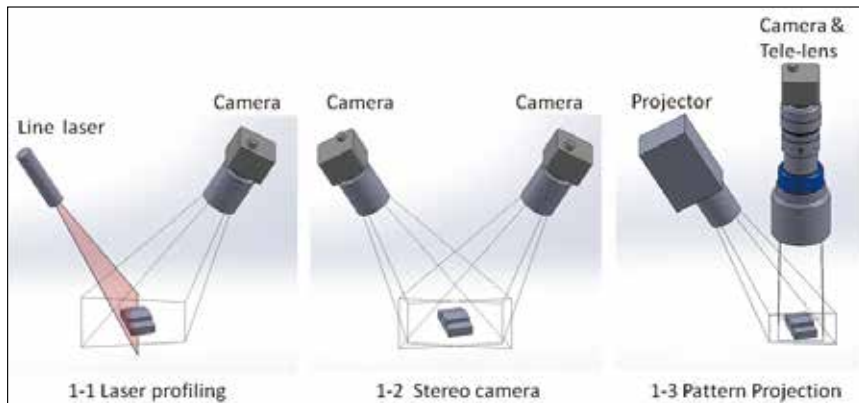


图1: 常用的三维测量方法。1-1: 激光扫描系统由线激光和面阵相机组成, 样品或激光必须移动以扫描轮廓; 1-2: 立体视觉系统, 需要两个面阵相机成不同的角度, 就像人眼一样; 1-3: 光栅投影系统包含一个光栅投影仪, 标准远心镜头及面阵相机。通常采用多投影装置, 以不同角度布置来减少投影阴影。

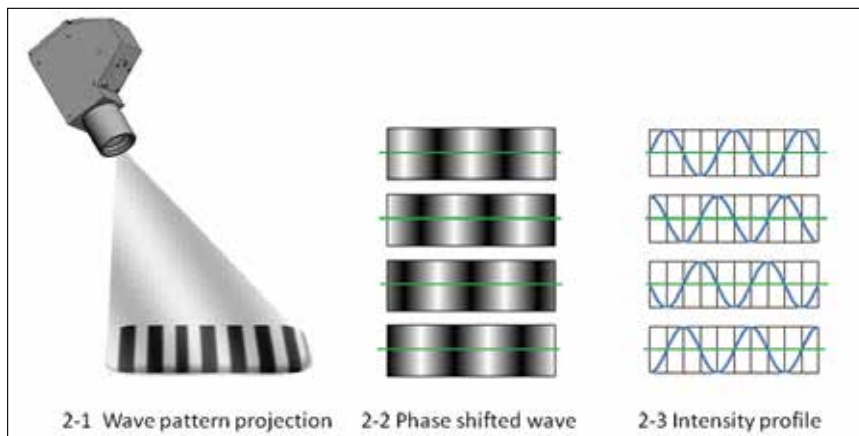


图2: 相移法及相移波动图例。2-1: 波动图形投影被用于相移法; 2-2: 相机捕捉到的相移图形; 2-3: 相移图形的强度曲线图。

程的图像利用 LCOS 或 DMD 元件投影出来, 并通过触发信号可以很容易地同步 LED 光源和相机, 且可为多种应用提供各种不同的图案。

## 相移法

条纹图案是一种对三维测量有用的主动式图案, 适用于相移法。它是由几幅有不同正弦波相位的光栅图形

组成, 如图 2 所示。

相比于激光扫描法和立体视觉法, 相移法最核心的优势是速度快、区域宽、分辨率高、精度高, 以及在三维测量中的鲁棒性。这种图案的灵活性使其可测量各种样品。对于一个成功的解决方案而言, 可编程的主动式光栅投影仪是必须的, 以实现快速切换几种图形并与相机同步。此外,

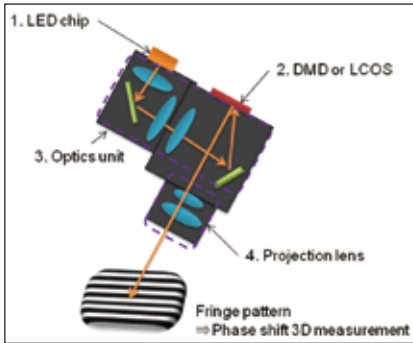


图3: 投影仪内部结构。

和各种不同的光栅投影图像。从这些高质量的图像中，可以很容易地分析二维和三维数据，以确定零件的尺寸、表面质量等。

### 用户案例

目前流行的应用是将三维光栅投影测量法应用于印刷电路板 (PCB) 制造业中的自动光学检测 (AOI) 系统。AOI 系统通常是在焊接电子元件后 PCB 检测中的一种高速自动化外

它与高分辨率远心镜头及大靶面相机结合，可同时获得高质量的二维图像

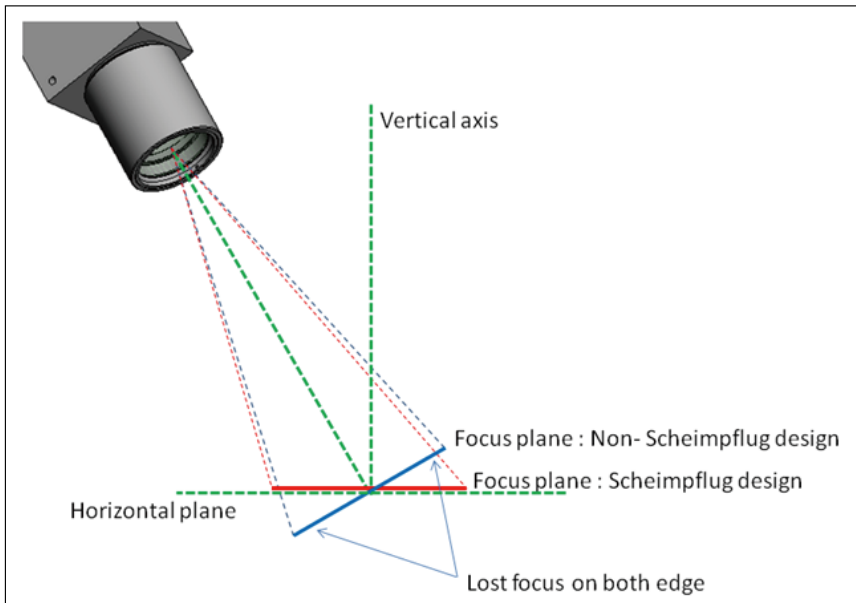


图4-1: 沙姆设计原理。

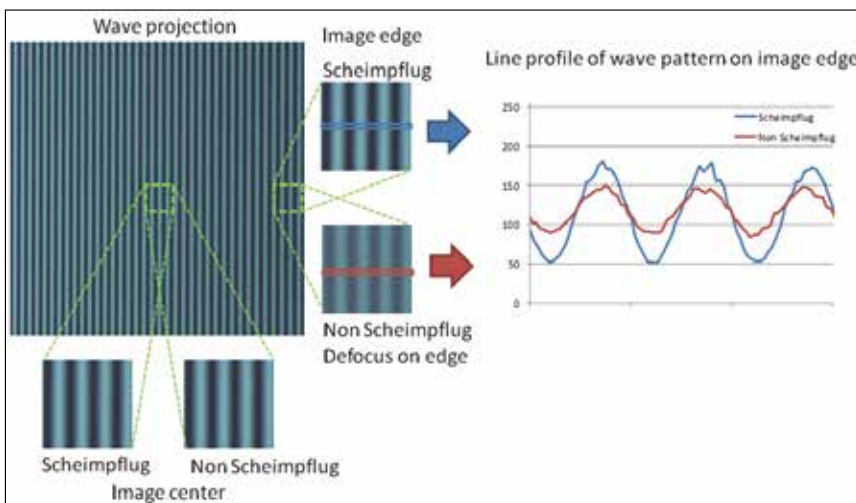


图4-2: 图像边缘剖面线。

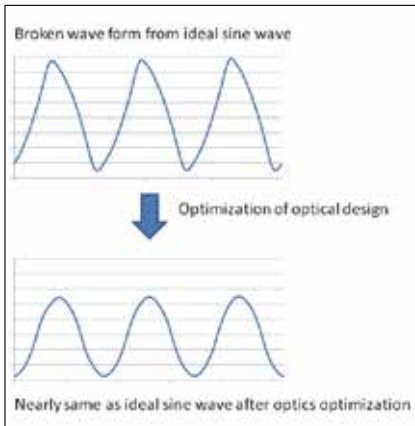


图5: 理想正弦波。

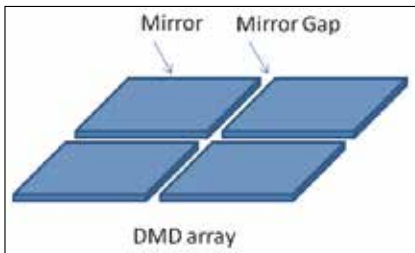


图6: 微镜间隙。

观检查方案。过去，因为易于实现，高速二维区域检查在 PCB 制造中更为常见。然而近来，由于 PCB 上元件的不断缩小和复杂性不断提高，对于高端 PCB 制造商，如智能手机和汽车行业的供应商，三维检测功能已成为必需。

在智能手机市场，终端产品的尺寸正在逐年变小、变薄。由于越来越小的电子元件的需求变化，只用二维检测已很难找到安装错误的元件。在汽车市场，汽车里电子元件的数量正

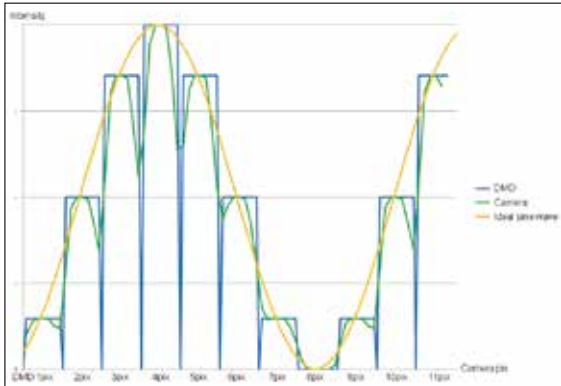


图7: 间隙 vs 理想正弦波 (1波动周期=8个像素)。

逐年增加。另外，由于对生命的潜在影响，尤其对汽车的高压及高温电子元件的安全要求很高。而且，相比于当前的标准电子元件，汽车电子元件可能更大、形状更复杂。必须对这些复杂零件进行三维检测，以保证它们被成功装配，并保证它们的安全性及配置的正确性。

### 三维测量用投影仪

为得到高速、高精度三维测量的主动式条纹图案，需要一个能提供高亮度和高对比度图案的投影仪。当机器视觉厂商有能力设计、集成并生产出一种拥有高性能镜头和 LED 照明技术的投影系统时，这种解决方案就成为可能，如图 3 中茱丽特公司的产品。

首先，选择合适的 LED 以输出高亮度图案，例如一种输出功率为 15~100W 的 LED。此外，优化的光学设计也可以最大限度地通过输出 LED 的能量，来最大限度耦合 DMD/LCOS 图案输出。最后，在优化光路后，设计聚焦图案的投影光学系统，以满足成像系统参数，如视野、工作距离、亮度、分辨率等。请记住，最大亮度对提高测量速度非常重要。此外，投射出的条纹的分辨率和对比度，对于实现整个测量区域的高精度三维测量也至关重要。茱丽特公司的独特

优势在于：拥有专业技术和丰富经验，能够为满足特定目标而设计每一个子系统，并有挑战性地将它们集成为一个完整、全面的解决方案。

茱丽特公司在三维相移式投影仪的设计中，还利用沙姆原理来提供解决方案。对许多应用而言，

它对在倾斜投影时保持水平方向都为聚焦平面是非常有用的，见图 4-1。若没有沙姆设计，图像边缘对比度会出现严重的损失，见图 4-2，这将对三维测量精度产生相当大的影响。

高精度三维测量的最佳组合如下，见图 1-3：

- 高分辨率物方远心或双侧远心镜头
- 高速大面阵相机，像素大小与镜头分辨率匹配
- 基于沙姆原理的高对比度倾斜投影装置

在相移法中，投影正弦波的再现性（正弦性）对保证高精度尤为重要，见图 5。茱丽特公司在镜头设计技术方面的专业知识，能够优化投影正弦波的再现性。

系统设计中一个主要的问题是 DMD 设备的每个微镜之间有一个间隙，见图 6。这对正弦波的再现性有

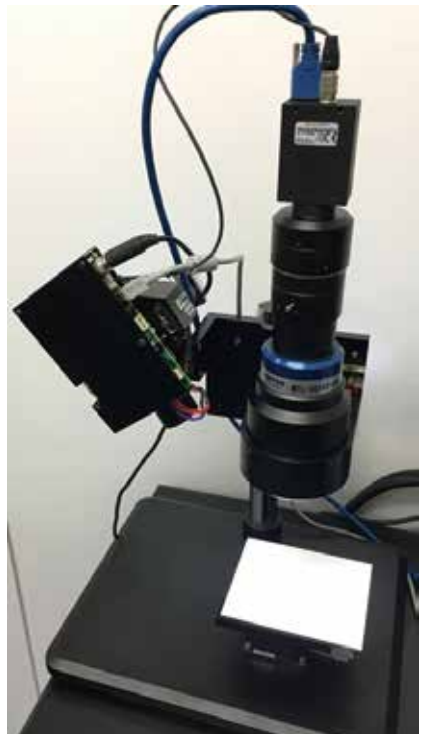


图8: 茱丽特系统架构 (视场 32mm)，此方案包括茱丽特含WXGA DMD的投影单元、400万像素1英寸USB3.0相机和茱丽特0.34倍双侧远心镜头MTL-5518C。

很强的影响，见图 7。因为镜子的间隙不能反射光线，故在每片镜子间亮度会下降，因此与理想状态相比，输出亮度变暗。对于高精度三维测量，高密度间距的图案还须配合高分辨率相机。如果相机分辨率过高，则间隙效应就会增大。通过优化光学系统，莱丽特公司已成功降低了其解决方案中的 DMD 间隙效应。

### 三维测量

以下是相移式三维测量方案的实例，它采用了莱丽特公司主动式光栅投影装置和双侧远心镜头，见图 8。被测样品由 3D 打印机制作，白色，4 步阶梯且每步高度为  $200\mu\text{m}$ ，见图 9。在图 10 中，可以在被测样品上看到投影的正弦波形，它是在相移法中最常用的波形。



图9：被测样品。被测样品由3D打印机制作，白色，4步阶梯。每步高度为 $200\mu\text{m}$ ，X、Y方向尺寸为 $25\text{mm} \times 9\text{mm}$ 。

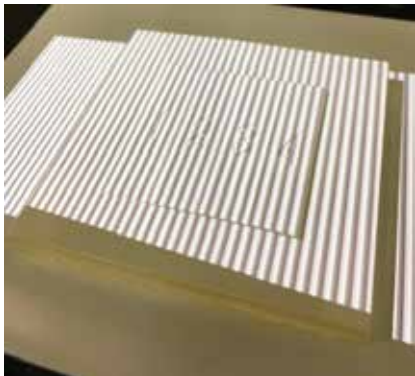


图10：被测样品上的投影图案，基于相移法理论的投影正弦图形。

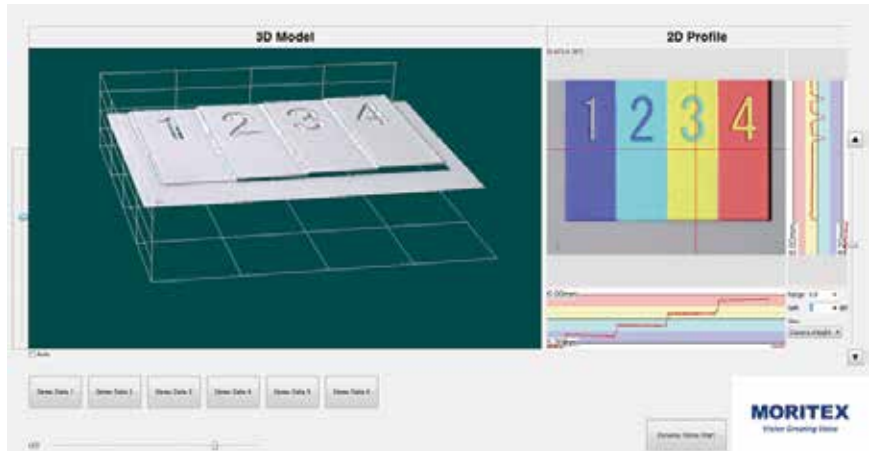


图11：三维测量结果。左侧是三维模型数据。右侧是基于高度的二维彩色图和基于二维剖面图上红色十字线的二维剖面线数据。

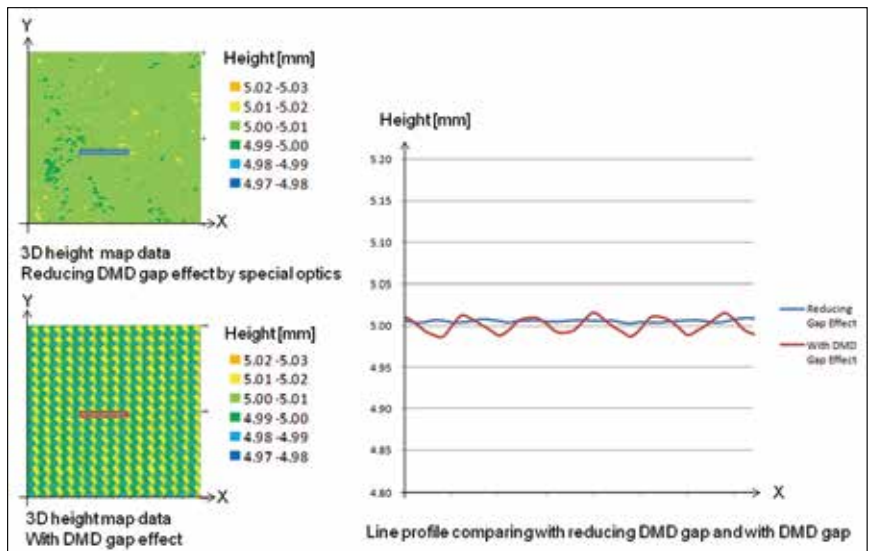


图12：三维测量上的DMD间隙效应。左侧是对5mm高度平板的三维测量数据。左上角是用有特殊光学设计的投影仪减少DMD间隙效应后、得到的三维高度图数据。左下角是用带DMD间隙效应的投影仪得到的三维高度图数据。右侧是减少DMD间隙效应与带DMD间隙效应对比的二维剖面线图。

经过系统的仔细校准，三维测量结果如图 11 所示。该系统能测量  $32\text{mm} \times 32\text{mm}$  视野范围内  $200\mu\text{m}$  的高度差。通过重复性测试，莱丽特公司发现标准差为  $2\sim 5\mu\text{m}$ 。数据量为  $2048 \times 2048$  时，测量时间约为  $1\sim 2\text{s}$ 。该方案表明，对大视野被测物实现高速、高精测量是可能的。

如果在投影中存在 DMD 微镜间隙的影响，三维测量数据结果就会产生一些误差，见图 12。图 12 是平板的高度测量数据。平板的高度设置为

$5\text{mm}$ ，且对于  $5\text{mm}$  的被测物，用带减小 DMD 间隙效应的投影仪在二维区域上得到的高度标准差仅有  $3\mu\text{m}$ 。另一方面，用带 DMD 间隙效应的投影仪在二维区域上得到的高度标准差为  $9\mu\text{m}$ ，是  $3\mu\text{m}$  的 3 倍。而且，即使实际的样品只是平板，由带 DMD 间隙效应的投影仪得到的三维数据的波形面也有误差。在这种情况下，可采用莱丽特公司投影仪来减少 DMD 间隙效应的影响，这是高精度三维测量中投影光学的关键技术。⊕