

Optotune 液态透镜的稳定性与重复性

Author: Daniele Ghedalia

摘要

本文展示了Optotune可调焦液态透镜的卓越性能。具体而言，通过采用集成Optotune EL-16-40-TC-VIS-5D的同轴电气透镜模块，在具有极浅景深（DoF）的透镜系统中验证了液态透镜的稳定性和重复性表现。

如图1所示，本文探讨了两种截然不同的应用场景：第一种是长期保持（持续数天），在此期间液态透镜的焦距保持恒定；第二种是多次随机且快速（毫秒量级）地跳离并返回预定义的焦距值。虽然案例 A 代表了很少需要重新对焦的检测应用，其稳定性主要取决于液态透镜的材料和驱动特性，以及 Optotune 控制器的热补偿，但案例 B 则适用于液态透镜的动态应用，其中使用校准查找表在预定的工作距离上进行一致且重复的对焦，或者采用基于对比度的自动对焦程序。在后一种情况下，将测试液态透镜的重复性性能。

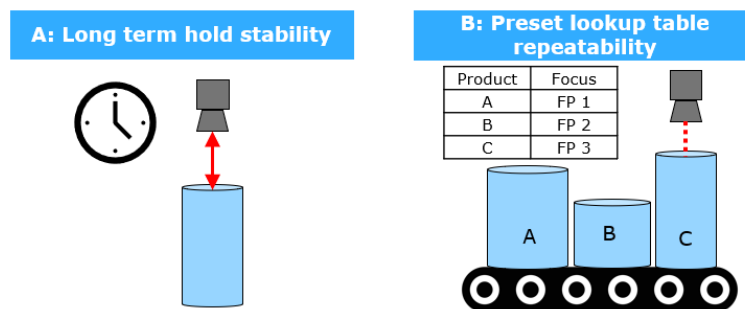


图1：两个应用场景的示意图。场景A（左）模拟在特定焦距下进行长期保持；场景B（右）模拟在预设焦距值下进行快速重新对焦。

测试结果表明，Optotune 液态透镜可自信且可靠地应用于要求最高稳定性和重复性的严苛场景，例如电子和半导体检测、芯片粘接检测、计量学等。测试发现，其稳定性和重复性均在 ± 10 mdpt 的范围内。

实验装置与方法

图2展示了成像测试的实验装置。鉴于其相对较高的放大倍率以及由此带来的较浅景深（在数值孔径NA为0.18、光圈值为f/16-40时，景深约为 $\pm 50 \mu\text{m}$ ），最终选择了Sill的S5VPJ6420同轴2倍物镜与EL-16-40-TC-VIS-5D集成模块，因其放大倍率较高，从而带来较浅的景深（在数值孔径NA为0.18及光圈f/5.5时约为 $\pm 50 \mu\text{m}$ ），这通常适用于半导体或计量学等检测应用。为控制液态透镜，采用了Optotune的四通道工业控制器ICC-4C。相机选用Basler acA2040-55um，其像素尺寸为 $3.45 \mu\text{m}$ ，分辨率达320万像素（传感器格式1/1.8"）。背光光源采用CCS提供的蓝色背光。

为监测液态透镜焦力的稳定性和重复性（分别对应案例A和B），采用了基于对比度的方法。使用了一张空间线频为100 lp/mm的Ronchi条纹标靶（图3），这在成像空间中对对应50 lp/mm的频率。对比度指标通过Sobel滤波器在x和y方向上计算得出，计算公式如下：

```
sx = cv2.Sobel(img, cv2.CV_64F, 1, 0, ksize=5)
sy = cv2.Sobel(img, cv2.CV_64F, 0, 1, ksize=5)
magnitude = cv2.magnitude(sx, sy)
contrast_metric = magnitude.mean()
```

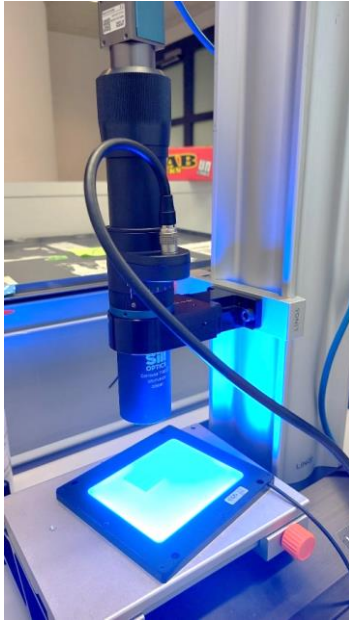


图 2: 实验装置, 展示了集成 EL-16-40-TC 的 Sill 2x 同轴镜头 S5VPJ6420。

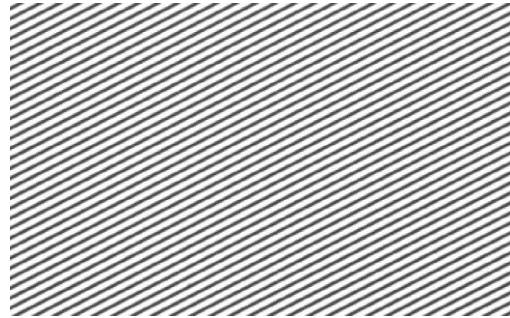


图3: 用于计算对比度的罗奇 (Ronchi) 条纹标靶 (50 lp/mm) 图像。

对于情况 A 和 B, 在实验开始时 (针对特定的工作距离), 会进行焦距扫描, 其目的有二: 一方面, 这有助于精确确定对应最佳焦点的焦距; 另一方面, 这有助于在后续实验中将对比度的漂移与焦距的漂移建立关联。

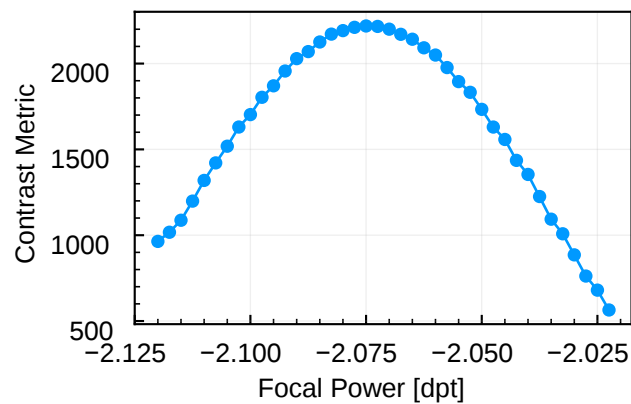


图4: 测试开始前的对比度与焦距校准曲线示例

用例 A 和 B 也在仅测试液态透镜的实验设置中进行了复现，即使用哈特曼-夏克波前传感器（SHS）来监测 EL-16-40-TC-5D 的折射力和波前误差特性。



图5：配备准直光源的哈特曼-夏克波前传感器

情况A：长期维持焦距（稳定性）

对于情况A，分别以-2 dpt和+2 dpt的焦距进行了为期四天的长期维持实验，对应的作业距离分别为约76毫米和约60毫米。如图6所示，图像对比度始终保持在实验开始时设定的最佳焦距值的5%范围内。这相当于最大焦距漂移为(±)10 mdpt，如图6右侧所示。

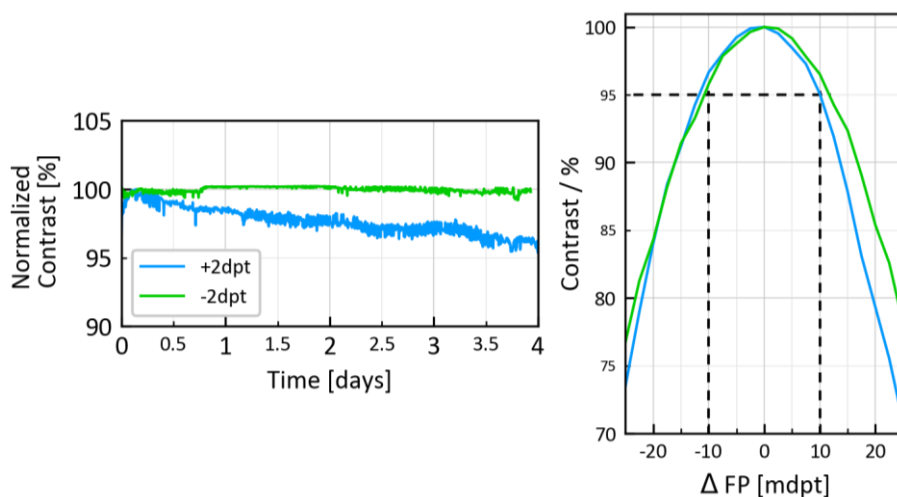


图6：焦距在-2和+2 dpt处长期保持的结果

使用哈特曼-夏克波前传感器进行了为期10小时的同类实验。因此，可以忽略诸如振动（影响同轴镜头卡口）以及其他光学元件漂移等外部因素。图7所示的结果证实了由ICC-4C控制的EL-16-40-TC具有极佳的稳定性，其焦距在实验的大部分时间内保持在 $\approx 6-7$ mdpt ($\approx \pm 3.5$ mdpt) 的范围内，波动主要归因于影响沙克-哈特曼传感器的噪声。

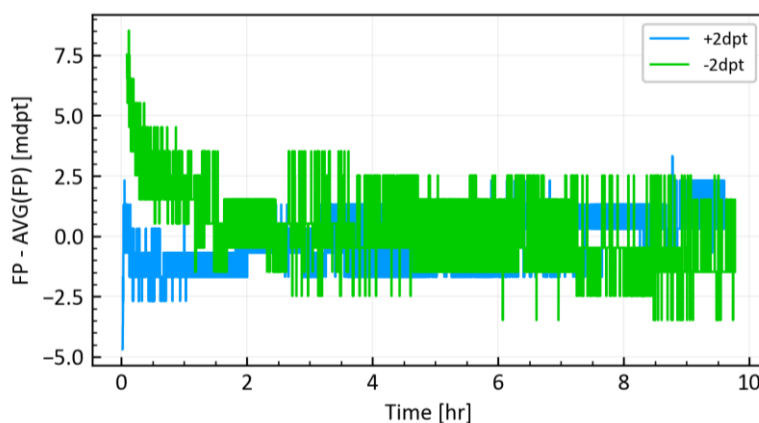


图7：使用哈特曼-夏克波前传感器进行长期焦距保持的结果

情况 B：焦度快速跳变（重复性）

对于情况 B，将镜片调节至远离并重新调回特定工作距离下对比度最佳的焦度。使用的焦度分别为 -2、0 和 +2 屈光度。在 0 dpt 的实验中，焦度跳变列表的生成范围为 ± 2 dpt；在 -2 dpt 和 +2 dpt 的实验中，范围分别为 ± 1 dpt。每个不同的跳变值均以 0.25 dpt 的倍数为单位，以随机顺序重复 10 次。图 8 以 0 dpt 实验为例，展示了焦度跳变的随机序列。每次焦度跳变后，在捕获图像前均设置了 30 毫秒的稳定时间。

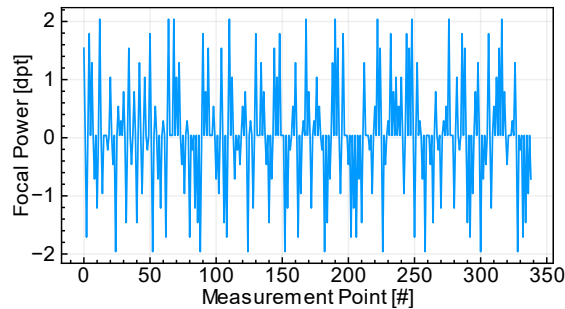


图8：焦度突变为 0 dpt 的随机列表。每次突变均为 0.25 dpt 的倍数，并重复了 10 次。

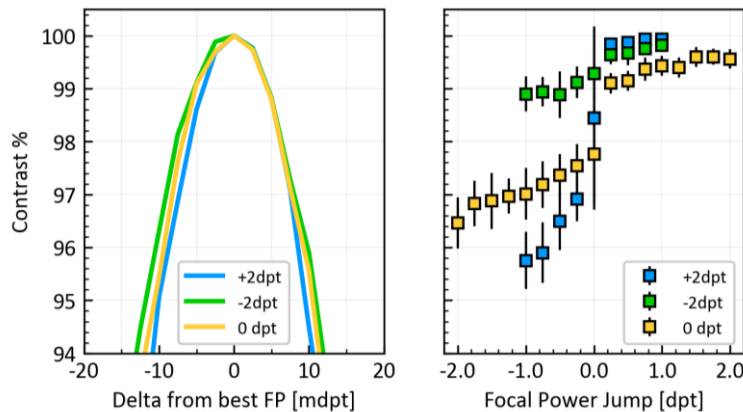


图9：分别在 -2、0 和 +2 dpt 焦度下进行的短期重复性测试结果。通过将不同焦度跳变点（右侧）获得的对比度值的平均值和标准差，与描述对比度与焦度之间关系的曲线（左侧）进行关联，可以得出结论：可实现 ± 10 mdpt 范围内的重复性。

图 9 通过将描述对比度百分比与焦度之间关系的曲线（左侧）与每次焦度突变对应的对比度百分比下降的平均值和标准差（右侧）进行关联，展示了这些实验的结果。从图 9 左侧可以看出，随着焦度的减小，景深略有增加（曲线变宽）。这是因为不同实验中使用了恒定光圈，而不同的焦距会引起微小的放大倍率变化，从而导致数值孔径发生微小变化。另一方面，从图 9 的右侧可以看出，对比度百分比从未低于 95%，这使得在所有工作距离/焦距范围内，重复性均保持在 ± 10 mdpt 的范围内。

如图 10 所示，我们使用 SHS 进行了类似的实验。如左上图所示，液态透镜在其整个调节范围内（ ≈ -3 至 4 dpt）进行了随机调节，每次跳变之间均在 0 mA 处进行“重置”。采用三阶多项式拟合来建模随机电流跳变与相应焦度值之间的关系（右上图）。随后利用该“校准曲线”推算焦度误差，其计算方式为 SHS 记录的实际值减去拟合所得的预期值。

图10左下角的图表显示，即使在EL-16-40-TC-5D调节范围内的最极端负值和正值焦度下，焦度误差仍稳定地保持在 ± 10 mdpt的范围内；而右下角的图表则展示了焦度误差的分布情况。

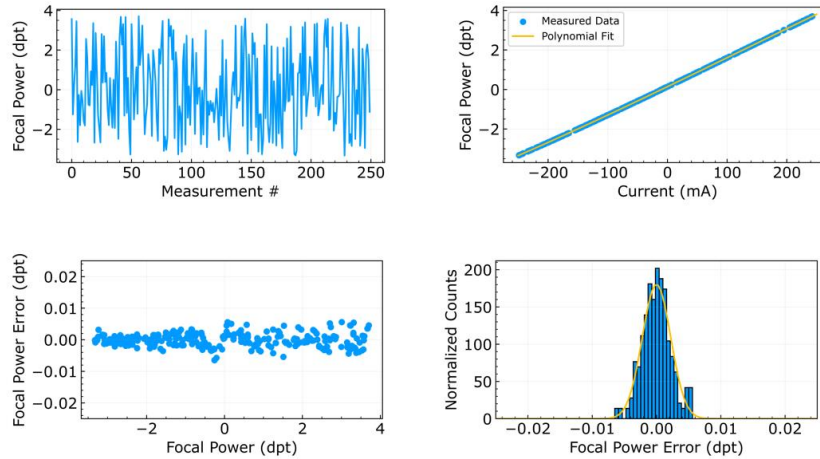


图10：使用SHS进行的重复性测试。向液态透镜施加了250次随机电流跳变，每次跳变之间将电流重置为0 mA（左上），由此得到的校准曲线（右上）被建模为电流与焦度之间的一条三阶多项式拟合曲线。左下图展示了校准曲线中焦度与焦度误差之间的关系，表明误差始终保持在 ± 10 mdpt的范围内。右下图展示了焦度误差的分布情况，结果与此一致。

结论

Optotune 液态透镜已在工业和医疗等多个领域成为实现快速对焦的卓越解决方案。与依赖物理移动光学元件来调节焦距的传统透镜系统不同，Optotune 的技术通过电控改变核心元件的曲率（该元件内含被膜与玻璃夹持的液体）来实现快速驱动。这项创新确保了在3至20ms的惊人范围内完成对焦调整（具体时间取决于液态透镜的有效通光孔径），同时保持了紧凑的结构设计。

在液态透镜用于检测或测量工艺、距离、物体平整度等特定应用中，频繁快速对焦调整时的重复性以及长期对焦稳定性成为至关重要的特性。最重要的是，必须确保液态透镜的焦度始终保持在整个透镜系统的景深（DOF）范围内。特别是对于精密检测和计量领域中常用的高倍远心透镜，其景深可能浅至数十微米。

本白皮书中呈现的测试结果表明，Optotune EL-16-40-TC-5D 能够达到这一性能水平，在 ± 10 mdpt 的范围内同时具备长期稳定性和短期重复性。即使对于电子和半导体检测、芯片粘接检测、计量学等要求最为严苛的应用，这一性能水平也被认为是令人满意的。请注意，Optotune 并未声称在所有条件和工作模式下都能达到 ± 10 mdpt 的重复性。有关官方重复性规格，请参阅镜头数据表。

新特光电是 Optotune 在中国的授权合作伙伴，一站式提供其全系列可调光学元件（液态可调焦镜头、精密&快速光束控制反射振镜、光束位移器、激光散斑衰减器及控制器）的选型匹配、应用方案设计及系统集成与工程落地全生命周期的技术支持。通过可调光学技术，实现焦距动态调节、光束精准偏转与高质量成像优化，广泛应用于激光加工、机器视觉检测、3D成像及高端科研系统等场景。

液态可调焦镜头：<https://www.sintecclaser.com/optical/liquid-lens.html>

精密&快速光束控制反射振镜：<https://www.sintecclaser.com/optical/beam-steering.html>

光束位移器：<https://www.sintecclaser.com/optical/beam-shifting-devices.html>

激光散斑衰减器：<https://www.sintecclaser.com/optical/laser-speckle-reducers.html>

我们还可提供不同通光孔径、调焦范围、光束偏转角度及涂层波长（UV-IR）的定制化可调光学解决方案，满足从科研到工业量产的多样化需求。获取最新方案及报价，请联系：

手机|微信：罗经理：18162698939，夏经理：13697356016