

应用说明

实现高分辨率光学相干断层扫描的快速聚焦



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

1. 引言

光学相干断层扫描（OCT）是一种光学信号获取与处理方法，可从光学散射介质（如生物组织）内部捕获微米级分辨率的三维图像。图像的获取依赖干涉技术，通常使用近红外光。采用相对较长波长的光能够穿透散射介质数毫米。例如，OCT 可用于生成眼部的详细横截面图像和三维图像。商业化的 OCT 系统已应用于多个领域，包括艺术品保护与医学诊断。

最早的 OCT 方法基于时域 OCT（TD-OCT）的原理（见图 1）。低相干光源被分配到参考臂和样品臂。参考臂中的光通过可移动镜子反射，样品臂中的光部分被样品反射。返回光的干涉在探测器上被记录。干涉图案包含两臂光程差的信息，从而反映样品的轴向位置。只有当光程差位于光源的相干长度范围内时，干涉才可被观测到。通过移动镜子并结合横向扫描，可重建样品的三维图像，但轴向视场非常有限，如上所述。由于镜子的移动相对缓慢，可捕获的数据量也受到限制。

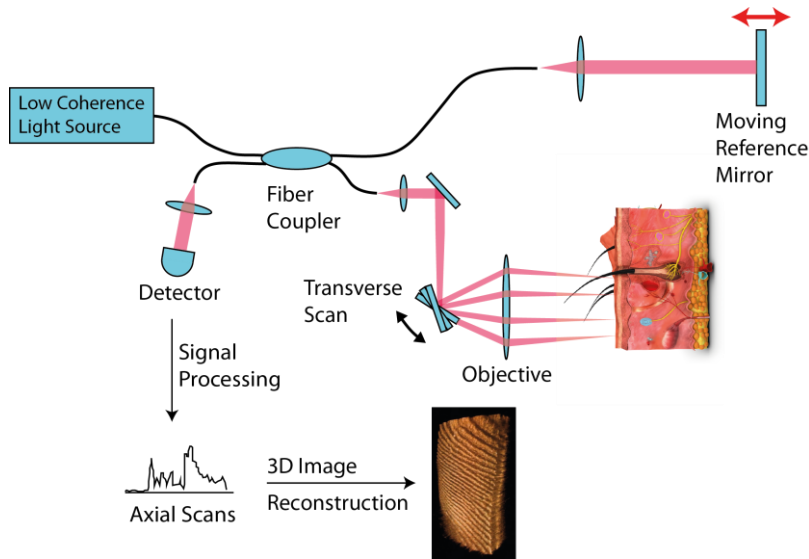


图 1: 通用时域 (TD-) OCT 架构, 该系统需要一个可移动的参考镜以实现轴向扫描 (A 扫描), 并需要一个横向扫描器以生成顶视扫描 (C 扫描)。图像采集速度相对较慢。

OCT 的一大革命出现在傅里叶域或光谱域技术 (SD-OCT) 的引入。SD-OCT 不需要移动参考镜, 使得图像采集速度比 TD-OCT 快约 100 倍。在傅里叶域 OCT 中, 通过光谱分离的探测器获取宽带干涉信号。根据维纳-欣钦定理描述的傅里叶关系, 深度扫描可通过对采集到的光谱进行傅里叶变换计算得到, 而参考臂的镜子无需移动。另一种光谱域技术——扫频光源 OCT (SS-OCT) 则使用快速且精确的可调光源, 在波长范围内扫频, 并配合简单探测器。如今, OCT 市场主要由 SD-OCT 和 SS-OCT 主导。

尽管进展迅速, 最先进的 OCT 系统设计者仍需在“较大的轴向视场配合较低的横向分辨率” (见图 2a) 与“较高的横向分辨率配合较小的轴向视场” (见图 2b) 之间做出选择。这主要是因为 SD-OCT 和 TD-OCT 中, 获得可接受的分辨率仅可能依赖于小焦斑。小焦斑仅能通过高数值孔径 (NA) 物镜实现。然而, 高 NA 的代价是焦深减小, 从而导致轴向视场受限。

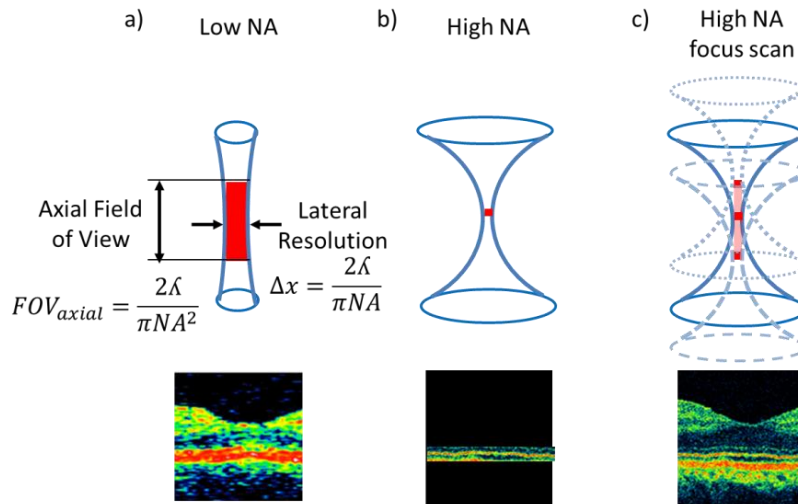


图 2: 横向分辨率与轴向视场的权衡
a) 低数值孔径 (NA) 聚焦光学系统, b) 高 NA 聚焦光学系统, c) 使用 EL-10-30-C 实现轴向焦点扫描, 从而扩展轴向视场的样品聚焦光学系统

这与图 2c 所示的扩展型 OCT 形成对比，在该方案中，既实现了扩展的轴向视场，又保持了高横向分辨率。通过使用可调焦透镜执行轴向焦点扫描，可以突破分辨率受限的权衡。无需任何可移动机械结构，EL-10-30 或 EL-6-18 透镜即可在数毫秒内完成对 2 mm 厚样品的单次扫描。

图 3 中将该扩展型 OCT 与不同成像技术在分辨率和穿透深度方面进行了比较。

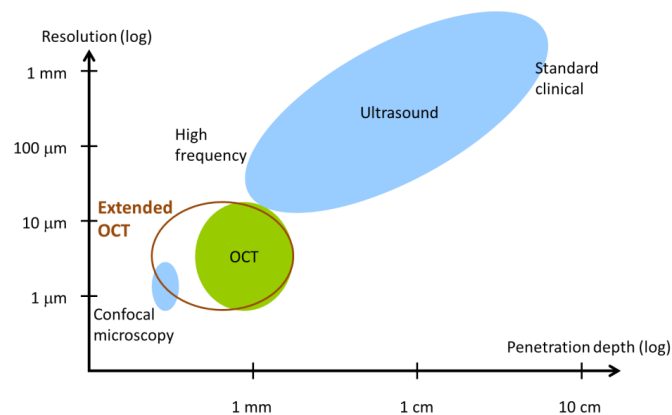


图 3: 扩展型 OCT 与标准成像技术的比较

EL-10-30-C 透镜的 C 接口版本兼容标准工业物镜，可轻松与高 NA 样品聚焦透镜组合使用。此外，可在 EL-10-30-C 中集成偏置透镜，以将焦距范围调节至所需值。通过使用负偏置透镜，焦距范围可包含无穷远，从而使 EL-10-30-C 可置于现有光学系统之前，作为高光学分辨率 OCT 系统的近摄透镜使用。

下文将介绍 Optotune 产品在 OCT 系统中的不同应用实现。

2. 应用领域

2.1. 皮肤 OCT —— 扩展型光学相干断层扫描

在传统 OCT 系统中，设计者必须在横向分辨率与可实现的视场之间做出权衡。EL-10-30-C 或 EL-6-18 透镜可以实现焦斑在样品中的快速轴向扫描，同时保持高 NA，从而保持高横向分辨率。当与样品的 x-y 机械扫描或扫描振镜结合使用时，可实现高分辨率三维 OCT。

扩展扫描范围对于皮肤 OCT 尤为重要，因为与眼部 OCT 不同，皮肤 OCT 对物镜的数值孔径没有限制。图 4 展示了一个扩展型 SD-OCT 系统。来自低相干光源的光被引入一个 2x2 光纤耦合器，实现标准迈克尔逊干涉仪。耦合器将入射光功率分配到样品臂和参考臂。参考光纤输出的光照射到参考镜上，并被重定向回同一光纤。样品光纤输出的光照射到横向扫描镜机制上，用于将光束聚焦到样品上，并沿一个或两个横向方向扫描焦斑。

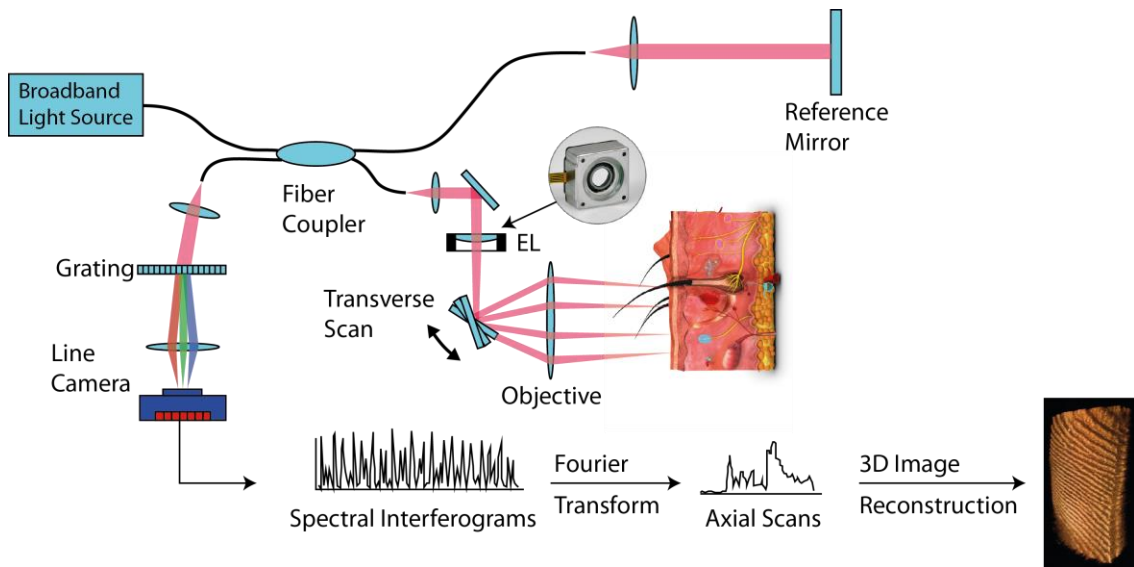


图 4: 扩展型光谱域 SD-OCT 的示意图, 用于组织 (如人体皮肤) 的研究。置于扫描镜前的电可调透镜可在延长轴向扫描范围的同时保持尽可能高的横向分辨率。图中示例展示了高速电动液态透镜 EL-6-18。

从样品反射回来的光通过相同的光学扫描系统重新导入光纤, 并与来自参考臂的返回光混合。混合光通过光栅实现光谱分离, 并在高速 CCD 或 CMOS 线阵相机的表面产生干涉。随后对测得的光谱干涉图进行傅里叶变换, 并由所得的轴向扫描重建三维图像。将可调焦液态透镜 (EL 系列) 置于扫描镜之前, 可改变轴向扫描 (A 扫描) 的起始位置。不同深度的 A 扫描随后被拼接在一起 (见图 5)。

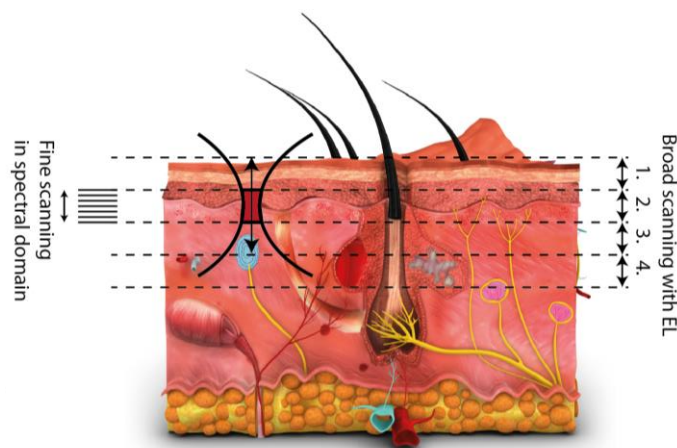


图 5: 沿轴向扫描方向拼接多个轴向 (A) 扫描的示意图, 以获得更大的扫描深度, 同时保持良好的横向分辨率。

图 6 展示了将扩展轴向扫描范围应用于扫频光源 (SS-OCT) 系统的原理, 其原理与在横向扫描单元前置可调焦液态透镜的 SD-OCT 类似。在扫频光源 OCT 扫描中, 光源波长快速扫频, 光谱干涉图在单个探测器上随时间检测。随时间获得的光谱干涉图经过反傅里叶变换后生成 A 扫描图像。更高的扫描速度可实现更密集的采样和更精确的配准。虽然可调光源相对昂贵, 但探测系统变得非常简单。

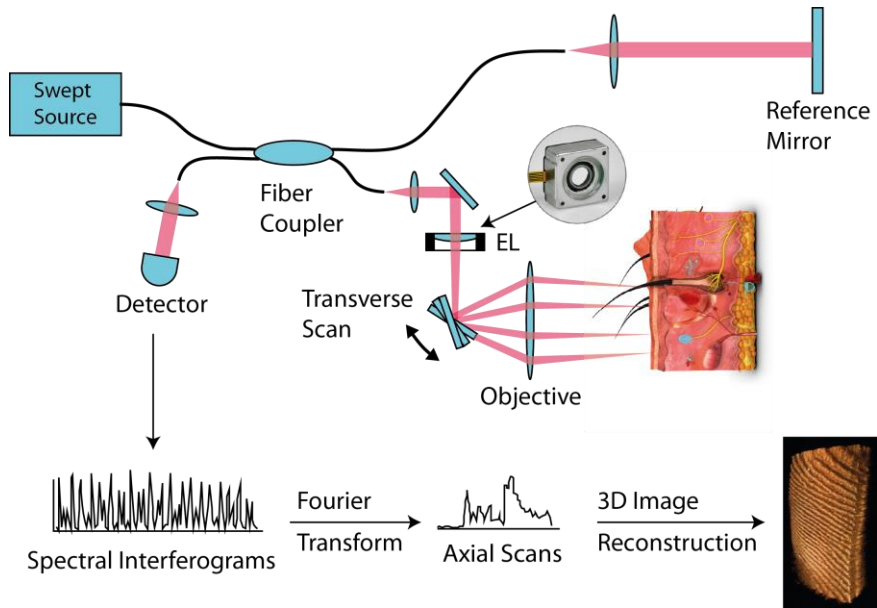


图 6: 扫频光源 (SS-) OCT 的示意图, 用于组织 (如人体皮肤) 的研究
置于扫描镜前的电动可调焦液态透镜可在延长轴向扫描范围的同时保持尽可能高的横向分辨率。图中示例展示了高速电动液态透镜 EL-6-18。

2.2. 眼部 OCT

随着青光眼、视网膜及角膜疾病的增加, 光学相干断层扫描 (OCT) 在眼科临床中的应用日益广泛。通过 OCT, 可清晰观察视网膜的各个特征层, 使眼科医生能够绘制和测量其厚度。这些测量有助于早期发现、诊断及指导治疗多种视网膜疾病和病症, 包括年龄相关性黄斑变性和糖尿病性眼病等。

电动可调焦液态透镜使 OCT 系统能够聚焦于眼内不同的焦平面, 同时对角膜和视网膜进行成像 (见图 7)。这些透镜兼容光谱域 (SD-OCT)、扫频光源 (SS-OCT) 和时域 (TD-OCT) 系统。高速调焦能力允许实时跟踪眼球, 从而获得更可靠的结果。由于无需平移机械结构, 整个光学系统紧凑且稳固。

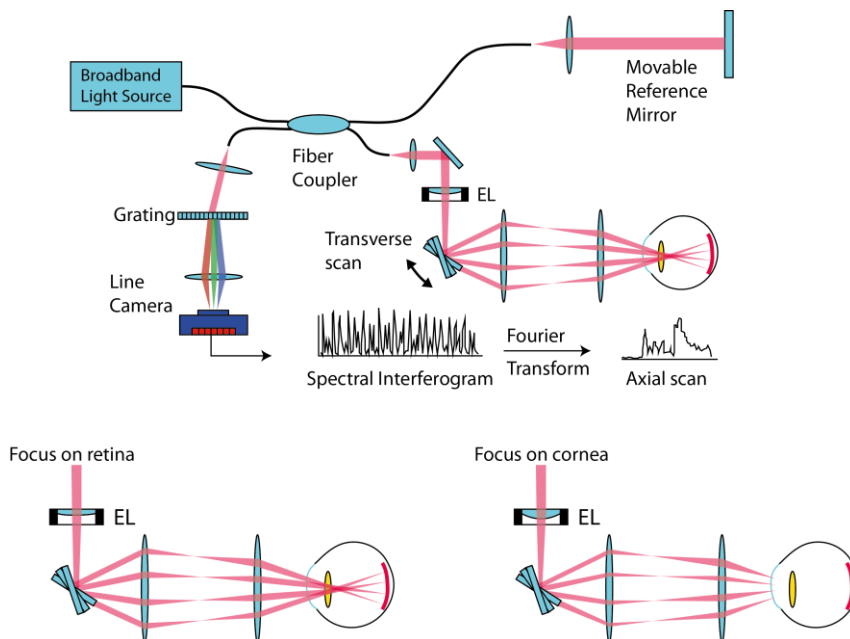


图 7: 用于眼部检查的典型 SD-OCT 仪器示意图
将电动可调焦液态透镜置于扫描镜前, 可实现视网膜与角膜成像之间的切换。

3. 配置

3.1. 近摄配置：EL-10-30-C 与定焦透镜组合

EL-10-30-C 配备集成的平凹偏置透镜，可与定焦透镜组合使用，作为近摄透镜，实现高光学质量的电子可控聚焦单元。

图 8 展示了传统聚焦方案与包含可变焦透镜组合方案的比较。采用仅定焦透镜的传统方法时，需通过机械平移一个或多个透镜以实现样品的聚焦。相比之下，使用定焦透镜与可调透镜组合时，定焦透镜的所有光学元件保持固定位置，仅通过改变可调透镜的曲率，从而调整焦距，实现样品的深度扫描。这使系统速度更快且可靠性更高。

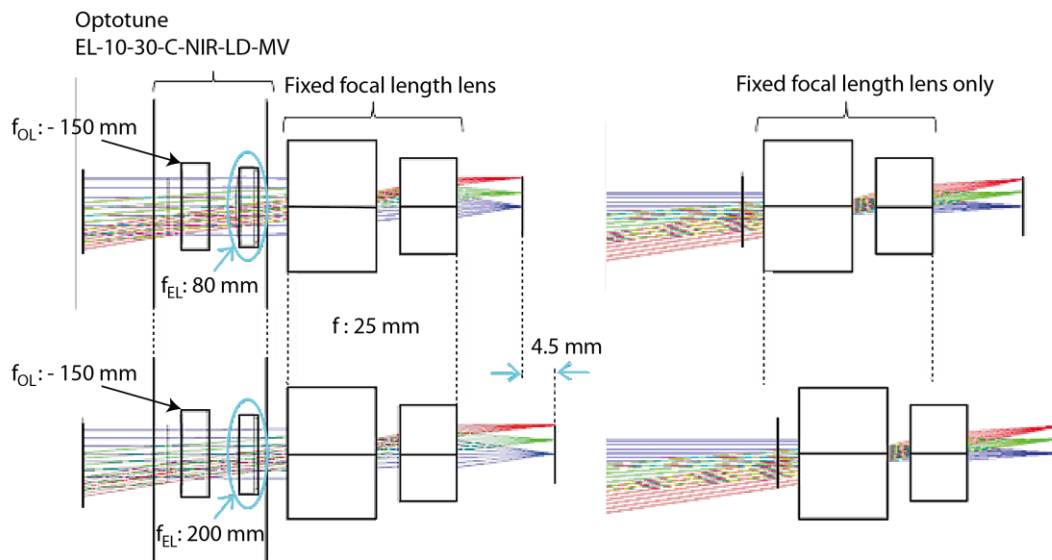


图 8：使用可调透镜时，通过电动控制改变可调焦液态透镜的焦距即可实现不同工作距离 (WD) 的重新聚焦，无需任何平移运动

可在 EL-10-30-C 的透镜外壳内集成一枚 -150 mm 平凹定焦偏置透镜，平面面朝向可调透镜。根据定焦透镜的滤镜螺纹规格，可能需要在带 C 接口螺纹的 EL-10-30-C 与定焦透镜之间安装适配器。

3.2. 标准产品

EL-10-30 和 EL-6-18 产品系列均适用于 OCT 应用。表 1 提供了可用于 OCT 应用的部分选定产品概览。

标准产品	通光孔径	调焦范围 ¹	折射率	盖板镀膜	波前误差 RMS ²	集成偏置透镜	温度传感器
EL-10-30-VIS-LD	10 mm	+8 to +22 dpt	1.30	400 – 700 nm	<0.50 λ	No	No
EL-10-30-NIR-LD	10 mm	+8 to +22 dpt	1.30	700 – 1100 nm	<0.50 λ	No	No
EL-10-30-C-VIS-LD	10 mm	+5 to +12.5 dpt	1.30	400 – 700 nm	<0.25 λ	No	Yes
EL-10-30-C-NIR-LD	10 mm	+5 to +12.5 dpt	1.30	700 – 1100 nm	<0.25 λ	No	Yes
EL-10-30-C-VIS-LD-MV	10 mm	-1.5 to +6 dpt	1.30	400 – 700 nm	<0.25 λ	Yes (-150 mm)	Yes
EL-10-30-C-NIR-LD-MV	10 mm	-1.5 to +6 dpt	1.30	700 – 1100 nm	<0.25 λ	Yes (-150 mm)	Yes
EL-10-30-C-1064-LD-LP	10 mm	-1.5 to +2.5 dpt	1.30	1064 nm	<0.12 λ	Yes (-150 mm)	Yes
EL-6-18-VIS-LD	6 mm	-2 to 20 dpt	1.30	400 – 700 nm	<0.1 λ	Yes (-50 mm)	Yes
EL-6-18-VIS-NIR	6 mm	-2 to 20 dpt	1.30	700 – 1100 nm	<0.1 λ	Yes (-50 mm)	Yes

表 1: 适用于 OCT 应用的标准产品概览

4. 透镜特性

4.1. 响应时间

对于 EL-10-30，在电流阶跃下的上升时间约为 2.5 ms。然而，透镜完全稳定则需约 15 ms。详细信息及 EL-10-30 对电流阶跃的光学响应曲线，请参见 EL-10-30-C 数据手册。若需更快响应，可考虑较小的电动液态透镜 EL-6-18，其响应速度约快 50%。

4.2. 镀膜选项

可调焦透镜的柔性膜无法采用标准镀膜工艺处理，因为其需要保持柔性。这意味着在空气/膜界面处大约会有 3–4% 的反射。盖板玻璃则可以进行适当的镀膜处理。EL-10-30-C 提供两种标准宽带镀膜选项，分别适用于可见光 (VIS) 和近红外 (NIR)，同时也可提供窄带镀膜（例如 355 nm 或 1064 nm，详细透射曲线请参见 EL-10-30-C 数据手册）。如果透镜安装在无尘环境中，也可以不使用盖板玻璃，以避免在 OCT 中常见的寄生反射问题。

4.3. 焦距范围与透镜朝向对波前质量的影响

原则上，可调焦透镜呈球面形状（标准参数可在 ZEMAX 软件包中查看）。由于透镜由弹性材料制成，其形状会受到重力影响。当透镜水平放置（光学轴垂直）时，EL-10-30-C-VIS-LD 和 EL-6-18 系列透镜的 RMS 波前误差约为 0.1 λ （在 525 nm 测量）。当透镜竖直放置（光学轴水平）时，需要加入 Y-像差项。此外，如图 9 所示，透镜在较小曲率（对应较长焦距）时的波前误差更小。因此，建议将定焦透镜的位置设置为可调透镜在长焦距范围内工作，对应低电流值。

¹ 可根据需求提供不同的焦距调节范围。

² 波前误差以 RMS λ 表示，在 525 nm 波长、0 mA 电流、光学轴水平放置时为最差情况。

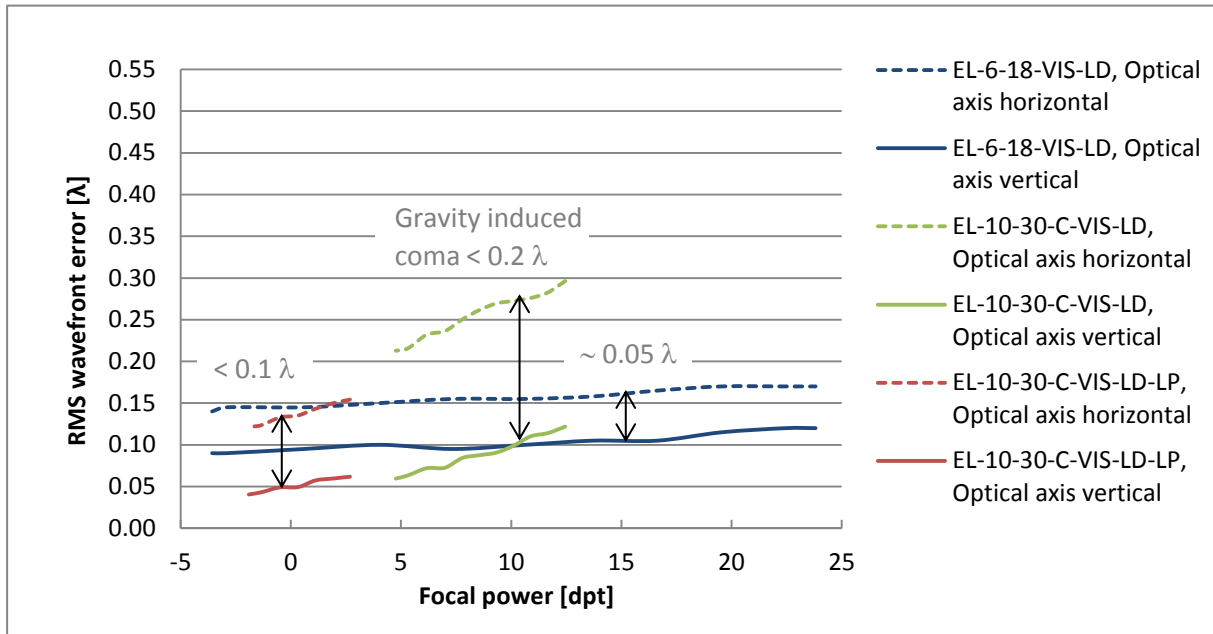


图 9: 最适用于 OCT 应用的可调透镜波前测量 (525 nm 波长, 透光孔径的 80%, 不含散焦、倾斜及球面像差)

由重力引起的 Y-像差项取决于透镜尺寸、液体密度以及膜的机械特性。对于孔径小于 5 mm 的透镜, 该项可忽略不计; 而对于 EL-10-30-C-VIS-LD-LP 和 EL-10-30-C-VIS-LD, 分别约为 0.1λ 和 0.2λ 。可使用更坚固的膜以减小 Y-像差, 但代价是焦距调节范围减小。我们正在开发改进材料和透镜设计, 以降低透镜对重力的依赖。

4.4. EL-10-30-C 的控制

EL-10-30-C 通过电流控制 (0-300 mA)。有关可用驱动器的建议, 请参见 EL-10-30 使用说明书。与压电系统不同, EL-10-30 无滞后现象。线圈中的电流会产生力, 直接传递至弹性膜, 系统中不存在摩擦。这意味着在恒温条件下, 在不同电流水平间切换, 总能获得相同的焦距。对于简单的聚焦应用, 通过查表法进行校准即可实现良好的重复性。如果透镜发热显著, 建议使用内置温度传感器来计算更精确的查表值。

对于 EL-10-30-Ci 型透镜, Lens Driver 4 提供焦距模式, 利用存储在透镜 EEPROM 中的校准数据。在 $10-50^{\circ}\text{C}$ 的工作温度范围内, 通常可实现约 0.1 屈光度的绝对重复精度。有关焦距模式的更多细节, 请参见 Lens Driver 使用手册。

5. 使用 LSR-3000 构建低成本、相干长度可调激光源

除了透镜之外, 激光散斑衰减器 (LSR) 可用于构建低成本、窄带、低相干的激光源, 适用于时域 OCT 系统。可将低成本近红外激光二极管照射到 LSR 的圆周移动漫射器上 (见图 10)。漫射器可降低激光光的相干长度, 然后将其耦合入光纤分束器。该系统的主要优点是结构简单、成本低。此外, 通过改变漫射器的驱动频率, 还可以实现相干长度可调的光源。

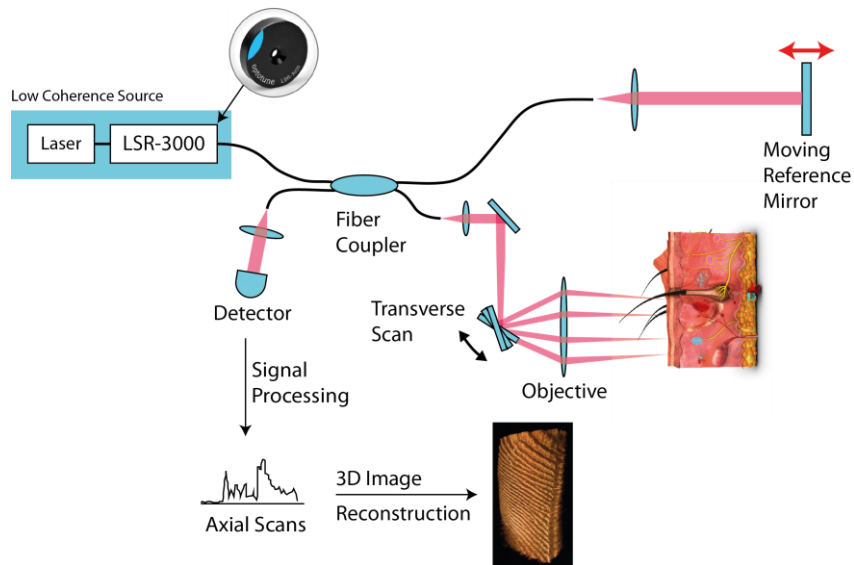


图 10: 使用低成本激光源结合 LSR-3000 构建的时域 OCT 低相干激光源

6. 利用 LSR-3000 在探测器端减少散斑

此外，激光散斑衰减器 LSR-3000 可置于 SD-OCT 或 TD-OCT 系统的探测器前，用于去除图像中的散斑噪声，从而提升系统的信噪比。

可调焦透镜实现三维显微成像

David Leuenberger, Optotune AG; Fabian F. Voigt, 苏黎世大学

可调焦透镜能够加速并增强现代显微成像方法中的三维成像能力，包括共聚焦显微镜、双光子显微镜以及光子显微镜等。

对于显微镜初学者来说，当他们发现样品中仅略微失焦的部分在图像中却显得模糊得多时，可能会感到困惑。人眼所见的景深似乎远大于相机所记录的景深。这种令人迷惑的现象产生的原因在于眼睛的调节功能：在通过显微镜观察时，使用者会不断——且通常是无意识地——改变焦平面，而无需旋动调焦旋钮，仅通过调节眼睛晶状体的焦距即可实现。自显微镜发明以来，可调焦透镜帮助研究人员更直观地感知微观物体的三维形状和纹理。

在配备电子图像采集的现代显微镜中实现类似装置是非常必要的。如今，科学家们对在更短时间尺度上以高空间分辨率观察生物体的结构和功能的需求日益增长。现代生物显微学也正逐步从成像位于载玻片与盖玻片之间的微小样品，转向三维细胞培养、整个胚胎甚至活体动物成像，以便在更自然的环境中研究发育与生理功能。

传统上，获取三维成像数据需要通过机械平移物镜或样品（使用载物台或压电物镜 Z 扫描器）实现。由于这些装置中运动部件的机械惯性，要在数百微米的 Z 范围内实现高于 10–20 Hz 的体积扫描速度非常具有挑战性。

一种称为“远程聚焦”的替代方案则通过改变光线进入或离开显微物镜时的汇聚程度，从而分别诱导激发光或发射光的轴向焦点偏移。可用于这一目的的可调光学元件种类多样，例如空间光调制器、可变形镜以及可调焦透镜等。由于其低成本、结构与控制简单以及宽广的焦距调节范围，可调焦透镜特别适合于对体积采样速度要求高、分辨率中等的显微成像应用。

可调焦透镜技术

Optotune 的形变透镜基于弹性聚合物材料。透镜的核心元件由一层薄膜组成，该薄膜构成了液体腔室与空气之间的界面（见图 1）。为了调节焦距，音圈执行器对环绕透光孔径的液体储槽施加压力，使液体被迫进入透镜中心，从而改变薄膜的曲率。电动可调焦透镜（ETL）的控制非常简便，只需使用现成的电流控制器或透镜驱动器，为透镜提供 0 至 290 mA 的电流即可。

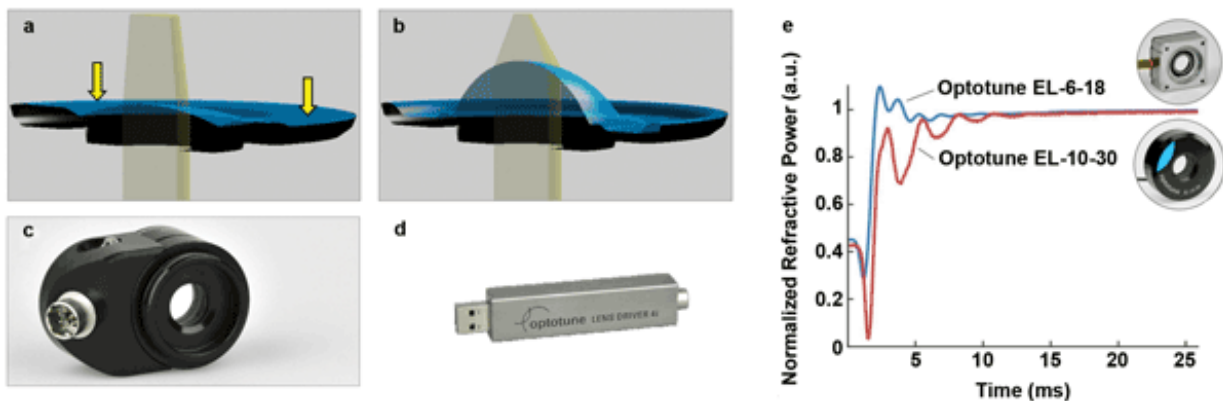


图 1. (a, b): 电动可调透镜 (ETL) 的工作原理，通过电流控制的电磁或机械执行器压下充液透镜容器，使液体流向透镜中心，从而改变透镜形状。(c) 对于 ETL，我们提供软件控制的透镜驱动器 (d)，用于提供电流。(e) ETL 的典型响应时间约为 5 ms，实际稳定时间随透镜孔径而异。

我们提供多种电控可调透镜（ETL），孔径范围从 6 mm 到 16 mm 不等。典型焦距范围为：高色散液体版本 52–120 mm，低色散液体版本 80–200 mm。在工作过程中，控制电流可能会使透镜升温，从而导致焦距随温度漂移。由于液体透镜的热膨胀对焦距的影响约为玻璃透镜的两倍数量级，因此需要在透镜中集成温度传感器。结合靠近液体的温度传感器以及透镜中存储的校准曲线，USB 驱动固件可计算出正确的电流值，从而将透镜设定并维持在指定的焦距。

ETL 的一大优势是其响应时间极短，仅为数毫秒。图 1e 展示了对矩形阶跃脉冲响应时归一化折射率随时间变化的典型示例。可调焦透镜在 240–2500 nm 范围内具有高透过率，且耐受高功率（1064 nm 连续波操作下可达 10 kW/cm²），同时具有保持偏振的特性。

在显微镜中集成可调焦透镜

现代显微镜使用无穷远校正物镜，这意味着样品发出的光从物镜出来时是平行光束。为了成像，需要额外的物镜筒透镜（图 2）。相反，当将准直激光束送入物镜时，激光光束会在样品内部聚焦。通过可调焦透镜改变光束的准直状态，可以移动焦平面。例如，当将发散光束送入物镜时，焦点会远离物镜前透镜的位置。

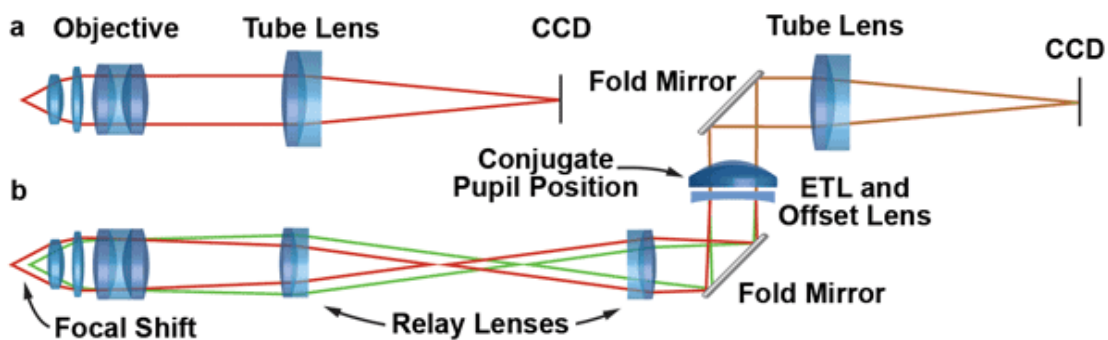


图 2.(a) 在采用无穷远校正光学的显微镜中，图像由物镜和筒透镜形成。(b) 在物镜与筒透镜之间插入由两枚消色差透镜组成的中继系统，可形成共轭光阑。在此位置可放置 ETL 与偏置透镜，实现轴向聚焦，同时不改变数值孔径或放大倍数。将 ETL 和偏置透镜水平放置可避免透镜膜因重力引起的变形。图片来源：Fabian F. Voigt。

对于大多数三维显微成像应用，需要能够同时增加和减小物镜的工作距离。一些 ETL 仅能在正焦距范围内调节，此时必须将其与固定的负偏置透镜（OL）配合使用，以将光束从会聚光转换为发散光。

通过显微镜目镜观察时，人眼会移动头部，使眼睛位于显微镜的出瞳位置，这些出瞳通常可见为悬浮在目镜上方的小亮盘。在出瞳位置，眼睛能够获得最佳的显微图像概览，并充当“集成人眼聚焦装置”实现最佳聚焦效果。理想情况下，ETL/OL 组合也应放置在此类光阑位置，但使用标准目镜的出瞳通常不利：典型的筒透镜与目镜组合具有高中间放大倍率，从而极大限制了可用的聚焦范围。这是因为调焦范围与显微镜放大倍数的平方成反比。

更优的方案是通过定制中继系统形成与物镜光阑位置共轭的光阑（图 2）。需要注意将 ETL/OL 组件放置在光路的垂直段（图 2b），否则图像可能出现不希望的像差（尤其是像散），这是由于透镜膜受重力作用产生的变形所致。在新一代高度模块化的科研显微镜中，集成此类中继系统通常较为简单。

然而，一些商业仪器不适合用户进行大幅度改装。在这种情况下，ETL/OL 组合可以放置在平行光路径的其他位置。缺点是，将可调元件放置在远离共轭光阑的位置会导致聚焦时放大倍数和数值孔径（NA）发生变化。在光学设计术语中，系统不再是远心的。因此，焦平面移动会伴随变焦效应和分辨率变化。对于几十分之一微米的小调节范围，这些效应通常很小且可接受。对于较大的焦点位移，可通过图像处理补偿放大倍数变化。

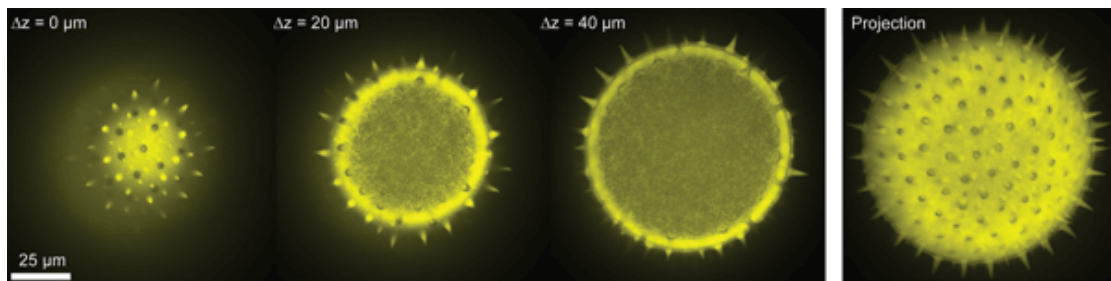


图 3. 使用 40× 物镜和集成 ETL 的旋转盘共聚焦显微镜拍摄的花粉粒（直径 100 μm）Z 堆栈。图中显示了不同轴向焦点位置的单帧图像以及最大强度投影图。最大 Z 范围为 60 μm。图片来源：Fabian F. Voigt 和 Helge Ewers。

在远程聚焦系统的设计中，成本与复杂性之间存在显著权衡。与可变形镜或空间光调制器不同，大多数可调焦透镜只有单一自由度，即焦距。在远程聚焦路径中仅配备单个 ETL 的显微镜无法在整个 Z 调节范围内实现与真正自适应光学显微镜相同的复杂像差校正。然而，使用 ETL 聚焦的成本仅为完整自适应光学系统的一小部分。

应用示例：共聚焦显微镜

共聚焦显微镜是最重要的显微技术之一，在细胞生物学、单分子物理学及其他众多学科中有广泛应用。我们在商用旋转盘共聚焦显微模块（Yokogawa CSU-X1）与倒置显微镜台（Olympus IX71）结合的系统中测试了 ETL。

由于无法在该显微镜中集成中继系统，ETL/OL 组件被安装在一个可旋转进入光路的定制滤光片盒中。使用 40× 物镜和 1.3 NA（Olympus UPLFLN 40XO）时，实现了最大 Z 范围为 60 μm。

应用示例：活体双光子显微镜

双光子激发技术在散射介质中具有出色的成像能力，非常适合用于脑组织深层的荧光成像。结合神经活动的功能指示剂和活体成像协议，双光子显微镜已成为记录活体小鼠脑内数十至数百个神经元群体活动的标准方法，成像深度可达数百微米。

仅采样单一焦平面只能有限观察局部网络中的分布式活动模式。因此，我们在现有的双光子显微镜基础上进行了改装，该显微镜配备可通过声光偏转器进行极快速 X-/Y 扫描的系统，并加入了 ETL 与 OL。声光偏转器可将飞秒激光束以千赫兹速率随机访问照射到大量神经元上。

引入 ETL 后，可快速切换至多个焦平面。我们实现了对分布于两个焦平面（间距 30–100 μm）中最多 40 个神经元的成像速率为 30–40 Hz（见图 4）。除了多平面成像外，ETL 还可用于清醒和行为动物的运动校正。

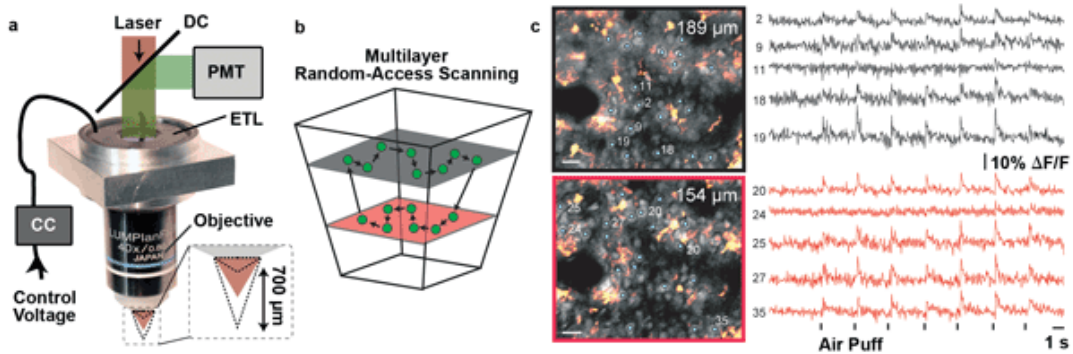


图 4.(a) 物镜支架，用于在定制双光子显微镜中集成 ETL，该显微镜配备声光偏转器，可对小鼠脑内神经元活动进行活体成像。ETL 由电流控制器 (CC) 驱动，并与偏置透镜 (未显示) 一起安装在物镜附近。(b) 由于 ETL 未放置在共轭光阑位置，扫描体积呈锥形。声光偏转显微镜可在随机访问扫描模式下快速测量使用钙指示剂标记的神经元活动。ETL 增强了多平面成像能力，成像速率可达 40 Hz。(c) 图中显示不同深度的两个焦平面 (神经元灰色显示，星形胶质细胞橙色显示)。用于快速钙成像的细胞 (1 至 40) 已标记。神经元信号表现出与重复空气刺激动物胡须同步的反应。比例尺: 20 μm 。图片来源: Benjamin Grewe、Fabian F. Voigt 和 Fritjof Helmchen。

应用示例：快速三维光片显微镜

在过去十年中，光片显微镜和选择性平面照明显微镜 (SPIM) 已被公认为活体生物样品成像的理想工具 (例如用于记录斑马鱼和果蝇的胚胎发育过程)。在 SPIM 中，样品从侧面被光片照射，从而将荧光激发限制在显微镜物镜焦平面上的单一平面内。SPIM 提供出色的光学切片能力、低光毒性以及高图像采集速度，并被《Nature Methods》评为 2014 年度方法。

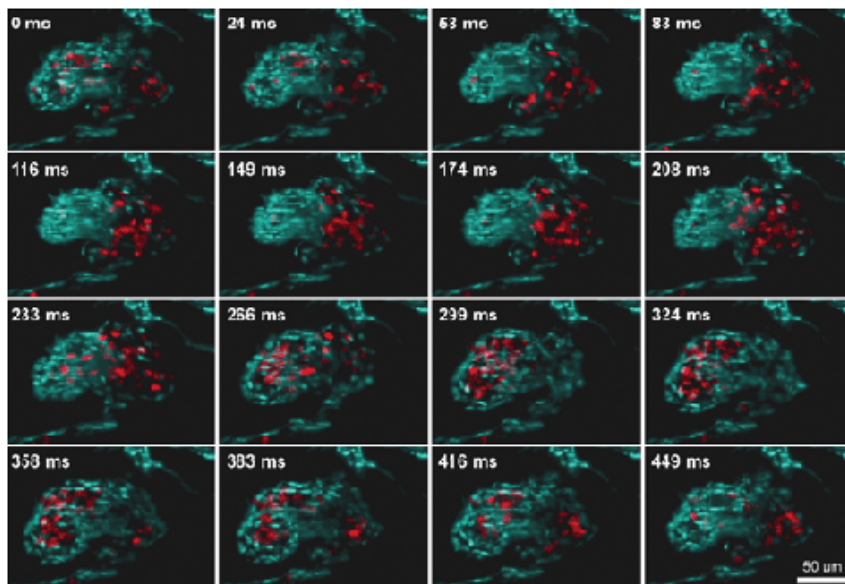


图 5.使用配备 ETL 的光片显微镜 (ETL-SPIM) 进行快速 Z 扫描，以 60 Hz 体积速率拍摄的跳动斑马鱼心脏三维重建图。心脏以蓝色标记，红细胞显示为红色。图片来源: Florian Fahrbach、Michaela Mickoleit 和 Jan Huiskens。

最近，一套 SPIM 系统配备了 ETL 用于快速体积扫描。借助以数百至数千帧每秒运行的相机，可在跳动的斑马鱼心脏中以前所未有的速率获取 10 至 20 个平面，实现每秒 30–60 次体积扫描。如此高的体积扫描速率使得追踪心脏中流动的单个红细胞成为可能。

展望未来

未来，将推出具有更大有效孔径和更宽调焦范围的 ETL，同时配备创新的驱动电子系统，可将重复性提高一个数量级。预计在未来十年内，集成可调透镜的显微物镜可能会成为日常使用的标准装备。

作者简介

Fabian F. Voigt 为瑞士苏黎世大学脑研究所博士生；Dr. David Leuenberger 为瑞士 Dietikon 的 Optotune AG 销售经理；

致谢

作者感谢 Manuel Aschwanden、Jerry Chen、Adriana Dabacan、Helge Ewers、Florian Fahrbach、Benjamin Grewe、Fritjof Helmchen、Jan Huisken、Michaela Mickoleit、Oliver Pfäffli 和 Mark Ventura 对 ETL 快速三维显微成像研究的贡献。

参考文献

1. B. Grewe 等 (2011)。使用电可调透镜对神经元群体进行快速双层双光子成像。《Biomed Opt Express》，第 2035–2043 页。
2. J. Chen 等 (2013)。利用可调透镜在双光子成像中对舔舐诱导的脑运动进行在线校正。《J Physiol》，第 4689–4698 页。
3. E.H.K. Stelzer (2015)。用于定量生物学的光片荧光显微镜。《Nat Methods》，第 12 卷，第 1 期，第 23–26 页。
4. F. Fahrbach 等 (2013)。配备可调透镜的快速三维光片显微镜。《Opt Express》，第 21010–21026 页。
5. M. Mickoleit 等 (2014)。跳动斑马鱼心脏的高分辨率重建。《Nat Methods》，第 11 卷，第 9 期，第 919–922 页。

更多信息与技术支持

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>

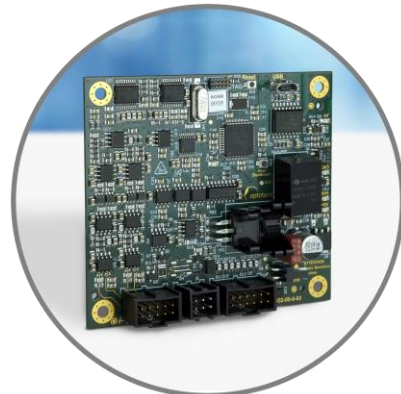
精密&快速光束控制反射振镜：<https://www.sintecclaser.com/optical/beam-steering.html>

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



激光加工应用说明书

基于 EL-10-42-OF 可调焦液体透镜与 EL-E-OF-A 控制板

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>

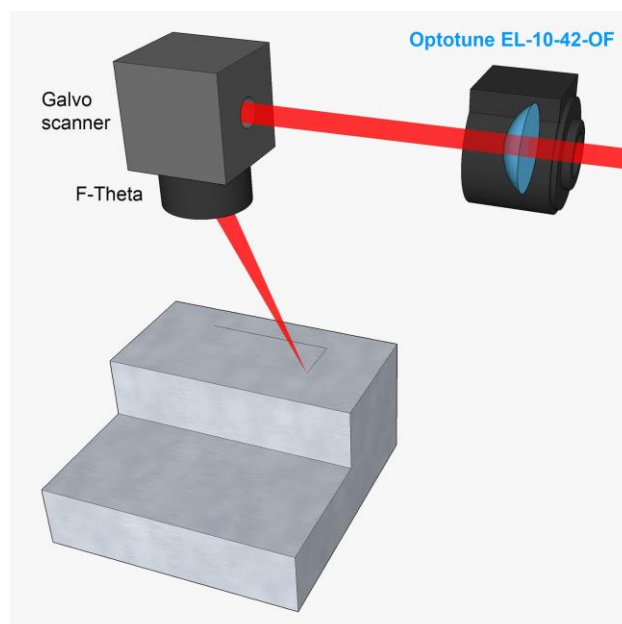
精密&快速光束控制反射振镜：<https://www.sintecclaser.com/optical/beam-steering.html>

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

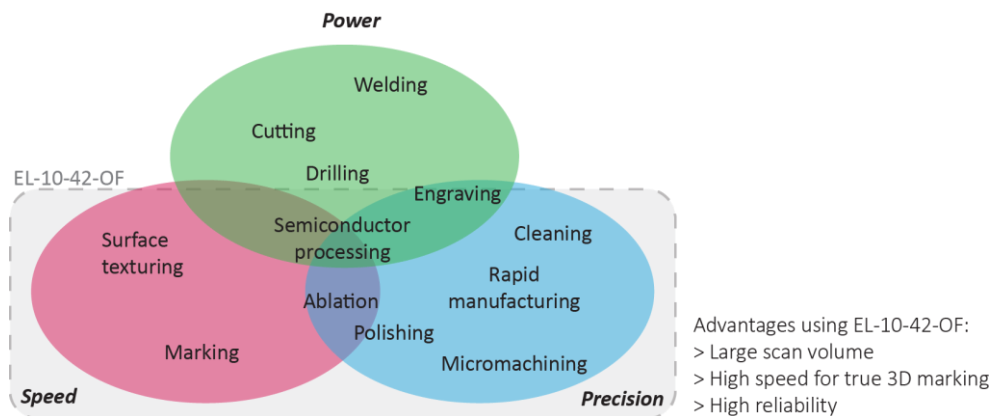


1. 引言

目前市场上常用的激光加工 Z 轴控制方案主要依赖光学元件的机械平移。此类方法的主要局限在于移动速度较慢、Z 向行程有限。此外，精密的可动部件寿命有限，且在系统集成中占用空间较大。

在本应用说明中，我们介绍如何将 Optotune EL-10-42-OF 可调焦液体透镜与 EL-E-OF-A 控制板集成到不同的激光加工系统中。EL-10-42-OF 透镜重量轻、体积小、响应速度快且寿命长，因此能够有效克服机械方案的诸多缺点，同时降低系统成本。

EL-10-42-OF 透镜专为脉冲激光设计，提供两种波长选项：近红外波段（950–1100 nm）和可见光波段（532 nm）。这在多种激光加工应用中使用 EL-10-42-OF 透镜提供了可能性，如下所示。



2. 使用 EL-E-OF-A 控制板控制 EL-10-42-OF 透镜

Optotune 的 EL-E-OF-A 控制板专为控制 EL-10-42-OF 透镜而设计。当 EL-10-42-OF 透镜沿 Z 轴（垂直方向）移动激光光斑时，振镜（galvo mirrors）负责在 X-Y 平面（水平方向）偏转激光光斑。这种控制方式在第 3 节介绍的紧凑型激光打标机中得到实现，示意如图 1 左侧面板所示。

PC（用户端）与 XY2-100 数字控制卡的通信通常通过串行总线（如 USB）建立。在扩展的 XY2-100 协议中，除用于控制振镜的 X、Y 轴外，Z 轴信号已可用于控制 EL-10-42-OF 透镜。控制卡将 X、Y 轴的数字信号传输至扫描头以控制振镜；Z 轴的数字信号则需通过数模转换板（例如 SCAPS AEB-2 板）转换为模拟电压。图 1 右侧面板显示了另一种可能的集成方式，当 XY2-100 控制卡具有辅助模拟电压输出时，该输出常用于控制外部设备，如 Z 轴工作台。

使用 EL-E-OF-A 的配置非常适合处理需要在不同高度（Z 轴步进）进行激光加工的平面工件。由于每次 Z 坐标变化都会中断加工过程，若需实现高速 3D 加工，则更适合使用数字控制器，如另一份应用说明中所述。在此配置中，Z 轴控制板可与工业实时总线（例如 XY2-100 协议）同步，实现沿三维轮廓的高速聚焦。

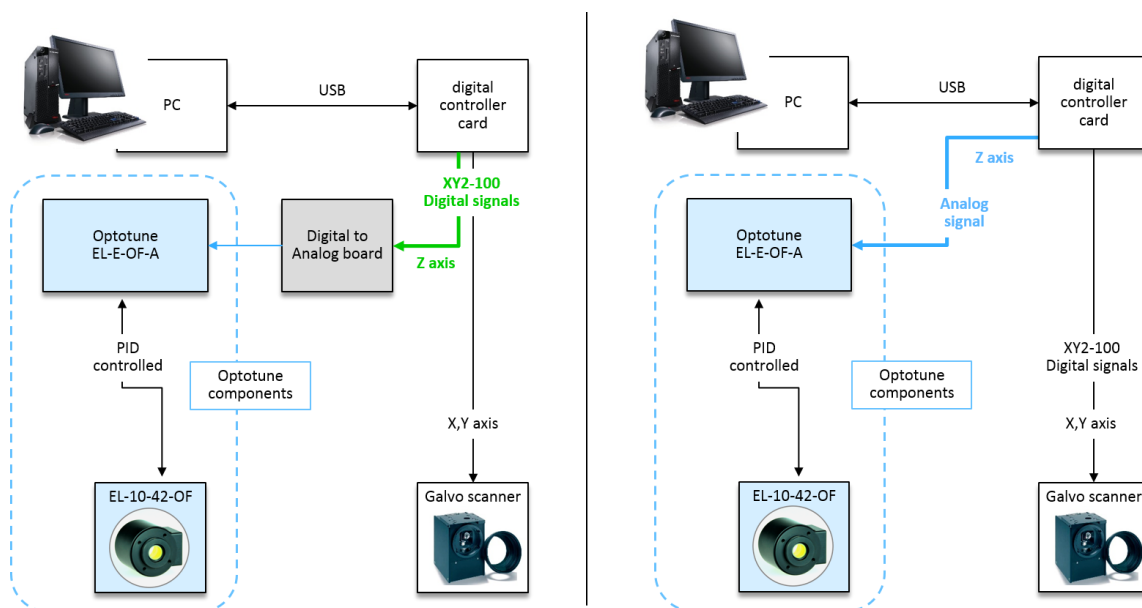


图 1: 左侧面板显示了 Optotune EL-10-42-OF 透镜在数字协议系统中的集成方式, 该协议提供 X、Y 和 Z 轴信号。其中 Z 轴信号通过数模转换, 用于驱动 Optotune EL-E-OF-A 控制板。右侧面板显示另一种方式: 透镜直接由控制卡提供的模拟信号控制。

3. 系统集成

图 2 展示了 Optotune 构建的 1064 nm 紧凑型 2.5D 激光打标系统的集成示例。由于体积紧凑, EL-10-42-OF 透镜可方便地安装在激光输出端与振镜扫描头之间的空隙中 (见图 3)。为确保激光束、EL-10-42-OF 透镜与振镜头光阑同轴, 需要为 EL-10-42-OF 透镜设计专用的机械支架。



图 2: 激光打标系统示意图, 采用电动可调焦透镜 EL-10-42-OF 及其模拟控制器 EL-E-OF-A, 实现快速 Z 轴聚焦。

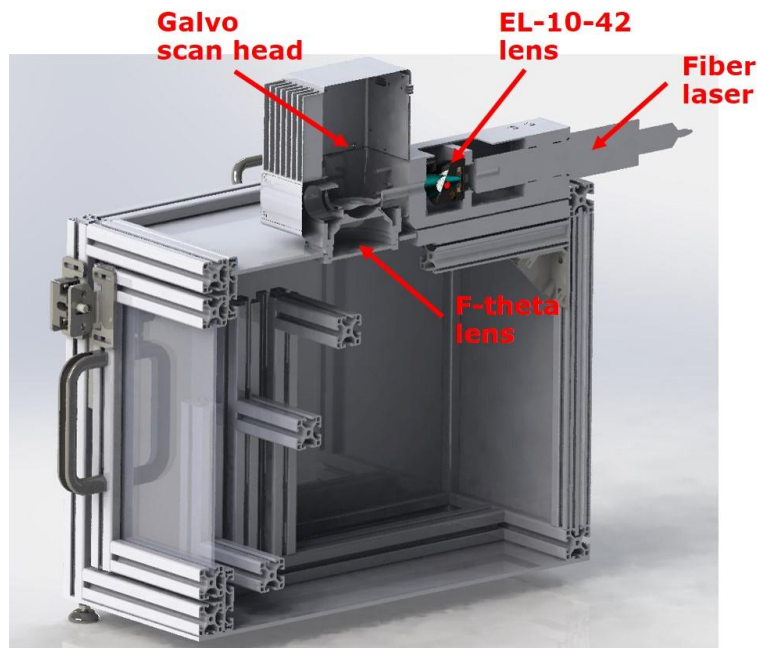


图 3: 激光打标演示系统示意图。电动可调透镜 EL-10-42-OF 安装在激光头与振镜之间。

下表总结了演示型激光打标系统的主要技术规格。

基本规格

外形尺寸	400 x 400 x 300	mm
重量	约 15	kg
中心位置标记范围	100 x 100	mm
激光等级	1 (带外壳)	
激光器供应商	IPG / Nufern	
最大激光功率	20 / 50	W
波长	1064	nm
典型光斑直径	approximately 60	μm
场镜焦距	160	mm
典型跳转速度	6000	mm/s
Z 轴调焦范围	100	mm
控制软件	SCAPS SAMLight	

3.1. 与 F-Theta 镜头的集成

上一节展示的系统布局是激光加工系统中几种典型布局之一。本节将展示 EL-10-42-OF 透镜 配合三种常用光学布局的应用。不同 F-Theta 镜头组合下的 Z 轴调焦范围如图 4 所示。

在所有三种情况下，输出激光光束直径约为 6 mm。EL-10-42-OF 透镜 安装在从激光输出到振镜扫描头的光路上。随后，光束被振镜反射，实现目标平面上 X、Y 方向的偏转。模拟结果中显示的标记场尺寸对应振镜偏转角 $\pm 10^\circ$ 。激光光斑的 Z 位置由 EL-10-42-OF 透镜的焦距调节控制。对于焦距较长的 F-Theta 镜头，Z 轴调焦范围及标记场尺寸均会增大。在每种配置中，EL-10-42-OF 的焦距在最大范围内调节（-2 屈光度至 +2 屈光度）。标记平面的场平整化及最终聚焦由 F-Theta 镜头完成。该配置易于实现，因为 EL-10-42-OF 可直接集成到现有系统中。

¹ 根据需求，我们可提供所示光学配置的 ZEMAX 模型。

注意事项：当 EL-10-42-OF 调节输入光束的会聚或发散时，F-Theta 光学元件的固有缺陷会略微增强场像畸变。为获得最佳标记质量，应在软件端进行补偿，例如引入校正网格。

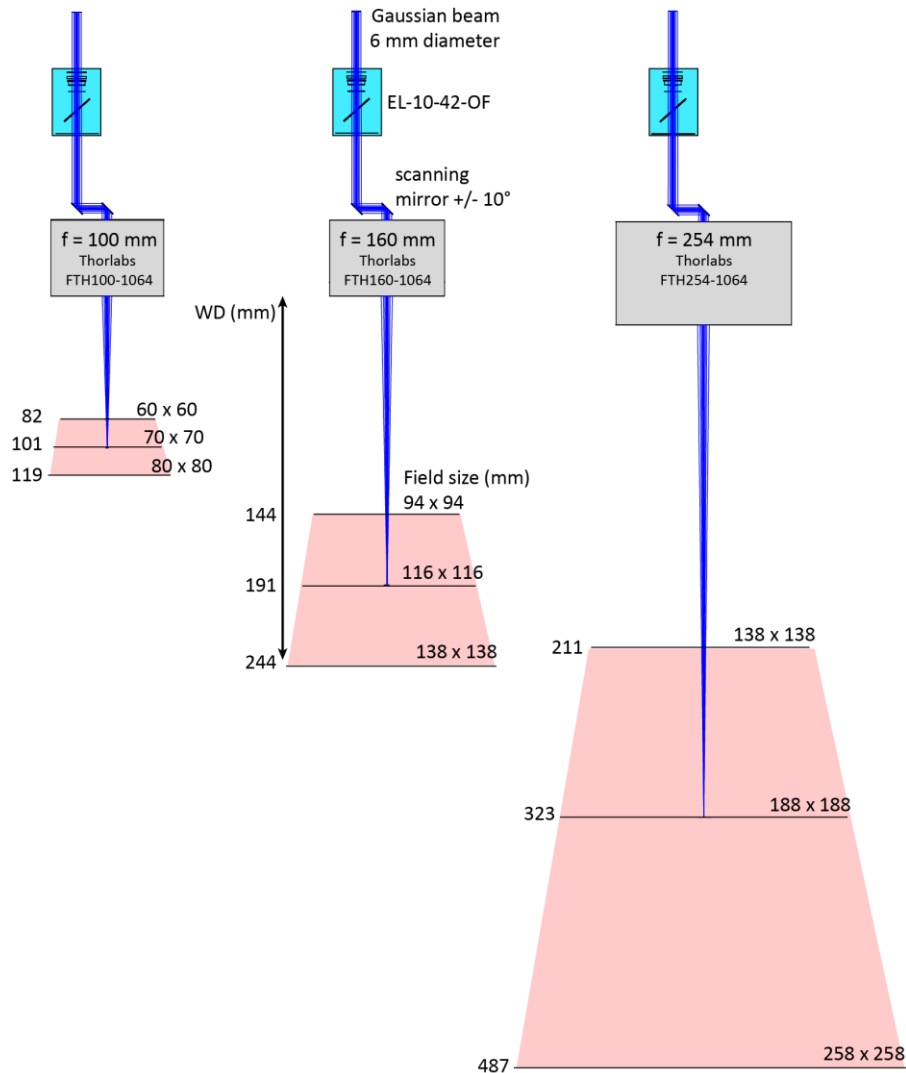


图 4：激光扫描系统示意图，包含 EL-10-42-OF 可调焦透镜、振镜扫描镜和 F-Theta 镜头。不同 F-Theta 镜头焦距 ($f = 100$ 、 160 和 254 mm) 会导致 Z 轴扫描范围、工作距离 (WD) 及标记体积 (红色标示) 不同。

3.2. 与伽利略型扩束镜集成

第 3.1 节描述的配置在工作区域尺寸、Z 轴调焦范围和光斑尺寸方面提供了一定自由度。然而，对于许多应用来说，需要更高的灵活性以优化调焦范围和光斑尺寸。一种方案是将 EL-10-42-OF 透镜与伽利略型扩束镜结合使用，这样光束放大系数可以作为额外的自由度进行调节。其通用设计如图 5 所示：EL-10-42-OF 透镜安装在构成光束扩束器的两枚定焦透镜之间。光束随后传输至振镜扫描镜，并由 F-Theta 镜头聚焦。

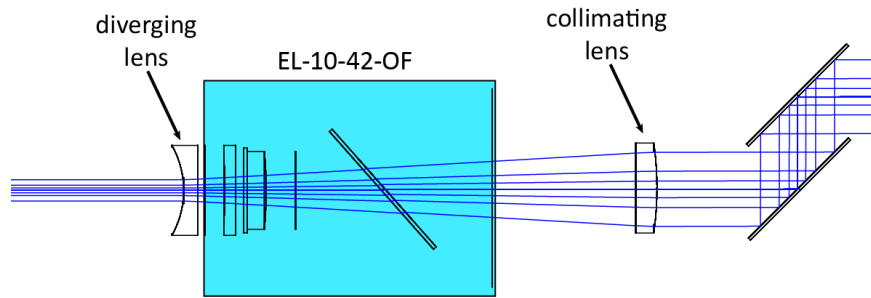
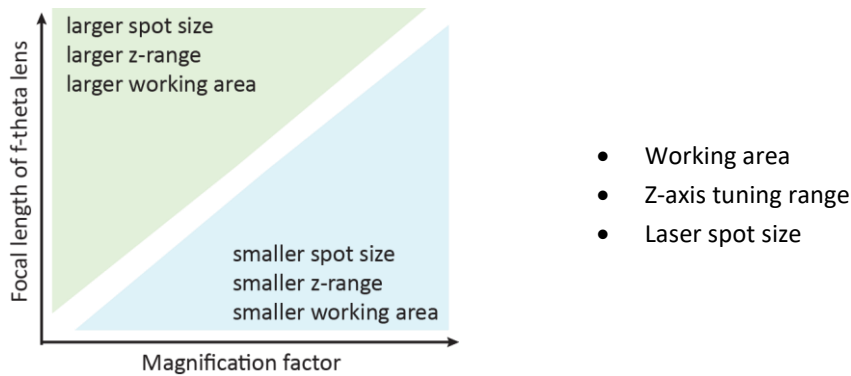


图 5: 伽利略型扩束镜与 EL-10-42-OF 透镜的通用设计示意图。光束放大系数是优化 Z 轴调焦范围和激光光斑尺寸的关键参数。

下图定性展示了通过不同 F-Theta 镜头与伽利略型扩束镜组合，如何调控工作区域、Z 轴调焦范围以及激光光斑尺寸。根据客户需求，我们可提供系统集成的光学设计建议。



3.3. 与现成扩束镜的集成

通过现成的扩束镜，同样可以实现多种光斑尺寸和 Z 轴调焦范围。图 6 展示了通用光学布局示意图。光束扩束器应尽量靠近 EL-10-42-OF 透镜安装，但定位精度要求不高。为了避免光束在振镜上被截断，振镜尺寸必须足够大，以容纳放大后的激光光束。

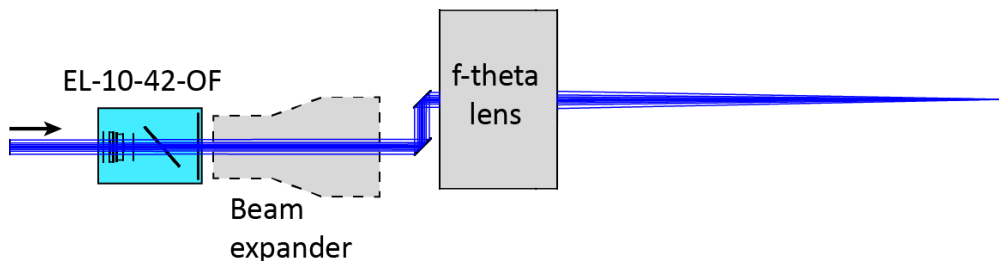



图 6: 集成现成扩束镜的光学布局示意图，扩束器应直接安装在 EL-10-42-OF 透镜之后。

假设输出激光光束直径为 8 mm，通过将不同扩束镜与 EL-10-42-OF 透镜组合，可以实现下表所示的 Z 轴调焦范围和聚焦光斑尺寸。来自不同厂商的光束扩束器均已测试，性能偏差仅为几百分点，可忽略不计。

		1x (无扩束镜)	1.5x	2x	3x
		100	最大输入 光束直径 (mm)	8	8
Z 轴范围 (mm)	39		18	10	4
光斑尺寸 (um)	26		17	18	17
160	最大输入 光束直径 (mm)	8	8	6	4
	Z 轴范围 (mm)	103	46	26	11
	光斑尺寸 (um)	42	28	28	27
254	最大输入 光束直径 (mm)	8	8	8	6
	Z 轴范围 (mm)	263	117	65	27
	光斑尺寸 (um)	70	46	35	28

4. Z 轴校准

通过 EL-E-OF-A 控制板 驱动透镜时，需要输入 0-5 V 的模拟电压信号，信号分辨率应至少为 12 bit。EL-E-OF-A 通过调节透镜的光学功率，从而实现激光光斑在 Z 方向的位置移动，如图 7 左图所示。由于透镜在生产过程中存在公差，需要对控制电压与 Z 轴光斑位置之间的关系进行标定。基于 SAMLight 软件的详细 Z 轴校准流程见附录 1。

完成校准后，输入信号可直接对应 Z 方向在 z_{min} 与 z_{max} 之间的调焦范围，如图 7 右图所示。实际的 Z 轴调焦范围取决于 EL-10-42-OF 所处的具体光学系统结构。该校准过程通常只需执行一次，校准数据可通过查找表的形式存储在打标软件中。建议至少设置 10 个校准点，增加校准点数量可进一步提升 Z 轴控制精度。

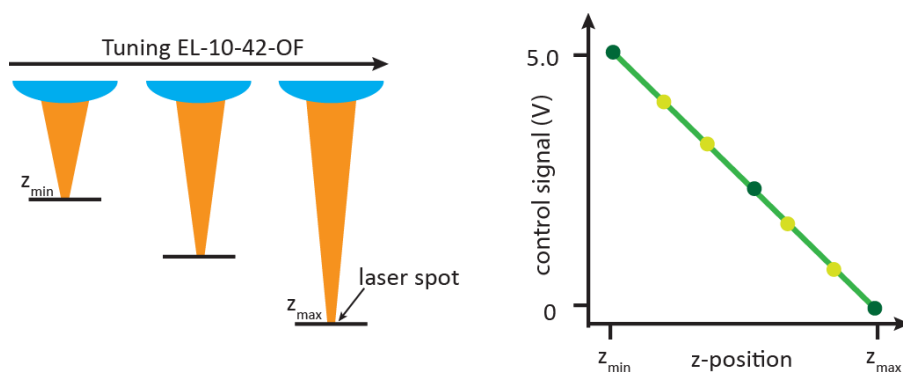


图 7：左侧面板展示了通过调节 EL-10-42-OF 透镜实现激光光斑在 Z 方向位置的变化。右侧面板给出了控制信号（0-5 V）与 Z 轴焦点位置之间的标定曲线。浅绿色点表示为提高校准精度所需增加的额外标定数据点。

5. 打标测试

使用演示型打标设备（见图 2），在标记体积的两个极限位置分别加工一个 $10 \times 10 \text{ mm}$ 的矩形图案。通过 $8\times$ 显微放大观察结果，未发现明显差异或性能劣化。

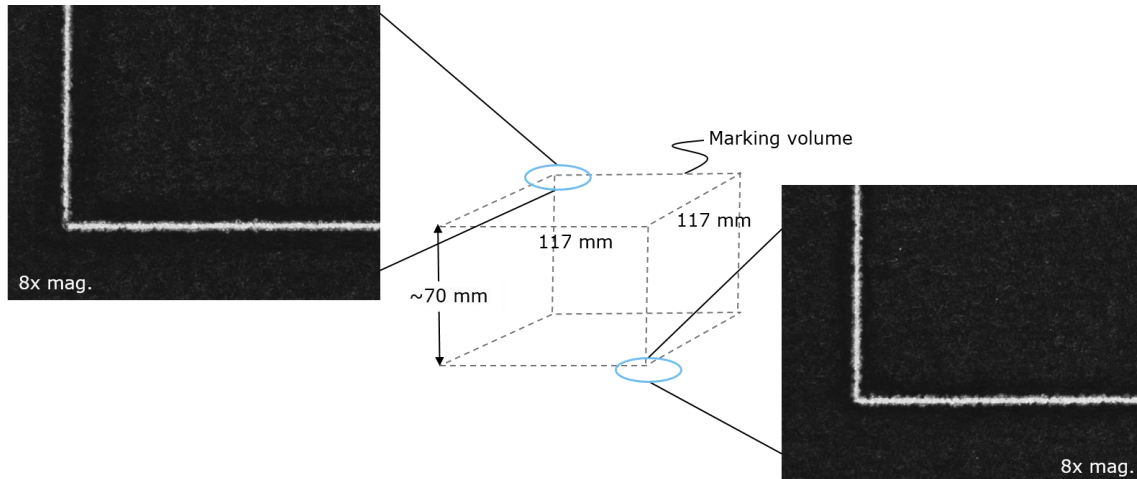


图 8: 标记体积两个极限位置下的打标质量对比。在两种情况下，均加工一个 $10 \times 10 \text{ mm}$ 的小矩形，并通过 $8\times$ 显微镜进行观察，结果未见明显差异。

在第二项测试中，我们评估了引入 EL-10-42-OF 透镜对打标质量的影响。在水平平面上加工一个 4×4 点阵。图 9 左图为光路中加入 EL-10-42-OF 时的结果，右图为将其从系统中移除后的打标结果。通过 $8\times$ 显微镜对样品进行观察，结果表明：EL-10-42-OF 的引入未对成像质量造成可见的劣化。

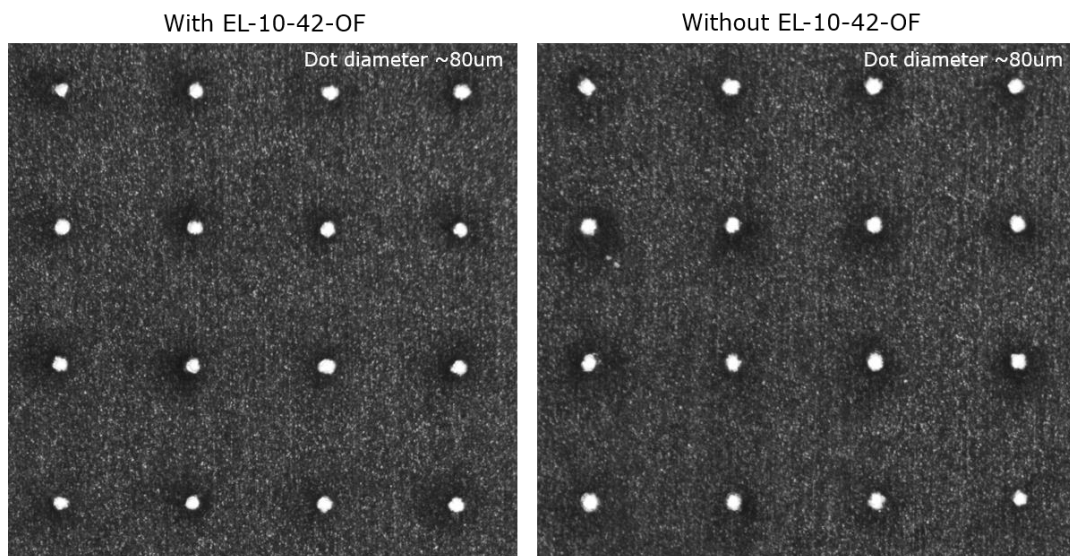


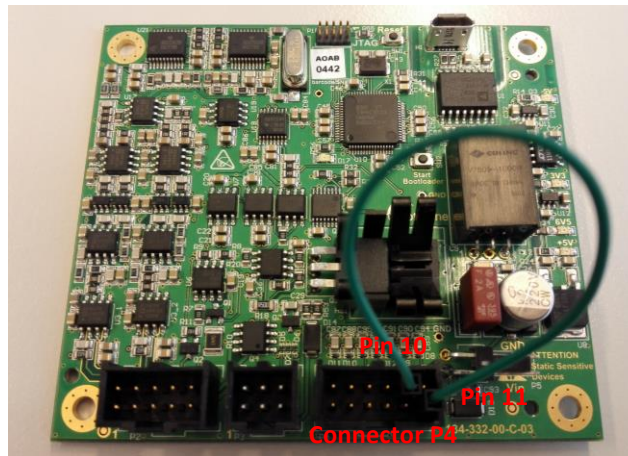
图 9: 对比在光路中引入与移除 EL-10-42-OF 透镜两种情况下的打标质量，结果显示两种配置之间无明显差异。

注意：L-E-OF-A 控制电子单元是专为 EL-10-42-OF 可调透镜设计的。在激光加工应用中，通常使用脉冲型高功率激光，这对基于光学反馈（OF, Optical Feedback）的控制精度提出了较高要求。

即使是极微量的杂散光，也可能在光学反馈信号中引入偏置，从而导致实际设定值发生漂移。尽管该残余偏移可通过 EL-E-OF-A 控制板进行电子补偿，但为了实现高效稳定的光学反馈控制，建议激光重复频率 ≥ 20 kHz。

6. 线性化：焦度与模拟电压的关系

在 EL-E-OF-A 控制板的固件中，已实现一项功能，可将透镜的焦度与施加电压之间的关系进行线性化处理。通过将连接器 P4 的 Pin 11 主动拉低，即可启用该线性化功能。实现该操作的简便方法是将 Pin 11 与 Pin 10（接地）直接连接，如下图所示。



启用与未启用线性化功能的测量结果如图 10 所示。

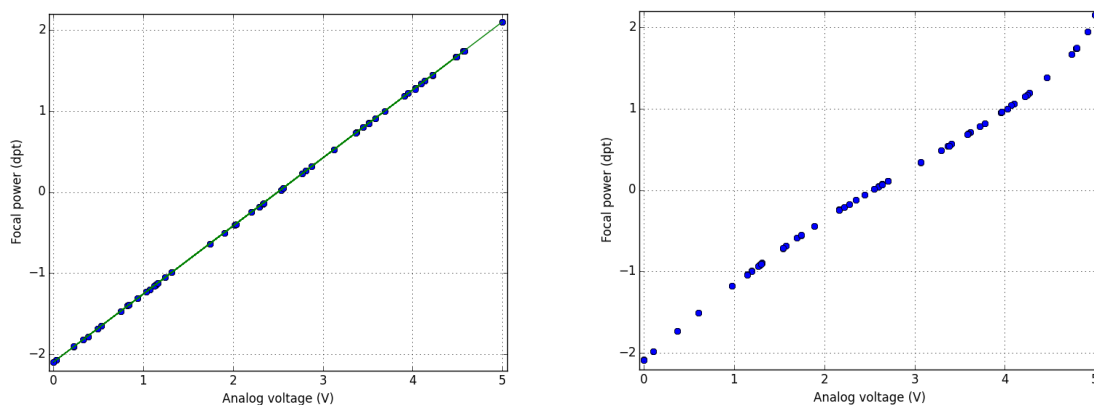


图 10: 焦度 (dioptr, dpt) 与施加电压之间的测量关系。左侧为启用线性化功能的结果，右侧为未启用（默认状态）线性化功能的结果。

该功能的主要优势在于：当工厂中需要校准多台打标系统时，可显著简化整个 Z 轴标定流程。第一台打标系统被定义为主系统，该系统需执行第 4 节所述的完整 Z 轴校准流程，通常建议采集 10 个以上数据点。在启用线性化功能的情况下，理论上其余设备的校准流程可简化为仅使用两个校准点。然而，为实现最佳且高精度的 Z 轴控制，仍然需要包含 10 个以上数据点的查找表。

根据需求，可提供 Excel 表格工具，用于基于主系统采集的数据以及两点校准结果，生成新的查找表。

7. 更多信息与技术支持

我们的应用工程师非常乐意为您提供关于 Optotune 产品集成方案的技术支持与设计建议。如有需要，请随时与我们联系。

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>

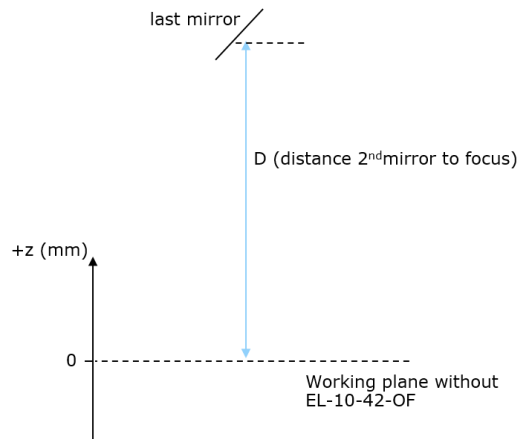
激光散斑衰减器：<https://www.sintecclaser.com/optical/laser-speckle-reducers.html>

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：

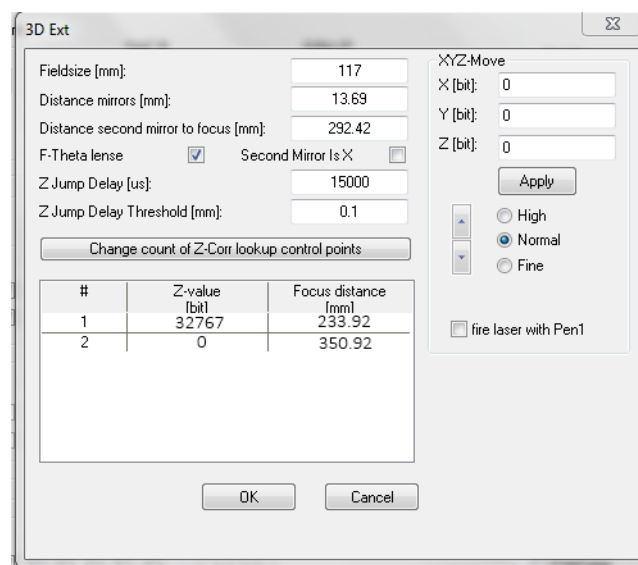
手机|微信：罗经理：18162698939，夏经理：13697356016

附录 1: 在 SAMLight 中使用 EL-10-42-OF 进行 Z 轴校准的方法

SCAPS 的打标软件 SAMLight 支持通过查找表方式轻松实现 Z 轴校准，其中将激光光斑的 Z 位置与控制电压进行映射。该方法已在本应用说明前文所述的标准打标系统中成功验证，其获得的精度约为 500 μm。如需更高精度，建议采用光束轮廓测量方法进行校准优化。坐标系定义如下图所示。



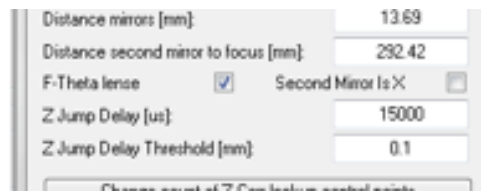
1. 假设从第二反射镜到加工平面的距离 D 已知（在该系统中，D = 292.42 mm）。在集成 EL-10-42-OF 之前，必须对该距离进行精确测量，例如使用机械 Z 轴平台进行标定。
2. 首先需要创建一个临时 Z 轴修正查找表（look-up table）。基于该临时表所进行的测量结果，将用于生成最终的 Z 轴修正查找表。



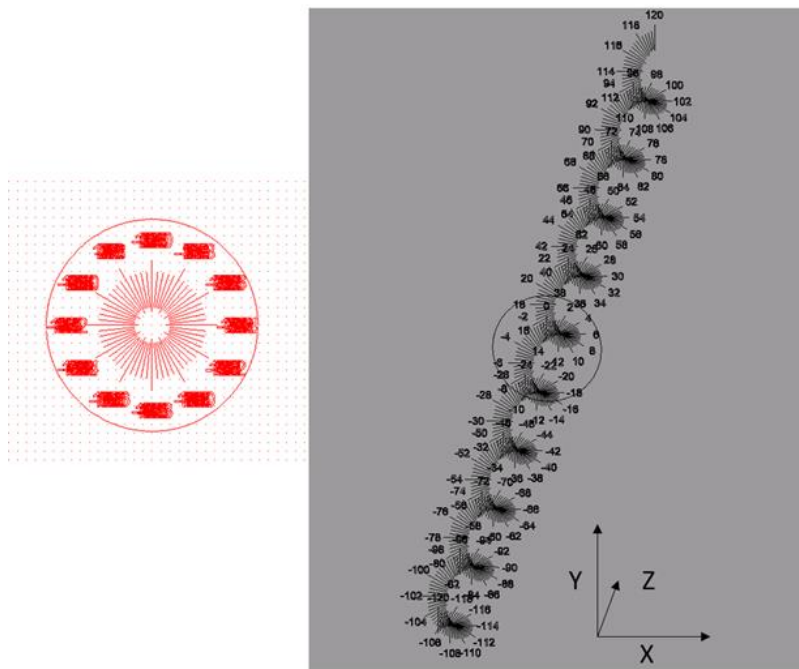
该查找表仅由两个 DAC 端点定义：DAC1 = 32767 和 DAC2 = 0，分别对应 0 V 和 5 V。该范围即为透镜控制电压的最大允许区间。对应的距离（mm）按如下方式计算，如下表所示：

DAC ₁	32767	$D - (x,y\text{-working area} / 2) = D_1$
DAC ₂	0	$D + (x,y\text{-working area} / 2) = D_2$

3. 在使用 F-Theta 镜头时，需要在 SAMLIGHT 软件中勾选对应的选项框以启用该功能。



4. 在 SAMLIGHT 中加载预定义的打标作业文件 “Calibrate_Optic3D_Circle_-120_to_120.sjf”。



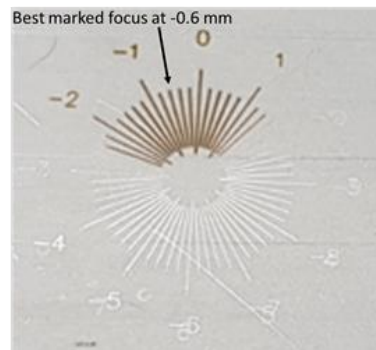
该作业文件用作垂直方向的标尺 (ruler)。它由 Z 方向 -120 到 120 mm 的线条组成，线条间距为 0.2 mm。如果您的 X、Y 工作区域小于此范围，需要在作业文件中删除部分线条，使 Z 轴范围 < X、Y 工作区域。否则，在执行 “Start mark” 后会出现错误提示 “Galvo out of range”。

5. 接下来，在单独的电子表格中定义最终 Z 轴修正表 (z-correction table) 的 Z 值数量。各校准点必须位于透镜的最大物理调焦范围内 (例如: -45...+45 mm)。例如：

z-value (mm)
-38.7
-17.5
0
29.8
42.6

6. 将打标样品 (例如阳极氧化铝板) 放置在最终 Z 轴修正表的第一个校准点 (本例中为 39.82 mm)。根据坐标系定义，负 Z 值表示低于零平面，正 Z 值表示高于零平面，与 SAMLIGHT 中的坐标系定义一致。然后开始执行打标作业文件。
7. 将样品移动至最终 Z 轴修正表的下一个校准点，再次执行打标作业。对所有 Z 值重复此操作，直至完成整个校准流程。

8. 从打标样品中提取 Z 位置标记值 (Fz)。为此, 可在标准显微镜下分析样品, 例如使用 8× 放大。这样可以更精确地定位处于焦点的“最佳”线, 提高 Z 轴校准精度。



9. 完成上述分析后, 您的 Z 轴修正表可能如下所示。在 Z 值 = 0 mm 时, 样品上的标记值不一定为零, 这可能与偏移量造成。校准过程会自动考虑并补偿该偏移。

z-value (mm)	F_z (marked value on sample)
-38.7	-34
-17.5	-17.5
0	-1
29.8	34
42.6	48.5

10. 接下来, 计算各点的距离: $D_z = D - F_z$ 在本例中, $D = 292.42$ mm。下一步, 为建立 DAC 值与 D_z 值之间的线性关系, 需要进一步计算相应的 DAC 数值。

$$DAC_z = a \cdot D_z + b$$

根据第 2 步中的系数进行计算:

$$a = \frac{DAC_2 - DAC_1}{D_2 - D_1}, \quad b = \frac{D_2 \cdot DAC_1 - D_1 \cdot DAC_2}{D_2 - D_1}$$

此时, 生成的表格应如下所示:

z-value (mm)	F_z (marked value on sample)	D_z	DAC_z
-38.7	-34	326.42	6861
-17.5	-17.5	309.92	11482
0	-1	293.42	16103
29.8	34	258.42	25906
42.6	48.5	243.92	29966

11. 最后一步, 应计算 $D - (z\text{值})$. 其中 D 为从第二反射镜到工作面的距离。

z-value (mm)	F_z (marked value on sample)	D_z	DAC_z	z-value absolute (mm)
-38.7	-34	326.42	6861	331.12
-17.5	-17.5	309.92	11482	309.92
0	-1	293.42	16103	292.42
29.8	34	258.42	25906	262.62
42.6	48.5	243.92	29966	249.82

附录 2：响应时间与振荡速度

使用 EL-E-OF-A 控制电子单元驱动 EL-10-42-OF 透镜 时，我们分析了 Z 轴步进激光加工中常用的三种信号形式：阶跃信号、正弦信号和三角信号。测量结果反映了控制电子单元有限带宽（主要因素）与透镜自身物理极限的综合影响。

阶跃响应

为量化焦点变化速度，对 光学反馈信号（Optical Feedback, OF）的阶跃响应进行测量。通过在 EL-E-OF-A 输入端施加 10 Hz 的矩形波控制电压 来实现阶跃变化。在图 11 中，蓝色数据表示控制电压的下限与上限，分别为 0.5 V 和 4.5 V，对应 10%–90% 阶跃。红色数据显示光学反馈信号的响应，其值从 -1.6 到 +1.6 dpt 跳变。在上升与下降曲线中，光学焦点在 12 ms 内达到设定值，偏差控制在 5% 内。反馈信号的小阶梯状特征来源于 1.1 kHz 的信号采样。数据通过示波器获取。

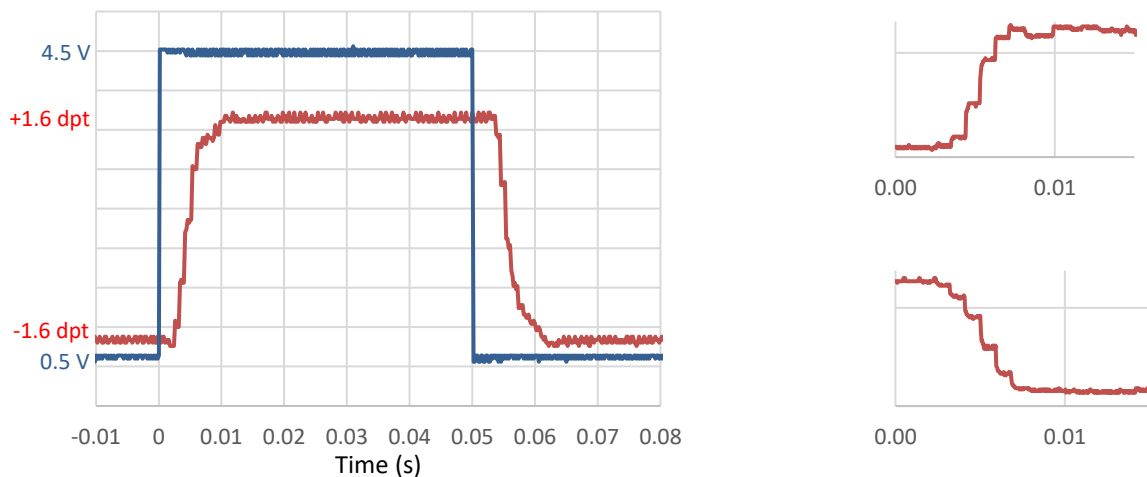


图 11: EL-10-42-OF 的光学反馈信号阶跃响应（红色）。蓝色数据表示施加在 EL-E-OF-A 控制板输入端的电压阶跃。左侧小图 为上升沿和下降沿的放大细节。

在更详细的分析中，我们研究了 阶跃高度对响应时间的影响。结果如图 12 所示，整体趋势表明阶跃高度越小，总 响应时间越短。总响应时间主要由两个部分组成：

- 恒定延迟 3.5 ms（虚线）：由 EL-E-OF-A 的有限采样率引起。
- 达到新设定值所需的有限时间（有限步数）：通常需要 6 至 7 个采样步（蓝色实线）。

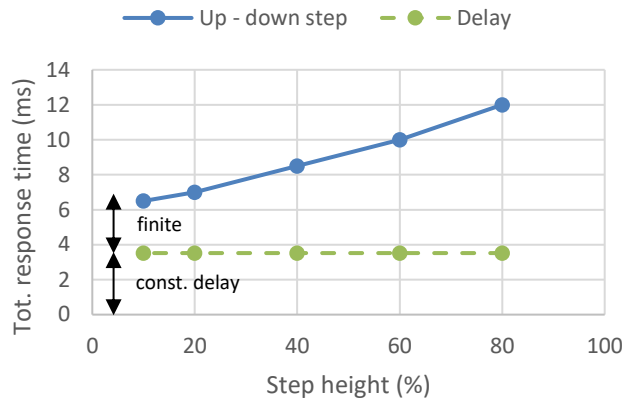


图 12: 总响应时间随阶跃高度变化的关系。总响应时间由两部分组成: 恒定延迟与有限上升时间, 其中有限上升时间随阶跃高度减小而缩短。

正弦调制

通过函数信号发生器施加正弦形设定电压, 并观察光学反馈信号的振幅及相位延迟。图 13 左侧显示振幅相对于直流极限 (恒定设定电压) 的归一化结果。当频率超过 40 Hz 时, 振幅开始下降。主要原因是存在 '恒定延迟 5.5 ms, 这一延迟导致相对相位 (以度为单位) 线性增加, 如图 13 右侧所示。比较 90% 调制振幅与 20% 调制振幅时, 未观察到显著差异。

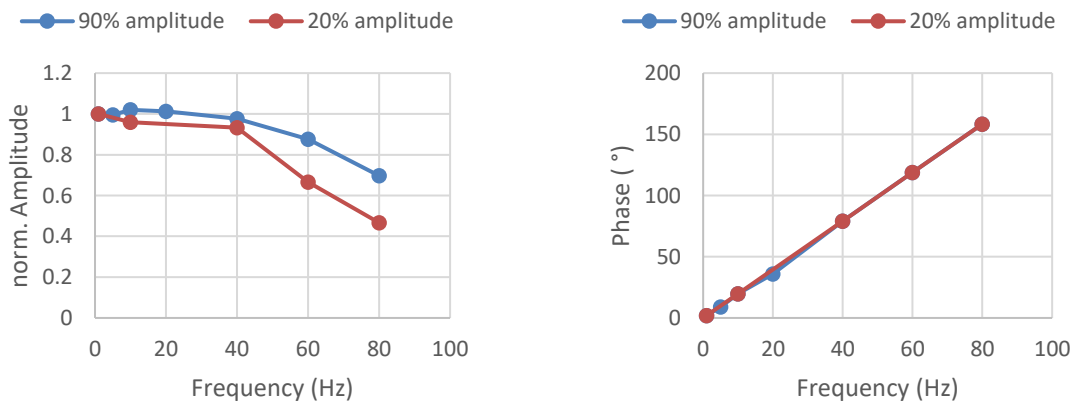


图 13: 左图为正弦调制下振幅随频率变化的归一化曲线。在 40 Hz 时, 振幅开始下降。在测量精度范围内, 90% 与 20% 调制振幅的结果相同。右图显示相对相位的线性增加, 反映了存在 '恒定延迟'。

使用可调焦液态透镜进行测距

本文展示了将可调焦液态透镜与自动对焦算法结合使用，可在不到一秒钟的时间内可靠地测量任意物体的距离（基于焦深）。测距的精度与成像系统的景深相匹配。除包含相机、物镜和可调焦液态透镜的成像系统外，不需要任何额外硬件。快速且高精度的对焦和距离测量为机器人视觉、智能制造控制等多种应用提供了便利并简化了实现过程。

引言

许多工业和消费类应用依赖于对不同距离放置的物体进行图像分析，例如物体识别、二维条码读取和激光加工。在传统透镜系统中，需通过机械移动光学元件相对位置来调节焦点。相比之下电动可调焦液态透镜通过直接改变自身形状实现焦点调节。这不仅显著加快了响应速度，还节省空间，因为它取代了一系列光学元件和机械结构。

在本研究中，我们开发了一款软件，使系统能够自动对焦，并通过将焦点位置与一组校准数据关联来计算物体距离。自动对焦算法通过评估在液体透镜调节范围内连续焦点位置拍摄的图像的对比值来实现（见图 1）。焦距功率（以屈光度计）与对比值的关系呈洛伦兹分布。通过拟合计算出的曲线，可找到对应最大值的屈光度，从而确定最佳焦点位置。该方法的优点在于，即使序列中未包含该最佳焦点图像，也能精确定位最佳焦点。除了自动对焦，许多应用还需要物体的距离信息。例如，激光打标系统需要知道物体的精确位置，以便在正确距离聚焦激光。因此，通常需要在系统中额外安装距离传感器。本文提出的概念允许将视觉系统同时用作距离传感器，从而降低成本并节省空间。

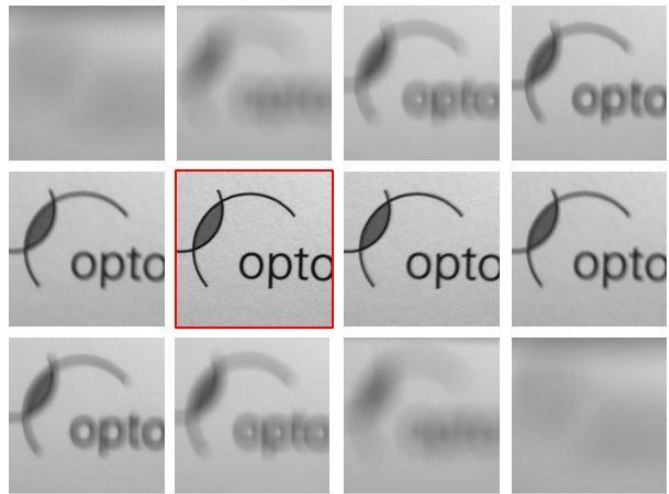


图 1：通过可调焦液态透镜在不同屈光度设置下扫描，以找到图像的最佳焦点。

软件部分

自动对焦算法操作流程如下：相机在不同屈光度值下拍摄多张图像，软件计算感兴趣区域的小范围对比度。随后将对比值与透镜屈光度拟合为洛伦兹曲线，如图 2 所示。最清晰的图像对应洛伦兹峰值，定义所需的屈光度设置。

图 2 显示了自动对焦程序流程。软件从最小可调屈光度开始拍摄图像（对于 EL-16-40，为 -2dpt）。第一次扫描中，每隔 0.4dpt 拍摄一张图像，直至达到最大可调屈光度（EL-16-40 为 3dpt），同时计算每张图像的对比值。随后确定与（迄今为止）最大对比值对应的屈光度设置。

为了精确自动对焦，首先在该屈光度设置周围定义一个小区间；其次，将透镜设置为区间内的最小屈光度值，开始第二次扫描，此次步长缩小为 0.04 dpt。扫描至区间内最大屈光度值后，将第一次与第二次扫描数据合并，并拟合洛伦兹分布 $f_L = \frac{A}{\pi} \frac{\gamma}{(x-x_0)^2 + \gamma^2} + c$ 。洛伦兹分布峰值位置即表示期望图像对比度最高的屈光度设置。

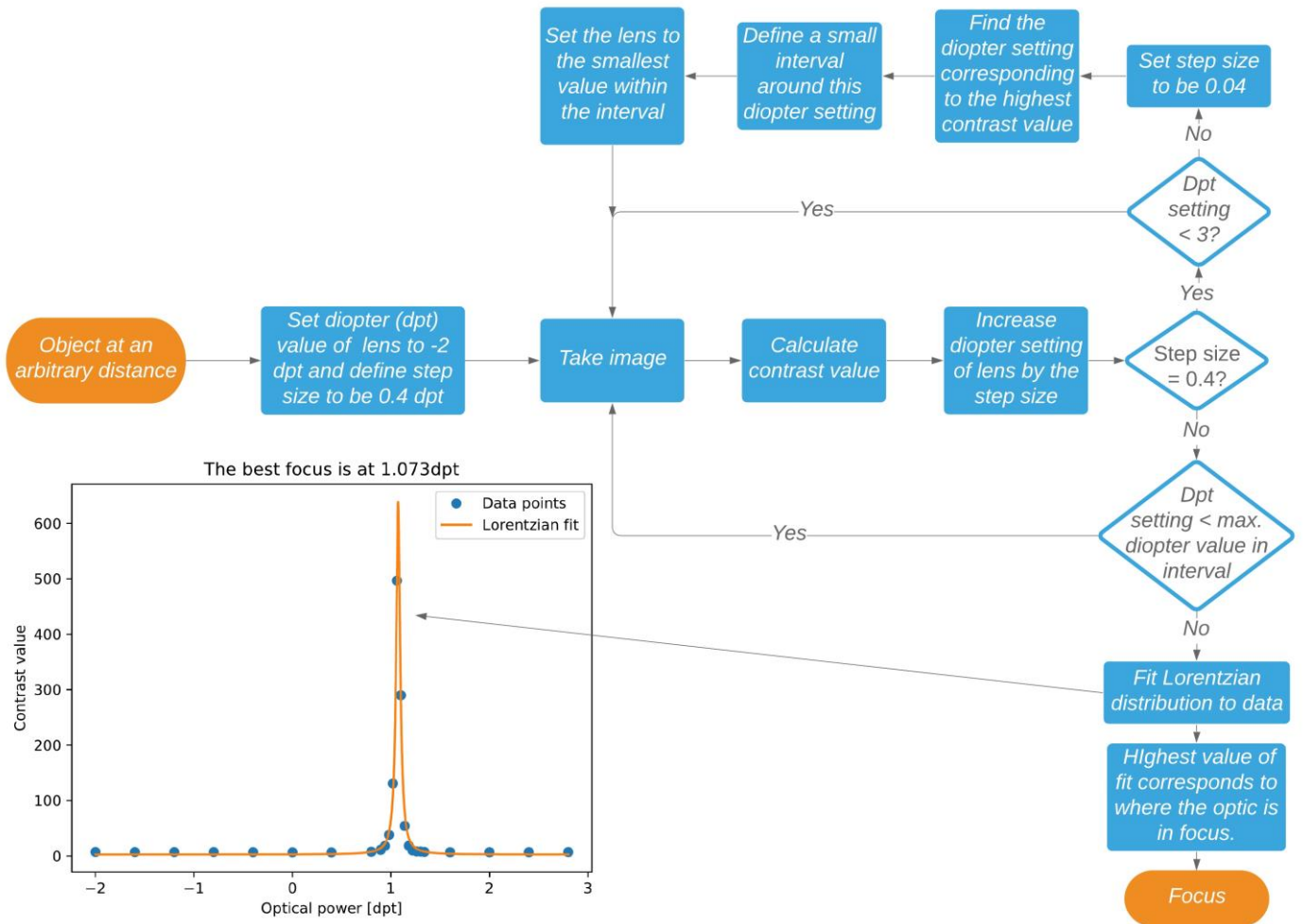


图 2：自动对焦算法的程序流程。软件在不同屈光度设置下采集图像的对比度值。第一次扫描采用较大的步长遍历整个屈光度范围，第二次扫描采用较小步长，在最大对比度附近采集数据点。随后对数据点拟合洛伦兹分布，分布峰值即指示最佳焦点对应的透镜屈光度。

为了计算物体距离，将最佳焦点对应的屈光度值代入基于校准数据建立的模型中（见图 3）。虽然可以使用简单的插值方法，但我们发现采用拟合良好的数学模型能够获得最佳测量结果。

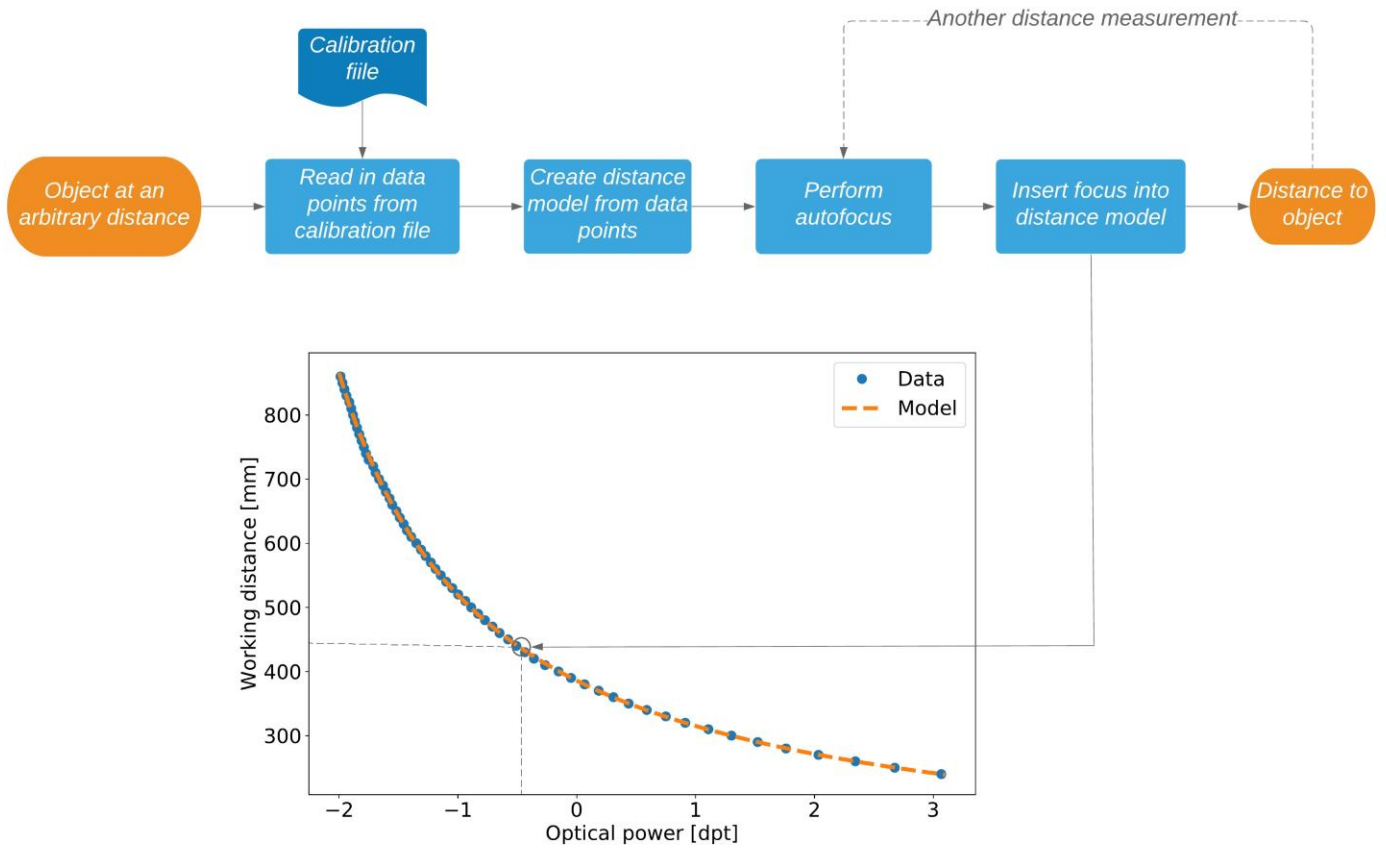


图 3：距离传感器的程序流程。软件首先读取包含拟合模型所需数据的校准文件。在我们的设置中，透镜光学功率与工作距离呈反比，因此模型以 $1/x$ 形式建立。一旦完成自动对焦，获得的焦点位置会被代入距离模型，从而计算物体距离。

x

每个系统都需要对距离测量算法进行单独校准（见图 4）。为了获取校准曲线，需通过自动对焦算法获取多个距离/屈光度组合的数据点。在收集足够数量的数据点后（在本例中为 60 个），将数据拟合为模型。如果可调透镜放置在固定焦距透镜前方（所谓“前透镜配置”），校准曲线呈现理论预期的 $1/x$ 形状（见图 3 中的曲线）。若可调透镜位于光学系统与传感器之间（所谓“后透镜配置”），曲线则更接近线性。增加校准点的数量可提高新传感器距离测量的精度。

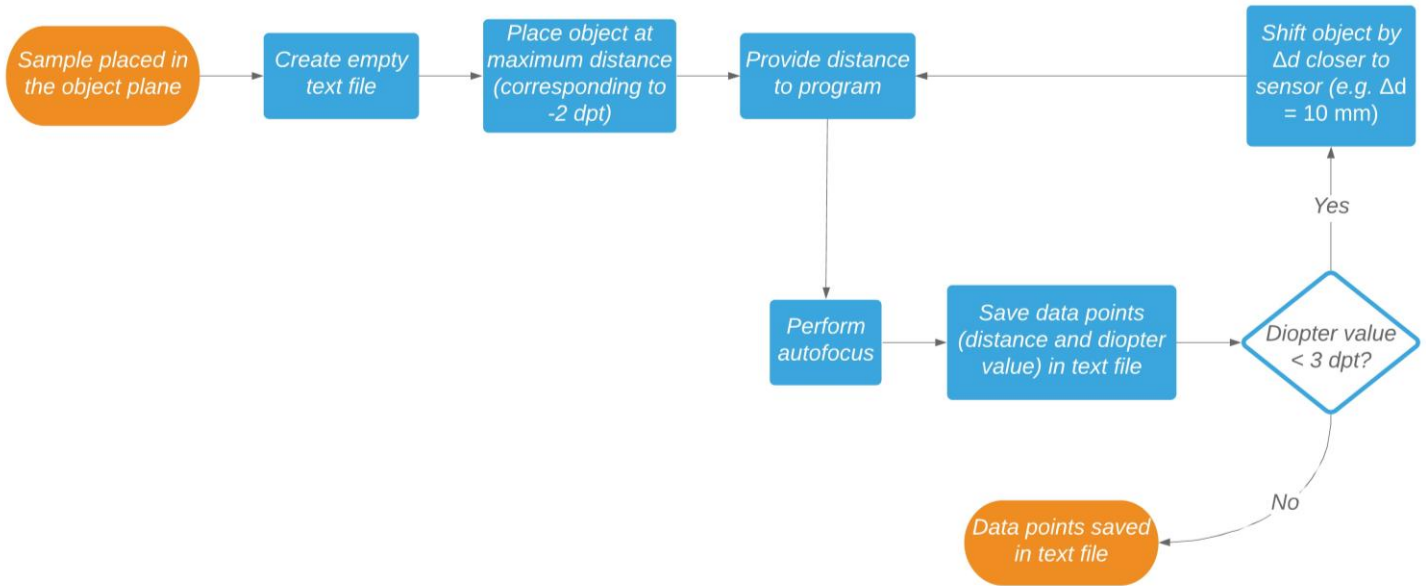


图4：距离校准的程序流程。软件采集相机到物体的实际距离及对应的屈光度设置，并将数据保存到文本文件中。该数据用于距离传感器的校准。增加校准点的数量可提高距离测量的精度，因此物体的位移 Δd 应保持较小。

适用于大工作距离应用的硬件配置

距离传感器的测量精度取决于硬件配置。图5展示了一种针对数百毫米工作距离优化的硬件方案。该系统由高分辨率图像传感器（IMX253，1.1英寸，4104×3004像素）、C接口镜头（Kowa LM50FC，工作距离300mm，F/1.8）以及电动可调焦液态透镜EL-16-40组成。该透镜具有5dpt的调焦范围和16mm有效通光孔径（对应等效光圈数F/3.1）。系统采用“前置透镜配置”，即可调透镜置于固定焦距镜头之前。

EL-16-40的工作原理基于已成熟的形变聚合物液体透镜技术。其核心光学液体被密封在弹性聚合物膜内(如图6所示)。电磁执行器对充液容器施加压力，从而改变透镜曲率，使其在凹面与凸面之间变化。通过调节线圈中的电流，实现透镜光学功率的控制。



图5：机器视觉系统配置示意图。系统由C接口工业相机、50mm定焦镜头以及可调焦液态透镜组成，采用前置透镜配置方式。

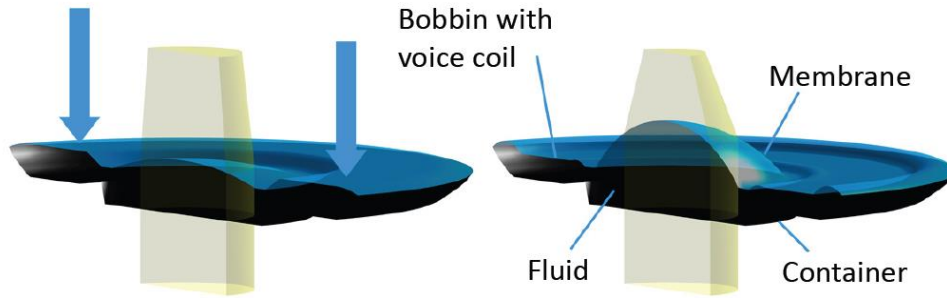


图 6: 电动可调焦液态透镜 EL-16-4 的工作原理

成像时间与精度表现

使用液态透镜作为自动对焦解决方案具有多项优势：结构紧凑、调焦范围大，并且相比机械对焦方式具有更高的速度与可靠性（循环寿命超过 10 亿次）。在控制电流发生变化时，液体透镜（以 EL-16-40 为例）仅需约 15 ms 即可稳定。因此，其对焦切换速度可达到每秒 60 次以上。对焦速度与精度之间存在一定的权衡。本研究中的算法针对精度进行了优化，完整对焦过程耗时约 0.5 至 0.9 秒，具体取决于目标物体的距离。影响自动对焦速度的因素包括：对焦范围、屈光度步进大小、相机曝光时间，以及在使用高分辨率传感器时的相机帧率。在使用高速相机的情况下，可以让可调透镜在整个调焦范围内以例如 20 Hz 的频率连续振荡，从而实现 25-0 ms 级别的距离测量时间。

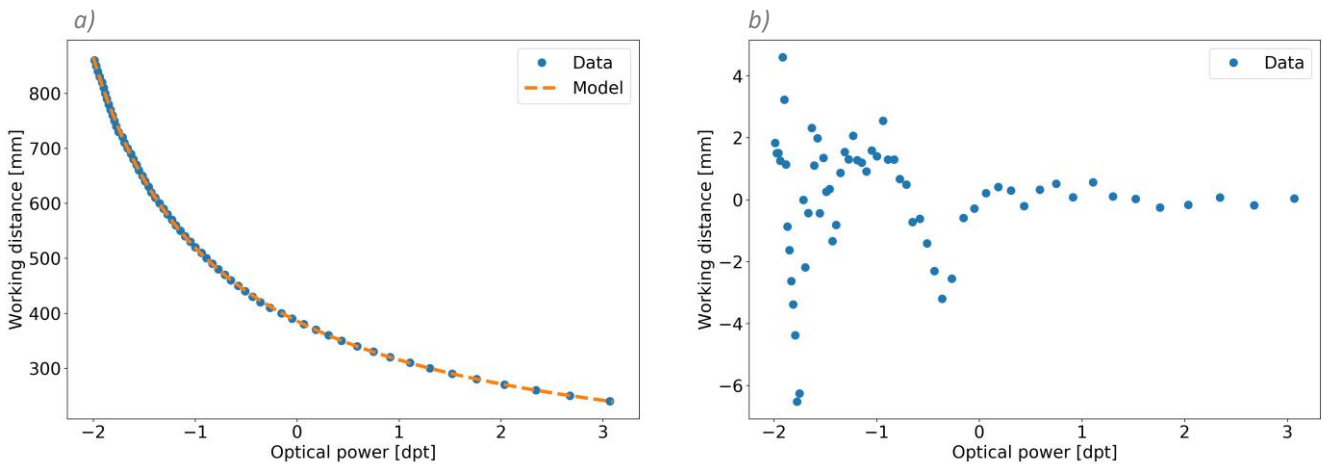


图 7: (a) 距离传感器的校准曲线，用于在图 5 所示配置下，根据已知光学功率获得对应的物体距离。(b) 校准曲线的残差（第 i 个数据点 x_i 与模型在 x_i 处预测值之差）。在负屈光度或较大距离区域，残差分布更为分散，表明该距离传感器在透镜正屈光度范围内具有更高的测量精度。

在本示例中，自动对焦的不确定度为 0.01dpt。距离传感器的不确定度由校准曲线的标定关系决定，该曲线呈 $1/x$ 形式（见图 7a）。由于该曲线的形状，在较小屈光度值区域曲线更陡峭。这意味着，在负屈光度范围内相同的屈光度变化区间，对应的距离变化区间要大于正屈光度范围内的情况。因此，在该系统中，距离测量的不确定度会随着工作距离的增加而增大。

这一点如图 8 所示，其中给出了四个不同距离下的标准差，以及相对于均值的最大与最小偏差。在正屈光度范围内，标准差比负屈光度范围内低一个数量级。这与景深与物距之间的二次关系相一致，即：

$$DOF \approx \frac{2u^2 Nc}{f^2} \quad \text{其中：} u \text{ 表示物距，} N \text{ 表示光圈数，} f \text{ 表示焦距，} c \text{ 表示弥散圆直径。}$$

图 8 所示的重复性误差完全处于成像系统的景深范围之内。例如，在 323 mm 工作距离处计算得到的景深为 1.4 mm，而重复性测试中的最大偏差仅为 0.25 mm。

另一种用于表征该效应的方法是计算残差（第 i 个数据点 x_i 与模型在 x_i 处预测值之差），见图 7b。由于在负屈光度或较大距离范围内残差分布更为分散，因此该距离传感器在透镜正屈光度范围内具有更高的测量精度。

三个参数——测得距离的重复性、模型带来的不确定度以及完整测量范围——均由具体的光学系统配置决定。对于本文所示的方案（采用 50 mm 镜头的前置透镜配置），在 240 mm 至 860 mm 的完整测量范围内，距离测量的不确定度最低可达 0.3 mm。

根据实际需求，可通过改变系统配置（例如采用不同焦距的镜头或采用后透镜配置）来调整测量精度与不确定度。对于激光加工应用（如 F- θ 镜头系统），将所述前置透镜配置与 F- θ 镜头结合使用，可预期其重复性精度优于加工激光的瑞利长度范围。

此外需要指出，该算法整体稳定性较高，可适用于绝大多数材料，包括纸张、纸板、电路板（PCB）以及多种金属材料，但在白色陶瓷材料上表现存在一定困难。

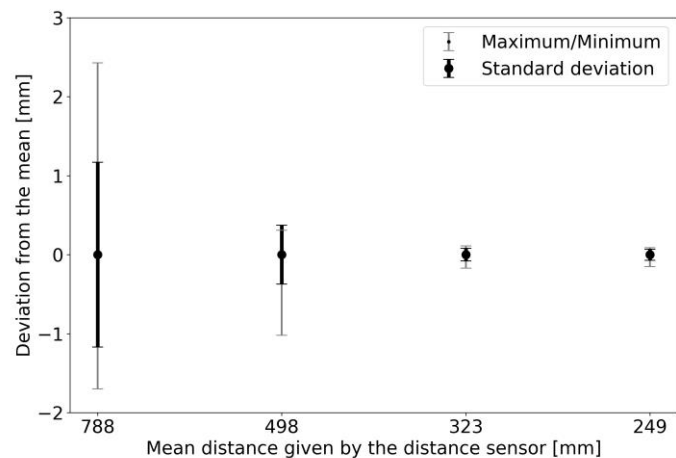


图 8：所述配置的重复性测试结果。图中给出了在四个不同距离下进行 10 次测量所得的标准差，以及相对于均值的最大与最小偏差。所有测量结果均处于景深范围之内；且在较短工作距离下景深更小，从而对应更高的测量精度。

结论

所提出的液体透镜系统可在单一视觉系统中实现快速自动对焦与距离测量。由于通过拟合分布的最大值来确定最佳焦点位置，因此在自动对焦扫描过程中无需实际获取最清晰图像，从而显著提升了算法速度与鲁棒性。光学系统可根据需求在测量精度与对焦范围之间进行设计优化，但两者通常存在权衡关系。所实现的测量精度整体优于光学系统的景深范围，例如在本实验配置中，于 323 mm 距离处景深约为 0.25 mm。

更多信息与技术支持

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



应用说明：视场扩展



更多信息与技术支持

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

1. 引言

机器视觉系统在分辨率、视场（FOV）以及焦深（DOF）方面存在基本限制。角分辨率与视场范围是一组相互制约的参数，其上限由图像传感器的尺寸与分辨率共同决定。

成像系统的视场由物镜的焦距 f 与图像传感器尺寸 S 决定：

$$FOV = 2 \tan^{-1} \frac{S}{2f}$$

焦距为 f , 对焦距离或物距为 d , 光圈数为 N , 弥散圆直径为 c 的成像系统, 其景深（DOF）由以下公式给出：

$$DOF \approx \frac{2d^2 Nc}{f^2}$$

在保持高分辨率的同时扩展视场（FOV）对于多种应用至关重要。例如，在火车站或机场的公共监控中，需要对大范围场景进行成像，同时保持高分辨率，以实现精细的目标检测或人脸识别（见图 1）。另一个例子是自动驾驶中的交通标志检测，视场扩展能够使系统在更远距离下识别并读取交通标志，从而提升感知能力与安全性。

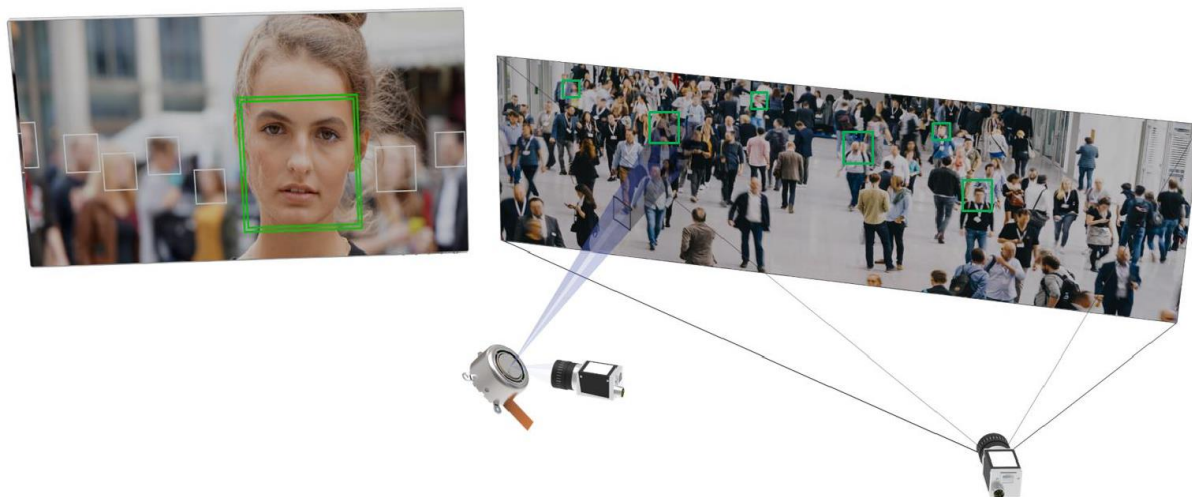


图 1: 利用二维快速转向镜实现视场扩展与感兴趣区域选择

在保持良好分辨率与大视场的应用中，其他典型场景还包括条码扫描与虹膜识别。为确保高分辨率成像，条码或人眼必须被精确定位在相机视场范围内，这在一定程度上限制了此类成像系统的易用性，甚至可能需要使用多个设备来覆盖所需的视场范围。

一种能够同时满足高分辨率与大视场需求的有效方案，是将二维快速转向镜与液体透镜相结合。其中，转向镜用于在大视场中选择一个较小的感兴趣区域，而液体透镜则用于快速调整焦点。

二维快速转向镜 MR-15-30 具有 15 mm 通光孔径以及高达 $\pm 25^\circ$ 的大扫描范围，同时其 EL-16-40 可调焦透镜具备 16 mm 的优异有效通光孔径，两者均非常适用于该应用，可实现紧凑且灵活的系统设计。相比二维 MEMS 微镜，MR-15-30 在扫描范围与有效孔径方面具有优势；相比振镜，其结构更为紧凑，仅需单一器件即可实现双轴转动控制。MR-15-30 的主要技术优势及液体透镜的工作原理如图 2 所示。

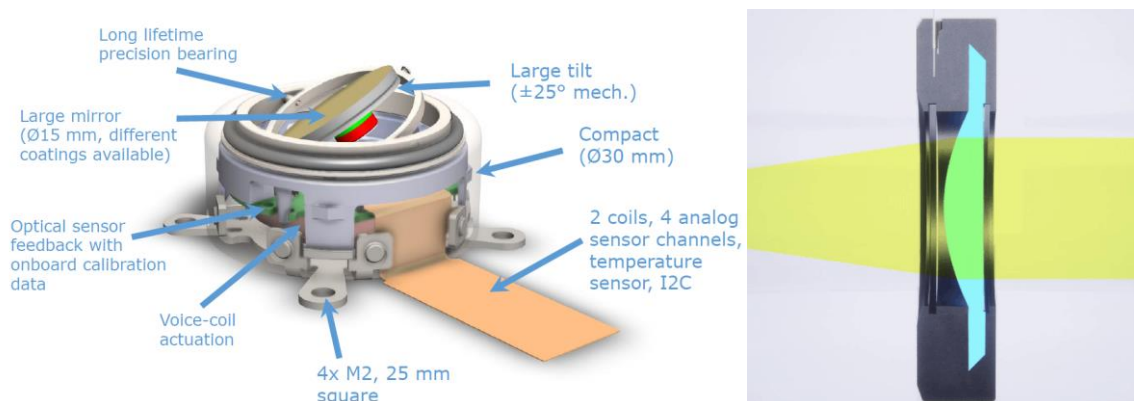


图 2: MR-15-30 快速转向镜的主要技术优势及可调焦透镜的工作原理

MR-15-30 与 EL-16-40 的组合已集成于视场扩展开发套件（详见数据手册）。完整套件如图 3 所示。该系统是一种即插即用解决方案，可在高达100°的光学角视场范围内实现高分辨率成像。该套件配套Cockpit 软件支持，并内置用于人脸识别与感兴趣区域选择的功能模块。



图 3: 视场扩展开发套件所包含的硬件组件

2. 相机标定

最简单且应用最广泛的相机模型是针孔相机模型。图 4 展示了目标平面或焦平面中的点 (x_t, y_t) 如何映射到相机成像平面 (x_c, y_c) 。为简化分析，通常将成像平面视为位于针孔前方，其距离等于焦距。

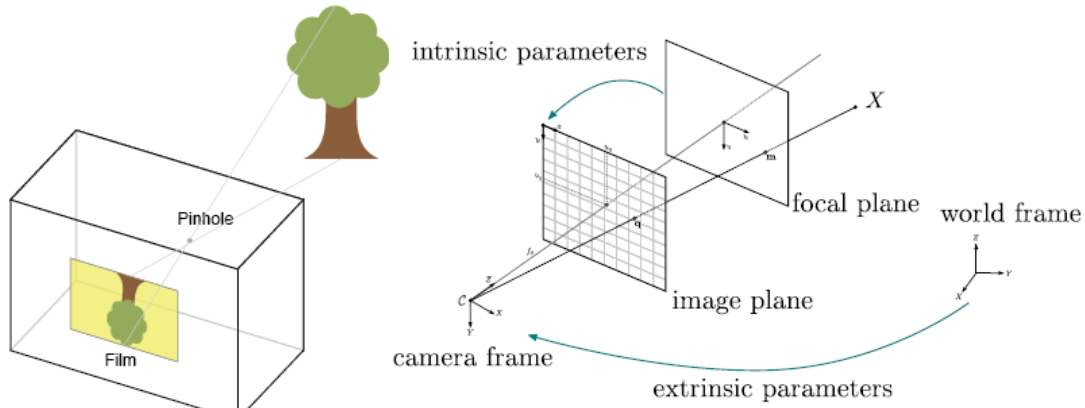


图 4: 左侧为针孔相机模型，右侧为相机内参与外参标定示意图。

该简单模型可以用以下齐次坐标形式表示：

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{bmatrix} = K [R \quad t] \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{where } K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, R = R^{-T} \text{ and } t \in \mathbb{R}^3$$

外参参数，即旋转矩阵 R 与平移向量 t ，用于描述世界坐标系相对于相机坐标系的位置与姿态关系。通过选择位于光轴正交方向、且距离为单位 1 的目标平面上的归一化坐标 (x_t, y_t) ，上述方程可以进一步简化为：

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ 1 \end{bmatrix}$$

这种仅使用两个坐标的参数化是合理的，因为单个相机无法仅凭成像信息确定物体相对于成像平面的真实距离。在不知道物体实际尺寸的情况下，相机仅能获取指向物体的角度信息。¹

对于理想针孔相机而言， $f_x = f_y = f$ ，然而，在实际系统中，由于传感器非理想性或镜头装调误差，这两个参数允许存在微小差异。参数 c_x 与 c_y 通常接近图像宽度与高度的一半，但也可能由于镜头偏心而产生偏移。

对于广角成像系统，上述线性相机模型的精度不足。因此，需要引入额外的非线性项来描述镜头畸变。常用模型为：

$$x_{c,\text{distorted}} = x_c(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + 2p_1x_cy_c + p_2(r^2 + 2x_c^2)$$

¹使用液体透镜进行调焦可以在无需任何先验领域知识的情况下实现距离测量。

$$y_{c,\text{distorted}} = y_c(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + p_1(r^2 + 2y_c^2) + 2p_2x_cy_c$$

其中 $r = \sqrt{x_c^2 + y_c^2}$, k_1, k_2, k_3 描述径向畸变（枕形和桶形畸变），而 p_1, p_2 描述切向畸变。

一种标准且实用的方法用于将这些参数拟合到测量数据集上是由 Zhang 提出的²。所需的仅是一组从不同位置和角度拍摄的平面棋盘格照片。一个示例实现可以通过以下链接获取，示例图片见图 5。通常至少需要 10 个不同视角的棋盘格图像才能得到精确的模型拟合。

在 FOV 扩展开发套件的情况下，Cockpit 允许导入如上所定义的标定矩阵和畸变向量，用于人脸识别程序。由于广角相机为竖屏格式，必须满足条件 $c_x < c_y$ 。



图 5：用于校准广角相机以纠正镜头畸变的棋盘格示例图像。

² 张正友, 《一种灵活的新型相机标定方法》, 《IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence》, 2000, 卷 22, 第 1330-1334 页, DOI: 10.1109/34.888718.

3. 镜面坐标系

3.1.XY 坐标系的定义

为校准内部光学反馈机制并将其与物理镜面位置关联，定义了一个坐标系。该坐标系为笛卡尔坐标系，包含 X 轴和 Y 轴。X 轴垂直于从镜面部伸出的电缆方向，Y 轴与该电缆平行。坐标轴上的数值为无单位，通过镜面的最大光学偏转角度（即 50°）定义。沿每一轴，偏转 +50° 对应坐标值 +1，偏转 -50° 对应坐标值 -1。该定义对应于当镜面将沿 Z 轴传播、入射于镜面中心的激光束反射到屏幕上时所观察到的投影。例如，沿 X 轴的偏转角 θ 与坐标值 x 的解析关系为：

$$\frac{\tan(\theta)}{\tan(50^\circ)} = x$$

下图 6 通过三个示例说明了轴向偏转与 X 坐标之间的关系。

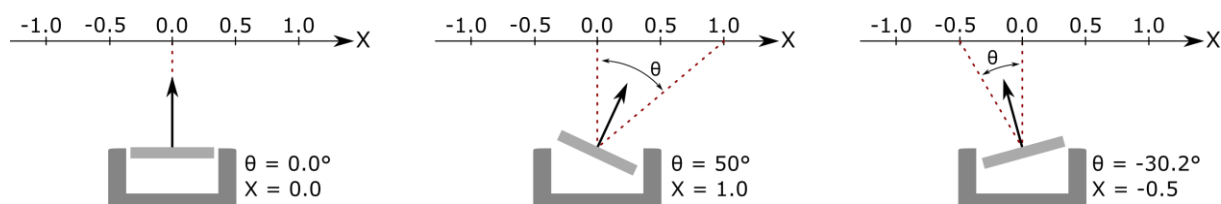


图 6：示例镜面偏转及其对应的 X 坐标，依据镜面坐标系定义。

该镜面的最大机械偏转为每个方向 25°。因此，在 XY 坐标系中，半径为 1 的单位圆包含了所有可达值，如图 7 中灰色所示。

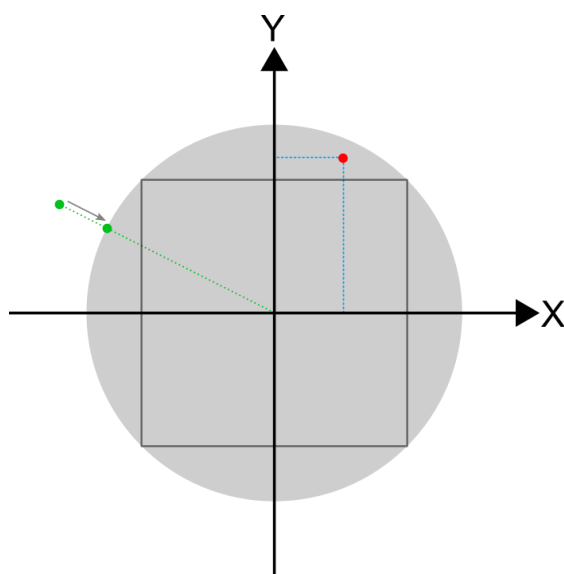


图 7：镜面坐标系及可达位置示意图。

镜面可以访问 X 和 Y 坐标同时小于 0.7 的所有组合（图 7 中黑色方块所示）。当 XY 中的某一个值超过 0.7 时，另一个值必须减小，以确保始终满足 $X^2 + Y^2 \leq 1$ （上图中的红点为示例）。镜面控制器固件会自动将超出可达单位圆的 XY 坐标移动到单位圆的最近边界（图中绿色点），以防止镜面或驱动器受损。

在开环模式下驱动镜面时，可以达到大于 25° 的角度，这对应 XY 坐标大于 1。然而，这些角度超出了镜面保证和标定的范围，因此标定精度可能显著下降。

3.2. 不同笛卡尔投影坐标之间的转换

在扫描系统中使用镜面时，通常 0° 入射角（AOI）的排列并不实用，因为入射光束和反射光束路径会重叠。图 8 展示了通用情况：镜面中点为 M ，法向量为 \mathbf{n}_m ，绕旋转中心 C 旋转，反射入射光束，入射光束由点 P_0 和单位向量 \mathbf{n}_0 指定。反射光束从点 P_1 出发，方向为单位向量 \mathbf{n}_1 。最终照射到目标平面上的点 P_2 ，目标平面距离未偏转镜面中心为 D ，并具有法向量 \mathbf{n}_t 。

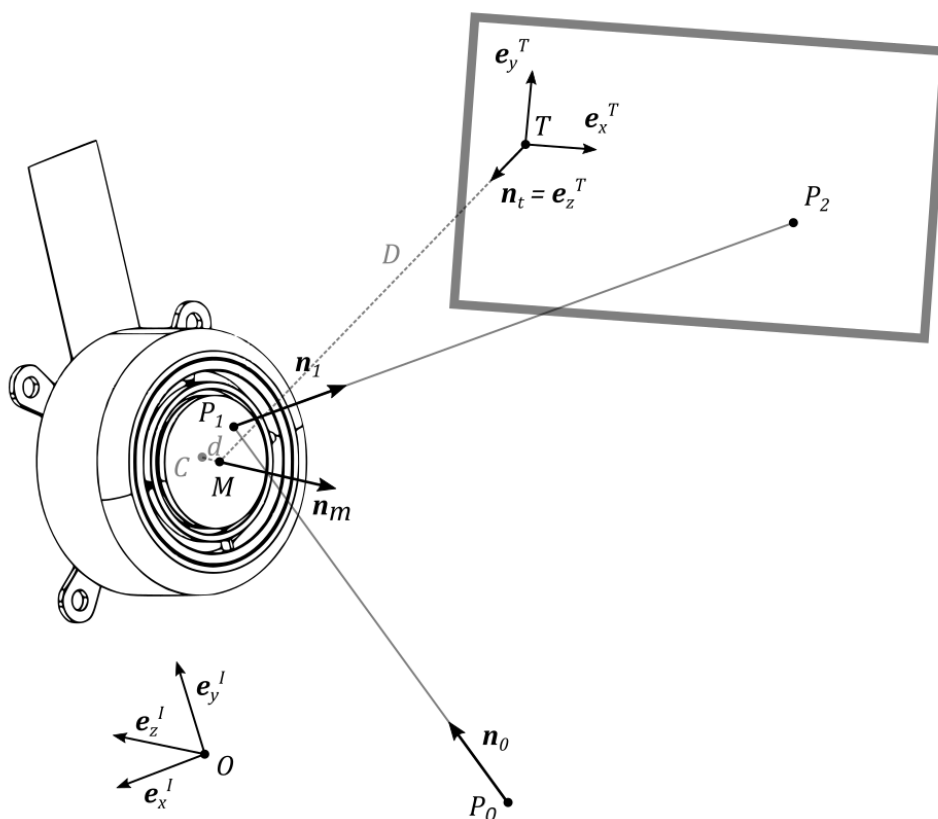


图 8：镜面与目标平面的坐标系定义。

该通用排列能够捕捉由于镜面旋转和入射角变化引起的畸变效应。

- 入射光束的入射角（AOI）
- 旋转的目标平面
- 偏心入射光束
- 离中心的旋转轴

用向量分析计算光路是直接的。首先，将入射光束的方程 $\mathbf{r} = \mathbf{r}_{OP_0} + t \cdot \mathbf{n}_0, t \in \mathbb{R}$ 代入反射镜平面方程 $(\mathbf{r} - \mathbf{r}_{OM}) \cdot \mathbf{n}_m = 0$ ，即可求得交点 P_1

$$\mathbf{r}_{OP_1} = \mathbf{r}_{OP_0} + t_1 \cdot \mathbf{n}_0$$

$$\text{where } t_1 = \frac{(\mathbf{r}_{OM} - \mathbf{r}_{OP_0}) \cdot \mathbf{n}_m}{\mathbf{n}_0 \cdot \mathbf{n}_m} \text{ and } \mathbf{r}_{OM} = \mathbf{r}_{OC} + d \cdot \mathbf{n}_m$$

然后，通过应用反射定律得到反射光束：

$$\mathbf{n}_1 = \mathbf{n}_0 - 2 \cdot (\mathbf{n}_0 \cdot \mathbf{n}_m) \cdot \mathbf{n}_m$$

最后，计算反射光束与目标平面的交点 P

$$2 \quad \mathbf{r}_{OP_2} = \mathbf{r}_{OP_1} + t_2 \cdot \mathbf{n}_1$$

$$\text{where } t_2 = \frac{(\mathbf{r}_{OT} - \mathbf{r}_{OP_1}) \cdot \mathbf{n}_t}{\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_t}$$

现在，我们可以将向量表示为目标平面坐标系下的形式： $\mathbf{r}_{TP_2} = \mathbf{r}_{OP_2} - \mathbf{r}_{OT}$

$${}^T \mathbf{r}_{TP_2} = \mathbf{A}_{TI} {}^I \mathbf{r}_{TP_2} = \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ 0 \end{bmatrix}$$

其中， $\mathbf{A}_{TI} = \mathbf{A}_{IT}^{-1} = \mathbf{A}_{IT}^T$ 是参考系 I 与 T 之间的正交变换矩阵。

在简化情况下，当入射光束击中镜面中心且假设 d 时，有 $P_1 = M = C$ ，此时可以通过投影坐标显式计算出镜面的姿态。

$$\mathbf{n}_m = \frac{\mathbf{n}_1 - \mathbf{n}_0}{\|\mathbf{n}_1 - \mathbf{n}_0\|}$$

$$\text{where } \mathbf{n}_1 = \frac{\mathbf{r}_{MP_2}}{\|\mathbf{r}_{MP_2}\|} \text{ and } \mathbf{r}_{MP_2} = \mathbf{r}_{MT} + \mathbf{r}_{TP_2}$$

请注意，该简化仍然能够捕捉由入射光线入射角 (AOI) 引起的畸变，而这通常是需要考虑的最主要因素。为方便起见，以下将原点 O 置于未偏转镜面的中心： $O = P_1 = M = C$ 。

上述方程可用于在归一化镜面坐标 (x, y) 与目标平面坐标 (x_t, y_t) 之间进行变换。：

$$(x, y) \rightarrow \mathbf{n}_m \rightarrow (x_t, y_t):$$

$$1. \text{ 根据镜面坐标的定义, } {}^I \mathbf{n}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \text{ 和 } {}^I \mathbf{r}_{MP_2} = \begin{bmatrix} x D \tan 50^\circ \\ y D \tan 50^\circ \\ -D \end{bmatrix}. \text{ 因此, 向量 } {}^I \mathbf{n}_1$$

$$\text{可以通过对 } \begin{bmatrix} x \\ y \\ -1/\tan 50^\circ \end{bmatrix} \text{ 进行归一化, 并结合镜面法向量计算得到 } \mathbf{n}_m = \frac{\mathbf{n}_1 - \mathbf{n}_0}{\|\mathbf{n}_1 - \mathbf{n}_0\|}.$$

2. 重新定义实际入射光束 \mathbf{n}_0 以及目标平面 (\mathbf{A}_{TI} 和 D). 利用已知的镜面法向量

\mathbf{n}_m , 根据上述公式计算 ${}^T \mathbf{r}_{TP_2}$, 并提取其前两个分量 (x_t, y_t) , 即 ${}^T \mathbf{r}_{TP_2}$ 的前两个坐标。

$(x_t, y_t) \rightarrow \mathbf{n}_m \rightarrow (x, y)$:

1. 指定实际入射光束 \mathbf{n}_0 以及目标平面 (A_{TI} 和 D). 计算 ${}_I \mathbf{r}_{MP_2} = A_{TI}^T \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ -D \end{bmatrix}$

然后对其归一化以得到 ${}_I \mathbf{n}_1$, 接着由下式求出镜面法线: $\mathbf{n}_m = \frac{\mathbf{n}_1 - \mathbf{n}_0}{\|\mathbf{n}_1 - \mathbf{n}_0\|}$.

2. 根据镜面坐标的定义, 重新表达相关向量关系 $\mathbf{n}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ 和 $A_{TI} = \mathbf{1}$. 利用前一步

得到的镜面法向量 \mathbf{n}_m 计算反射后的方向向量, 随后将 $\mathbf{n}_1 = \mathbf{n}_0 - 2 \cdot (\mathbf{n}_0 \cdot \mathbf{n}_m) \cdot \mathbf{n}_m$ 乘以一个常数比例因子进行缩放,

得到新的向量表达形式, $\begin{bmatrix} x \\ y \\ -1/\tan 50^\circ \end{bmatrix}$, 从该向量中即可提取出 x 与 y 分量。

以如下结构为例:

入射光束位于 yz 平面内, 以 45° 入射角照射至镜面中心。目标平面相对于未偏转镜面情况下的反射光束方向垂直放置, 即在 $x = y = 0$ 时, 目标平面与反射光束正交。

$${}_I \mathbf{n}_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad {}_I \mathbf{r}_{OP_0} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix}, \quad A_{TI} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 45^\circ & -\sin 45^\circ \\ 0 & \sin 45^\circ & \cos 45^\circ \end{bmatrix}, \quad D = 1700 \text{ mm}, \quad d = 1.3 \text{ mm}$$

图 9 展示了该情况下引入的畸变效应。作为对比, 同时给出了 100° 的光学视场, 该视场对应镜面在 0° 入射角 (AOI) 条件下所能实现的视场范围。

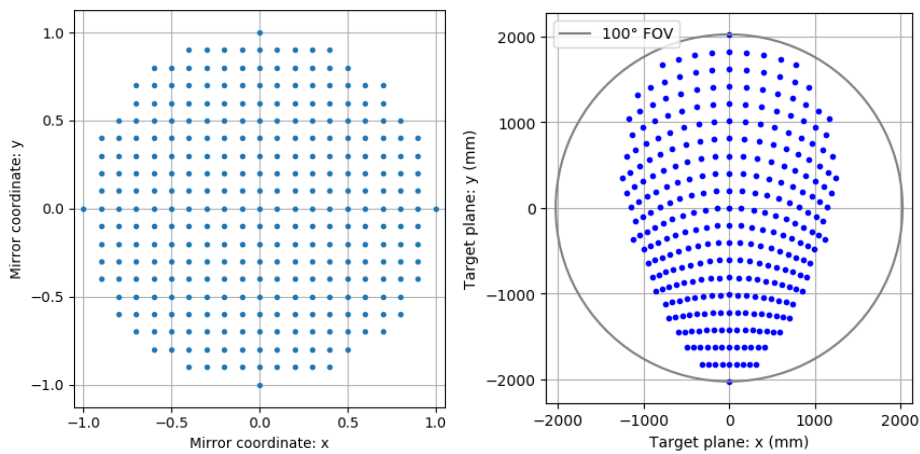


图 9: 在 45° 入射角 (AOI) 条件下, 对镜面可用角度范围进行等间隔采样所得到的模拟视场 (右图); 作为参考, 同时给出了 0° AOI 条件下产生的 100° 视场 (左图)。

4. 图像旋转

当镜面处于未偏转位置（如图 10 所示）时，相机获得的是上下翻转的图像，即镜像翻转结果。该问题通常较为简单，可以通过图像后处理进行校正，在部分相机系统中甚至提供专用的翻转设置选项。然而，当镜面进行扫描时，最终图像中的物体仍会表现出旋转效应。该旋转角度取决于镜面的法向量 \mathbf{n} 。下述配置与 FOV 扩展开发套件中的结构一致：相机垂直安装，镜面以 45° 倾角安装。

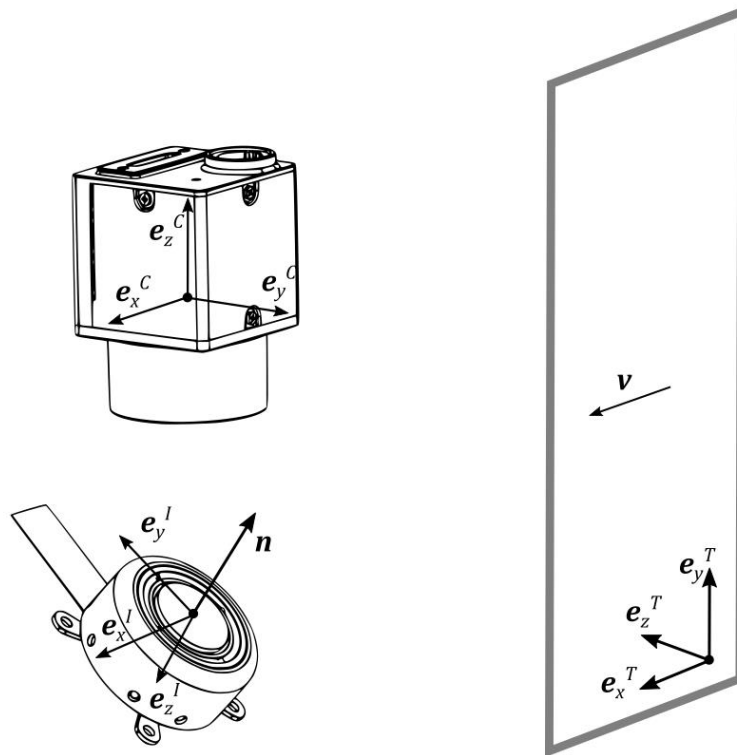


图 10：三种不同参考系——分别与物体/目标平面、镜体以及相机对齐的坐标系。

通过分析向量 \mathbf{v} 在相机中的映射关系，可以用于计算该旋转角度。为简化分析，假设 \mathbf{v} 与目标坐标系 T 的水平方向对齐，而该方向又与镜面的 x 方向一致，即： $\mathbf{v} = \mathbf{e}_x^T = \mathbf{e}_x^I$ 。当 \mathbf{v} 经镜面反射后，其通过 Householder 变换被映射为向量 \mathbf{r}

$$\mathbf{r} = (\mathbf{1} - 2\mathbf{nn}^T) \mathbf{v} = (\mathbf{1} - 2\mathbf{nn}^T) \mathbf{e}_x^I.$$

将该方程在参考系 I 中表示，可得：

$${}^I\mathbf{r} = \begin{bmatrix} 1 - 2n_x^2 & * & * \\ -2n_x n_y & * & * \\ -2n_x n_z & * & * \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - 2n_x^2 \\ -2n_x n_y \\ -2n_x n_z \end{bmatrix}$$

其中 $\mathbf{n} = [n_x n_y n_z]^T$ ，所有在矩阵-向量乘法中不参与计算的项用“*”表示。通过将该向量 \mathbf{r} 投影到图像传感器平面（图 11），可以计算旋转角度如下：

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{r_y}{r_x}$$

$$r_x = {}_I \mathbf{r} \cdot {}_I \mathbf{e}_x^C = {}_I \mathbf{r} \cdot \mathbf{A}_{IC} {}_C \mathbf{e}_x^C$$

$$r_y = {}_I \mathbf{r} \cdot {}_I \mathbf{e}_y^C = {}_I \mathbf{r} \cdot \mathbf{A}_{IC} {}_C \mathbf{e}_y^C,$$

其中 \mathbf{A}_{IC} 可表示为绕 x 轴旋转 135° 的旋转矩阵:

$$\mathbf{A}_{IC} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 135^\circ & \sin 135^\circ \\ 0 & -\sin 135^\circ & \cos 135^\circ \end{bmatrix}$$

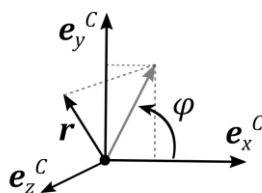


图 11: 向量 \mathbf{r} 在图像传感器平面上的投影。经过镜面反射后, 水平向量 \mathbf{v} 以角度 φ 发生旋转。

由此, 对于图 10 所示的系统 (对应旋转角度 $\varphi \in (-\pi/2, \pi/2)$), 其旋转关系可表示为:

$$\varphi = -\tan^{-1} \frac{\sqrt{2} n_x (n_y + n_z)}{1 - 2n_x}$$

需要注意的是, 为了将图像旋转复原, 必须对相机图像施加角度为 φ 的旋转变换。在使用校正后的图像时, 需要对角落区域进行填充或进行裁剪。裁剪操作可如图 12 所示, 通过最大化有效区域来实现; 另一种方法是在保持长宽比不变的前提下最大化有效成像区域。显然, 当旋转角度较大时, 这种处理方式会导致较大比例的图像信息被裁切。然而, 对于人脸识别或条码扫描等计算机视觉算法而言, 通常并不需要对图像进行反向旋转处理。

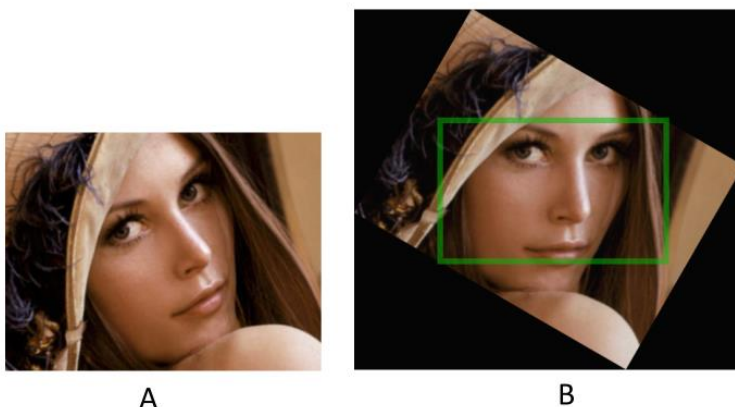


图 12: 相机采集的旋转图像 (A) 与反向旋转校正后的图像 (B)。

5. 人脸检测

图 13 展示了 Cockpit 中人脸检测演示程序的流程，该程序随 FOV 扩展开发套件一同提供。该演示算法首先在广角概览图像中检测人脸，并利用可调焦透镜与二维反射镜对该区域进行定向采集，从而输出对应的人脸高分辨率聚焦图像。该算法基于 Linzai 提供的神经网络模型，并由 Takuya Takeuchi 移植为 C# 实现。

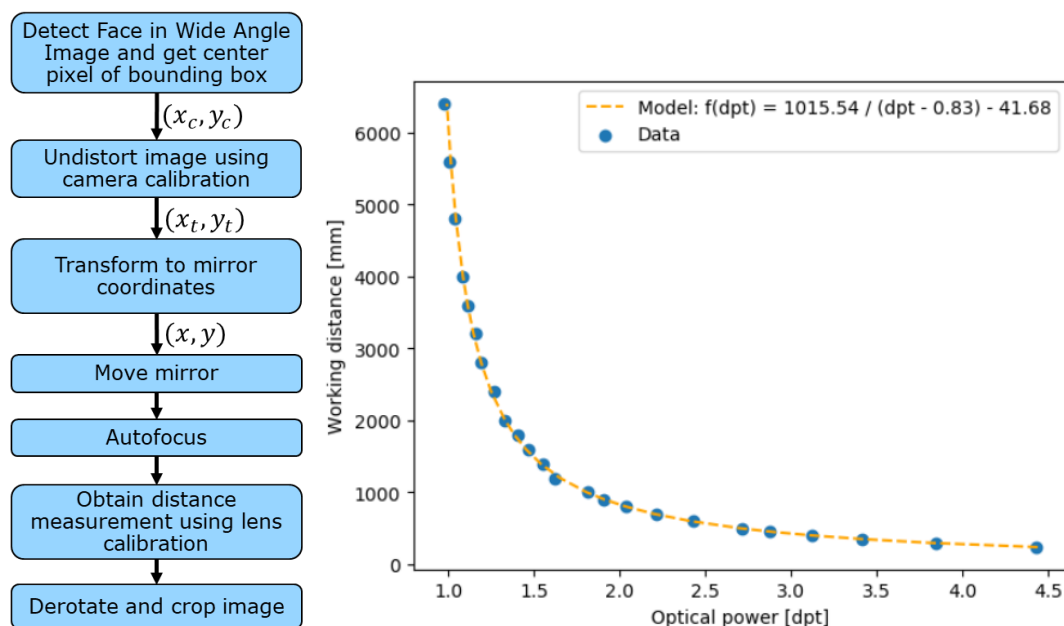


图 13: Cockpit 中人脸检测演示程序流程图 (左) 以及距离-离焦定例 (右)。

关于使用液体透镜实现自动对焦及距离测量的更多信息，请联系我们。为在精度与速度之间取得良好平衡，可对透镜稳定时间、屈光度上下限以及粗/细步进参数进行调节。FOV 扩展开发套件提供两种版本配置：分别搭配 50 mm 与 75 mm 固定焦距镜头。在 Optotune Cockpit 中，针对两种不同物镜分别提供了对应的距离-离焦测量标定参数。该标定仅在物镜手动对焦设置为无穷远时有效。也可通过自定义标定实现：测量不同工作距离 (WD) 下对应的所需光学功率 (FP)，并使用以下简单模型对参数 a、b、c 进行拟合：

$$WD = \frac{a}{FP + b} + c$$

完整的参数列表可以以 JSON 格式的文本文件导入 Cockpit。关闭 Cockpit 后，软件会在用户的 AppData 文件夹 (路径: %appdata%) 中保存更新后的 .json 文件。该文件将在下次启动时自动加载。

6. 图像拼接

除人脸识别与感兴趣区域选择外，FOV 扩展开发套件还可用于将多幅图像拼接为单一的高分辨率广角图像。示例如图 14 所示，另一个示例可在本公司网站获取。



图 14：千兆像素分辨率拼接图像示例。

6.1. 镜面坐标的选择

由于第 3.2 节所述的投影畸变效应，镜面坐标的均匀间隔并不会在实际场景中产生均匀的采样分布。相反，需要通过计算得到一组镜面坐标，使其在目标平面上实现均匀采样分布。

采样密度应设计为使相邻图像之间具有一定重叠区域，通常为 20%–40%。较大的重叠会增加采集图像数量以及拼接计算开销；而较小的重叠则会降低特征匹配的稳定性与可靠性。

用于生成目标平面均匀采样的一组镜面坐标示例如图 15 所示。由于实际应用中通常更偏好横向视野更宽的图像结构，因此可通过旋转系统布局来获得更大的水平视场范围，而非垂直方向。

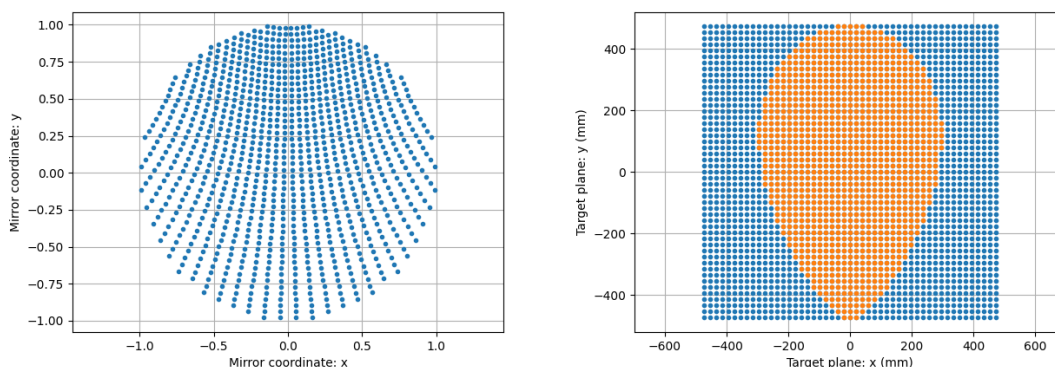


图 15：非均匀分布的镜面位置集合（左）在目标平面上对应均匀分布的坐标（右，以橙色标示）。

6.2. 图像采集示例 Python 脚本

Optotune 提供了一个用于 FOV 扩展开发套件的示例 Python 脚本，该脚本基于前述坐标变换关系实现图像采集。该脚本的输出包括：

- 在整个视场（FOV）内均匀采集的一组图像，并按行进行编号
- 每张图像对应的一组坐标信息（图像位置及图像旋转角度），用于在下一步中导入，以辅助拼接过程

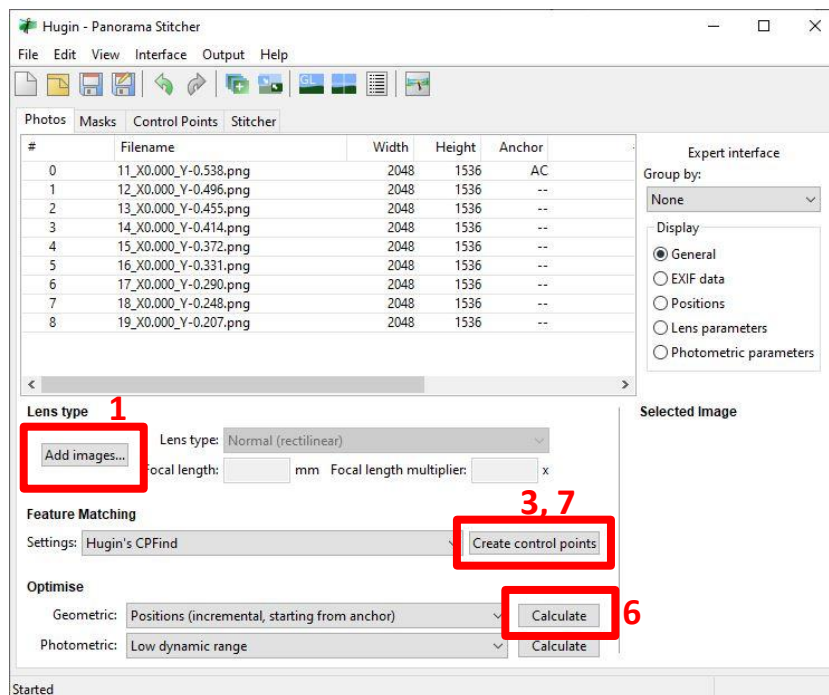
6.3. 拼接处理

拼接过程基于开源且功能强大的 Hugin 软件实现。

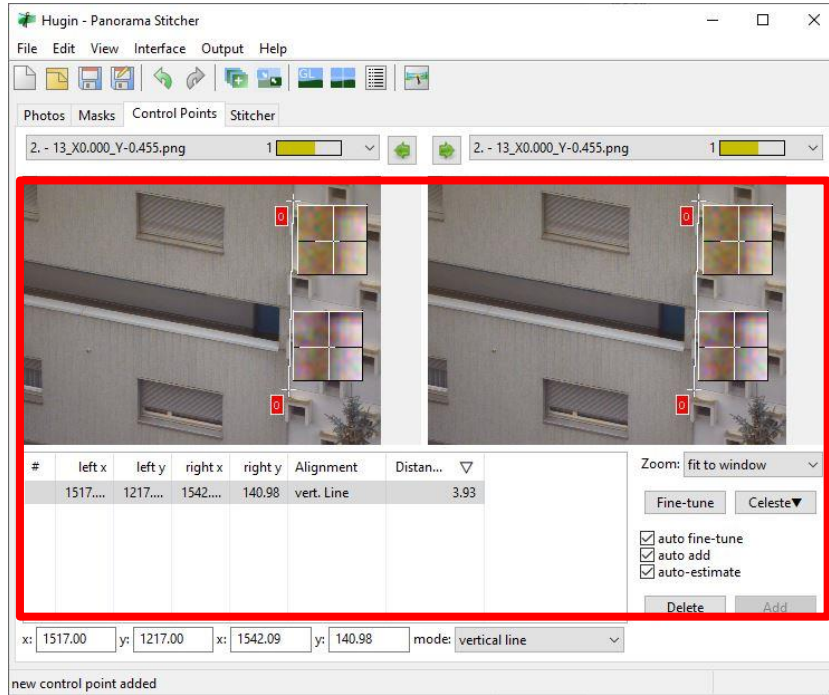


- 1) 导入所有图像。将当前 Hugin 工程保存为 project.pto。
- 2) （可选）根据镜面位置获取初始图像分布及图像旋转信息。该步骤用于限制图像匹配仅发生在相邻图像之间。通过命令行执行：“pto_var --set-from-file filename --output=output.pto project.pto”其中文件（filename = “Hugin.csv”）由用于拍摄图像的 Python 脚本生成。该步骤可使所有图像在拼接后大致位于其最终位置附近。若该过程效果良好，可直接跳至第 7 步。
- 3) 生成控制点（CP）：在特征匹配过程中，创建新的控制点检测器（cpfind.exe，参数 “--linearmatch -o %o %s”），用于检测按导入顺序排列的相邻图像之间的匹配点。该方法需要额外步骤来对全景图中的行进行对齐，但可显著降低控制点检测器的计算复杂度。相比之下，multirow 方法计算复杂度更高。
- 4) 创建连接行的控制点：通过手动方式添加控制点以连接不同图像行。建议仅在图像行的边缘区域创建控制点，无需在整行范围内密集添加，因为预对齐方法会完成其余匹配工作。另一种方法是在预览窗口中手动移动各行以实现初步对齐，然后使用第 7 步的预对齐控制点检测方法。
- 5) 锚定中心图像：选取中心图像，并通过右键菜单将其设为参考图像。
- 6) 优化步骤：通过优化图像位置以最小化控制点误差。在系统保持静止的情况下，无需优化几何参数中的平移项。执行优化前需确保已锚定接近中心的参考图像。
- 7) 预对齐图像的控制点自动检测（仅考虑重叠区域）：创建新的控制点检测器并使用参数 “--prealigned -o %o %s”。该步骤用于在原本未共享控制点的重叠图像之间生成控制点，从而实现行内或全局对齐（前提是第 2 步已成功执行）。

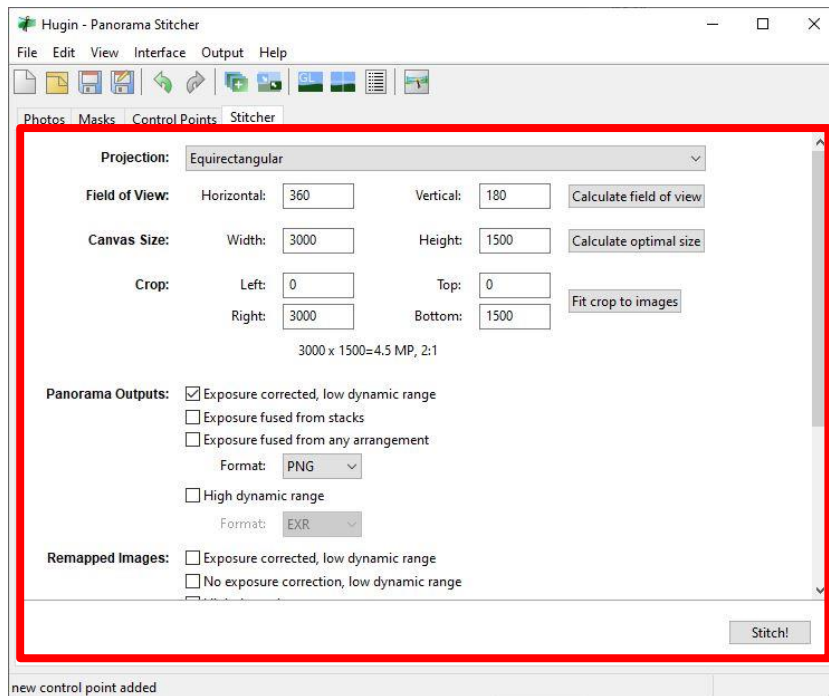
- 8) (可选) 添加水平/垂直直线：该步骤有助于减少拼接图像中的畸变。在图像不同区域添加线性特征（例如建筑物边缘等）可提高拼接质量；但在视场同一区域集中添加大量线条并无实际效果。
- 9) 验证与剔除错误控制点（CP）：可在控制点（CP）表中快速识别错误点，通常表现为距离较大的点（可按距离排序）。对这些点进行逐一验证，并删除不正确的控制点（由于图像中重复纹理结构，如建筑物，可能会产生大量错误CP）。在删除错误点后，应定期重新执行优化步骤。
- 10) 光度优化：选择多个光度参数进行优化，尤其是渐晕参数³。需注意选择一张曝光正常（既不过曝也不过暗）的图像作为曝光锚点（在 Photos 面板中右键设置）。
- 11) 拼接处理：在 Stitcher 标签中，在进行拼接前计算视场（FOV）及最优输出尺寸。如果希望最终结果为规则矩形而非显示全景边缘，可使用裁剪（crop）功能。建议使用 Multiblend 作为 Enblend 的替代方案，其计算速度更快且易于集成(<https://horman.net/multiblend/>)。 “由于 Enblend 具有 $O(n^2)$ 复杂度，而 Multiblend 为 $O(n)$ 线性复杂度，因此在千兆像素级拼接中，速度优势可提升至约 300 倍。同时建议使用 “--wideblend” 参数。



3 光晕效应可以通过将物镜的入瞳尺寸与镜面大小匹配来改善。我们未来可能考虑为视场扩展开发定制镜头。



4, 8



10

应用说明：

液态透镜在 HALCON 与 MERLIC 中的集成控制方案

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>

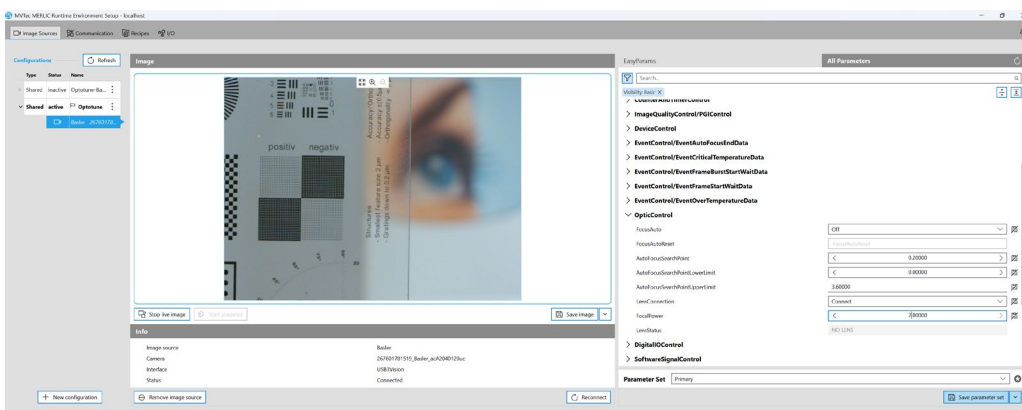
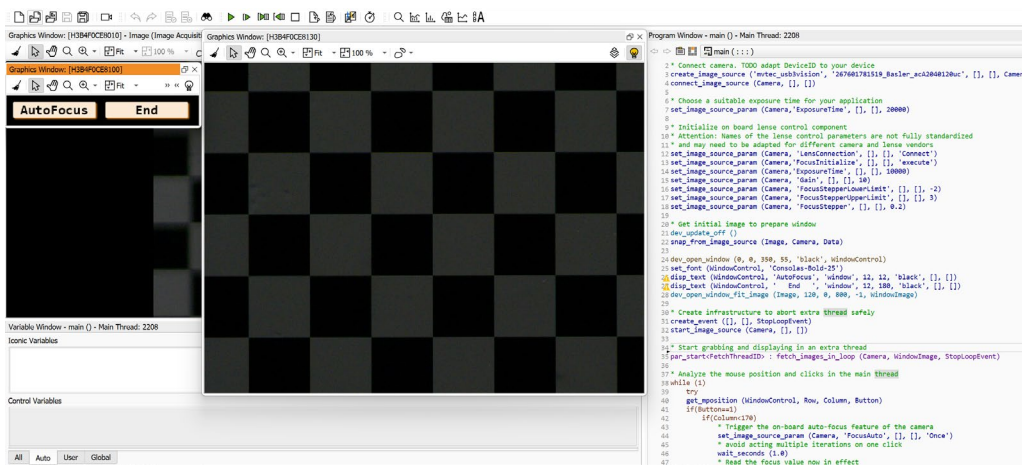
精密&快速光束控制反射振镜：<https://www.sintecclaser.com/optical/beam-steering.html>

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



1	目录	3
1.1	Optotune 液态透镜与相机的集成	3
1.2	Optotune-MVTec 接口选项	3
2	Optotune 液态透镜在 HALCON 中的接口连项	5
2.1	通过相机接口实现焦度控制与自动对焦	5
2.2	通过相机接口控制焦度并使用 Halcon 进行自动对焦	7
2.3	使用ECC-1C串行通信控制透镜	9
3	Optotune透镜与Merlic的接口连接	10
4	结论	11

1 引言

机器视觉已成为现代自动化领域不可或缺的一部分，使系统能够在无需人工干预的情况下实现“视觉感知”并进行智能决策。从制造产线上的高速质量检测，到物流领域复杂的3D物体识别，机器视觉软件提供了将摄像头图像转化为可操作数据所需的算法和工具。作为该领域的领军企业之一，MVTec Software GmbH是该领域的领军企业之一，其解决方案以灵活性、稳健性和广泛的应用支持而著称。其旗舰产品——HALCON和MERLIC——既满足了专业开发人员的需求，也满足了寻求快速、无代码部署的用户的需要。

HALCON是MVTec面向机器视觉的综合性标准软件，专为需要最大灵活性和控制权的开发人员设计。它提供了一个庞大的运算符库，涵盖图像采集、预处理、分割、特征提取、3D视觉和深度学习等领域。HALCON支持多种编程语言和操作系统，因此非常适合集成到各种工业环境中。例如，HALCON驱动的应用程序包括半导体晶圆的自动缺陷检测、汽车装配中的机器人引导，以及用于高速邮件分拣的光学字符识别（OCR）。其模块化和性能优化特性，使解决方案能够从实验室原型扩展到高吞吐量的生产系统。

另一方面，MERLIC专为快速、直观的机器视觉应用开发而设计，无需编程。其拖放式界面、内置工具库以及与自动化硬件的轻松集成，使其成为希望快速部署解决方案的用户的理想选择。MERLIC还集成了深度学习分类、测量工具和摄像头支持等高级功能。应用场景包括食品行业的标签和包装检测、电子制造中的装配完整性验证，以及制药生产中的液位监测。这种方法使企业能够直接在生产现场创建和调整视觉应用，从而缩短开发周期并降低技术门槛。

HALCON与MERLIC共同构成一套互补的解决方案，不仅能满足广泛的机器视觉需求，还能与 Optotune液态透镜等先进光学硬件无缝集成。Optotune可调焦镜头支持通过软件快速控制对焦，使视觉系统无需机械运动即可适应不同物体高度或检测深度。通过将MVTec强大的视觉算法与Optotune镜头的动态对焦能力相结合，用户可以构建用于多层PCB检测、自动瓶装液位检查或3D零件测量等任务的检测系统——在简化系统设计的同时，兼顾速度与精度。

1.1 Optotune 液态透镜与相机的集成

现代相机集成的核心是 GenICam（通用相机接口），该标准由 EMVA 管理。它将硬件接口（如 GigE Vision、USB3 Vision）从应用层进行抽象化处理，并通过 GenApi、SFNC（标准特征命名约定）和 GenTL 等模块提供统一的编程接口。

对于液态透镜的集成而言，一个关键优势在于：符合 GenICam 标准的相机能够将光学控制参数（如焦距或镜头对焦调整）作为标准功能对外提供。这使得软件应用程序、SDK 或高级接口能够通过相机的 GenICam 接口直接控制液态透镜，从而简化集成流程，并在现有视觉系统中实现灵活的对焦调整。

GenICam标准功能命名规范（SFNC）2.7版提出了用于控制液态透镜焦距、自动对焦（AF）功能等的 OPTIC CONTROL 标准命名规范。该标准命名规范有助于 Optotune 液态透镜与相机的集成，特别是通过 Halcon 或 Merlic 等第三方软件访问这些功能。

23.4.24 FocalPower

Name	FocalPower [OpticControllerSelector]
Category	OpticControl
Level	Optional
Interface	IFloat
Access	Read/Write
Unit	dpt
Visibility	Beginner
Values	

23.4.23 FocusAuto

Name	FocusAuto [OpticControllerSelector]
Category	OpticControl
Level	Optional
Interface	IEnumeration
Access	Read/Write
Unit	-
Visibility	Beginner
Values	Off Once Continuous Device-specific

图 1. GenICAM SFNC 用于控制液态透镜的命令示例

Optotune 一直与多家相机制造商合作，致力于构建一个通过相机接口控制液态镜头的生态系统。成功案例包括 Basler、Opto-Engineering ITALA 以及 Allied Vision Alvium 相机。以 Opto-Engineering ITALA G.EL 相机为例，其内部已嵌入电流驱动器，相机本身即作为 Optotune 液态镜头的控制器。通过相机接口，可全面控制液态镜头的电流、焦距以及自动对焦功能。另一方面，对于 Basler 或 Allied Vision 的相机，则需要 Optotune ECC-1C 控制器（该控制器嵌入在液态镜头外壳内）为液态镜头供电。ECC-1C 可连接至相机的 GPIO 端口（通常使用 Y 型线缆供电），并通过 I2C 或 UART 协议建立相机与 ECC-1C 之间的通信。

通过将 Optotune 的可调光学元件与符合 GenICam 标准的相机，以及 MVTec 的 HALCON 或 MERLIC 软件强大的视觉功能相结合，工程师能够构建出适应性强、结构紧凑且高度可靠的机器视觉系统。这种协同作用实现了对焦的无缝控制，能够快速适应不同的检测深度，并高效集成到现有工作流程中。从机器人技术和精密检测到物流及自动化质量控制，这些解决方案为工业视觉在速度、精度和灵活性方面带来了新的提升空间。



图 2. Optotune 液态透镜与 Basler（左）和 ITALA（右）相机的集成

1.2 Optotune-MVTEC 接口选项

使用 MVTEC 的 HALCON 或 MERLIC 软件操作 Optotune 液态透镜以调节焦距或实现自动对焦（AF）功能，主要有三种应用场景。

场景 1. 通过相机接口控制焦距并实现自动对焦: 将液态透镜直接连接至支持 Optotune 集成且固件中内置自动对焦算法的相机。在此配置下，自动对焦流程完全在相机上运行，而 PC（主机）仅用于发送应用所需的命令——主机上不进行任何图像处理或算法执行。HALCON 和 MERLIC 均支持此配置。

场景 2. 通过相机接口控制焦距，并使用 HALCON 进行自动对焦: 液态透镜连接至相机，其焦距可通过相机接口调节，但自动对焦算法在 PC 上通过 HALCON 运行。此方案要求相机通过其接口提供焦距控制功能，但无需内置自动对焦算法。

场景 3. 使用 ECC-1C 串行通信控制透镜: 相机和 ECC-1C 镜头控制器分别连接至 PC。ECC-1C 通过 Optotune 的 UART-USB 数据线，利用串行连接与主机通信。在此情况下，自动对焦算法在 PC 上的 HALCON 中运行，利用主机的处理能力。该方法适用于任何相机，无论其是否内置 Optotune 镜头集成功能。

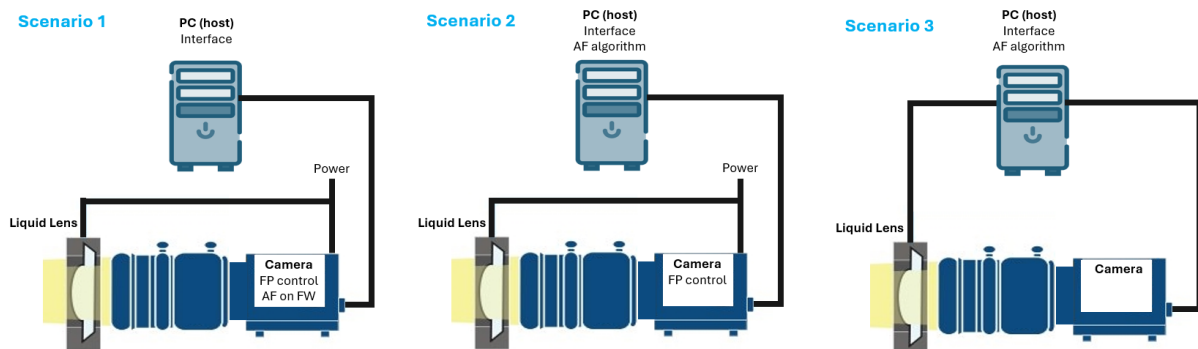


图3. 通过Halcon使用Optotune液态透镜的三种不同场景

我们为这三种场景提供了Halcon示例代码，并将在下一节中进行讨论。另一方面，对于Merlic，仅提供第一种场景，相关内容将在第3节中进行讨论。

2 Optotune 液态透镜与 Halcon 的结合

2.1 通过相机接口控制焦距和自动对焦

在本节中，我们将讨论将 Optotune 液态透镜与 Halcon 结合使用的场景 1。这些示例均使用 HDevelop XL 25.05 Progress 版本。如第 1.2 节所述，场景 1 仅适用于能够与 Optotune 液态透镜集成（通过 ECC-1C 控制器或内置透镜控制器）以控制液态透镜焦距，且其固件中已实现自动对焦算法的相机。

此场景的示例脚本可在此处找到，文件名为 AutoFocus_Camera.hdev，

我们将深入解析该脚本并讨论其中的各项命令

首先，请确保在“图像采集”选项卡中已验证相机连接。此步骤还可让您确认设备ID，该ID随后可在您的脚本中使用。

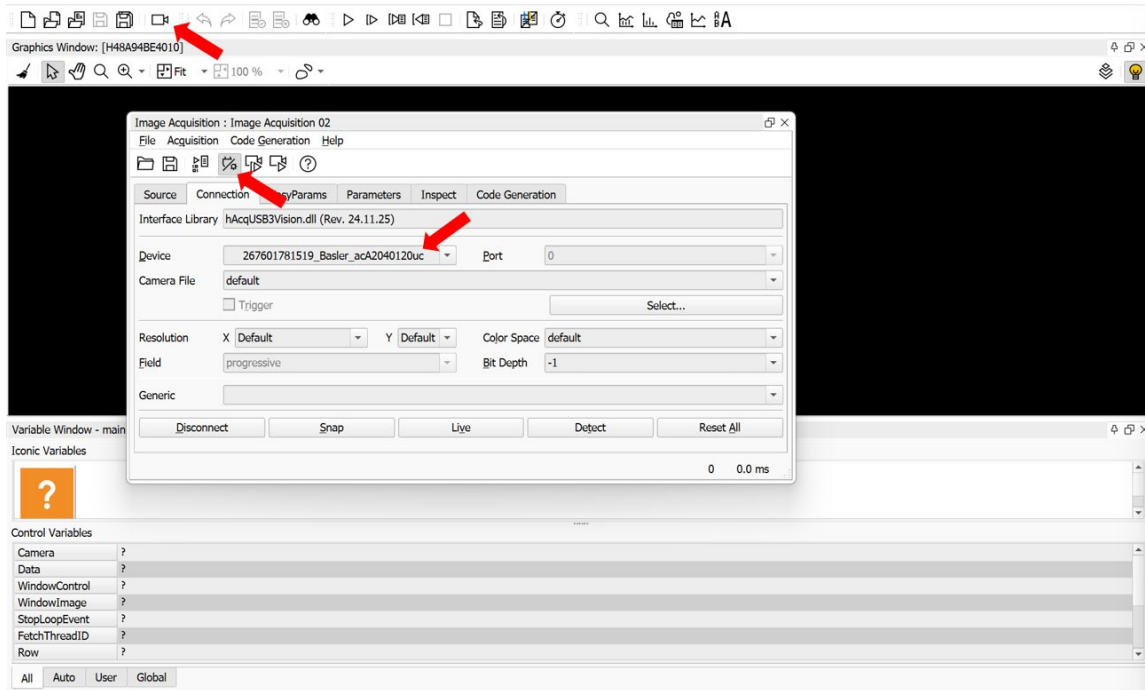


图4. 图像采集与摄像头检测

应使用 DeviceID 通过 `create_image_source` 和 `connect_image_source` 函数连接摄像头。完成此步骤后，根据光照条件选择摄像头的曝光时间和/或增益至关重要。例如，在下面的脚本中，选择了 15 毫秒的曝光时间。所有相机参数（如曝光时间、增益、白平衡等）以及用于控制液态镜头的相机参数，均可通过 `set_image_source_param` 命令进行调整。自动对焦所需的主要命令是 `set_image_source_param(Camera, 'FocusAuto', [], [], 'Once')`。

通过一个 `while` 循环创建包含自动对焦按钮的控制窗口，并使用 `get_image_source_param(Camera, 'LensOpticalPower', [], [], OpticalPower)` 命令读取焦距值，从而确定自动对焦后的最佳焦距。这有助于将最佳对焦焦距作为控制参数“光学功率”呈现，如图 5(b) 所示。

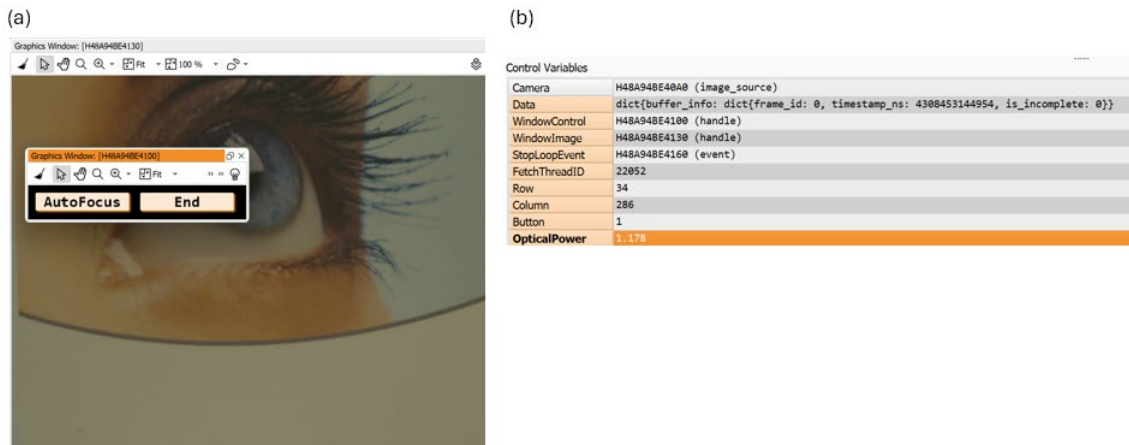


图5. (a) 图像表示与自动对焦。 (b) 控制变量

```

Program Window - main () - Main Thread: 6216
main (:::)
1
2 * Connect camera. TODO adapt DeviceID to your device
3 create_image_source ('mytec_usb3vision', '26760155F4AF_Basler_acA244075uc', [], [], Camera)
4 connect_image_source (Camera, [], [])
5
6 * Choose a suitable exposure time (and/or Gain) for your application
7 set_image_source_param (Camera, 'ExposureTime', [], [], 15000)
8
9 * Initialize on board lense control component
10 * Attention: Names of the lense control parameters are not fully standardized
11 * and may need to be adapted for different camera and lense vendors
12 set_image_source_param (Camera, 'LensConnection', [], [], 'Connect')
13 set_image_source_param (Camera, 'FocusInitialize', [], [], 'execute')
14
15 * Get initial image to prepare window
16 dev_update_off ()
17 snap_from_image_source (Image, Camera, Data)
18
19 dev_open_window (0, 0, 350, 55, 'black', WindowControl)
20 set_font (WindowControl, 'Consolas-Bold-25')
21 disp_text (WindowControl, 'AutoFocus', 'window', 12, 12, 'black', [], [])
22 disp_text (WindowControl, ' End ', 'window', 12, 180, 'black', [], [])
23 dev_open_window_fit_image (Image, 120, 0, 800, -1, WindowImage)
24
25 * Create infrastructure to abort extra thread safely
26 create_event ([], [], StopLoopEvent)
27 start_image_source (Camera, [], [])
28
29 * Start grabbing and displaying in an extra thread
30 par_start<FetchThreadID> : fetch_images_in_loop (Camera, WindowImage, StopLoopEvent)
31
32 * Analyze the mouse position and clicks in the main thread
33 while (1)
34     try
35         get_mposition (WindowControl, Row, Column, Button)
36         if (Button==1)
37             if (Column<170)
38                 * Trigger the on-board auto-focus feature of the camera
39                 set_image_source_param (Camera, 'FocusAuto', [], [], 'Once')
40                 * avoid acting multiple iterations on one click
41                 wait_seconds (1.0)
42                 * Read the focus value now in effect
43                 get_image_source_param (Camera, 'LensOpticalPower', [], [], OpticalPower)
44             else
45                 break
46             endif
47         endif
48     catch (Exception)
49     endtry
50 endwhile

```

图6. 通过相机接口实现焦距功率控制和自动对焦的Hdevelop脚本

2.2 通过相机接口控制焦距及使用Halcon进行自动对焦

在本节中，我们将讨论使用Optotune液态透镜与Halcon配合的第二种应用场景。这些示例均使用HDevelop XL 25.05 Progress版本。如第1.2节所述，方案2适用于能够与Optotune液态透镜集成（通过ECC-1C控制器或内置透镜控制器）以控制液态透镜焦力的相机。不过，自动对焦算法采用Halcon算法实现。

此场景的示例脚本可在此处找到，文件名为 AutoFocus_Camera_Manual.hdev

我们将深入探讨此脚本并讨论不同的命令。首先概述自动对焦（AF）算法。此处介绍的自动对焦（AF）示例算法采用两步流程，在用户定义的范围内确定最佳对焦值（即焦度值）。用户需指定焦度值的最小值和最大值，以及步长。在第一步（粗略扫描）中，算法会在指定范围内递增焦度值，并在每个点计算基于索贝尔滤波器的对比度指标。随后，通过将洛伦兹曲线拟合到所得的对比度值上，来估算对应最大对比度的焦度值。在第二步（精细扫描）中，算法围绕该估算焦度值进行高分辨率搜索，以精确定位产生最大对比度的确切值。

```

➔ 1 dev_update_off ()
2
3 * Connect camera. TODO adapt DeviceID to your device
4 * For this example to work, the camera must have direct control over the tuneable lense
5 create_image_source ('mvtec_usb3vision', '267601781519_Basler_acA2040120uc', [], [], Camera)
6 connect_image_source (Camera, [], [])
7
8 * Choose a suitable exposure time for your application
9 set_image_source_param (Camera, 'ExposureTime', [], [], 10000)
10 set_image_source_param (Camera, 'Gain', [], [], 6)
11
12 * Initialize on board lense control component
13 * Attention: Names of the lense control parameters are not fully standardized
14 * and may need to be adapted for different camera and lense vendors
15 set_image_source_param (Camera, 'LensConnection', [], [], 'Connect')
16 set_image_source_param (Camera, 'FocusInitialize', ['command_wait'], [1], 'execute')
17
18 * Specify details for the focus algorithm
19 create_dict (AutoFocusParams)
20 AutoFocusParams.NSamplePoints:=10
21 * Width and height for the region used to determine the sharpness of the image
22 AutoFocusParams.DomainW:=256
23 AutoFocusParams.DomainH:=256
24 * Use -1 for OffsetX and OffsetY to automatically create the domain in the center of the image
25 AutoFocusParams.DomainOffsetX:=1536
26 AutoFocusParams.DomainOffsetY:=-1
27 AutoFocusParams.FocusFeatureName:='LensOpticalPower'
28
29 * Determine min and max value of focal power, as well as width and height of image
30 get_image_source_param (Camera, AutoFocusParams.FocusFeatureName, ['property'], ['min'], FocusMin)
31 get_image_source_param (Camera, AutoFocusParams.FocusFeatureName, ['property'], ['max'], FocusMax)
32 get_image_source_param (Camera, 'Width', [], [], Width)
33 get_image_source_param (Camera, 'Height', [], [], Height)
34 AutoFocusParams.FocusMin:=-1
35 AutoFocusParams.FocusMax:=1.5
36 AutoFocusParams.ImageHeight:=Height
37 AutoFocusParams.ImageWidth:=Width
38
39 count_seconds (SecondsBegin)
40 * Set NSamplePoint focus values, and take a snapshot.
41 * Calculate best focus value so far.
42 * Set again NSamplePoint focus values between (best value so far - stepsize) and (best value so far + stepsize).
43 * Calculate best focus value, set it and return the value.
44 focus_camera_two_step (Camera, AutoFocusParams, BestFocusVal)
45 * Roughly calculate the time the focus algorithm took
46 count_seconds (SecondsEnd)
47 Diff:=SecondsEnd-SecondsBegin
48

```

图 7. 通过相机接口控制焦距功率以及使用 Halcon 进行自动对焦的 Hdevelop 脚本

自动对焦操作通过 `focus_camera_two_step` 函数实现。为了获得最佳效果，必须配置几个关键参数。首先，使用 `AutoFocusParams.FocusMin` 和 `AutoFocusParams.FocusMax` 定义自动对焦范围的最小值和最大值。接下来，通过调整 `AutoFocusParams.DomainW`、`AutoFocusParams.DomainH`、`AutoFocusParams.DomainOffsetX` 和 `AutoFocusParams.DomainOffsetY`，指定自动对焦感兴趣区域（ROI）的大小和位置。如果偏移量设置为 `-1`，系统将自动将 AF ROI 定位在图像中心，从而确保便捷的默认设置。

此外，请确保 `FocusFeatureName` 参数配置正确，因为该参数在不同相机型号间可能存在差异。根据 GeniCAM 标准（如第 1.1 节所述），预期参数名称为 `FocalPower`。然而，如上例所示，某些相机（例如 Basler 型号）使用其他名称，如 `LensOpticalPower`。验证您特定设备的此设置对于自动对焦功能的成功运行至关重要。

如图 8 所示，在 `focus_camera_two_step` 函数的后端，包含粗扫和细扫两个步骤。这两个步骤基本相似，唯一的区别在于它们的步长以及最小/最大范围不同。在每个步骤中，都会通过 `for` 循环计算基于索贝尔滤波器的对比度度量，以找到最佳对焦点。Halcon 提供了索贝尔滤波器。

(a)

```

focus_camera_two_step (: : Camera, AutoFocusParams : BestFocusVal)
1 * Coarse sweep
2 focus_camera_single_sweep (Camera, AutoFocusParams, BestFocusVal)
3
4 StepSizeFirstSweep:=(AutoFocusParams.FocusMax-AutoFocusParams.FocusMin)/(AutoFocusParams.NSamplePoints-1)
5 AutoFocusParams.FocusMin:=BestFocusVal-StepSizeFirstSweep
6 AutoFocusParams.FocusMax:=BestFocusVal+StepSizeFirstSweep
7 * Fine sweep
8 focus_camera_single_sweep (Camera, AutoFocusParams, BestFocusVal)

```

(b)

```

31 for Index := 0 to NSamplePoints-1 by 1
32   set_image_source_param (ImageSourceHandle, FocusFeatureName, [], [], FocusValues[Index])
33   snap_from_image_source (Images, ImageSourceHandle, Data1)
34   dev_display (Images)
35   reduce_domain (Images, Rectangle, Images)
36
37   sobel_amp(Images, Edges, 'sum_abs',3)
38   mean_n (Edges, ImageMean)
39   intensity (ImageMean, ImageMean, Mean, Deviation)
40   SharpnessValues[Index]:=Mean
41 endfor

```

图 8. 基于索贝尔滤波器的两步自适应滤波算法

2.3 通过 ECC-1C 的串行通信控制透镜

在本节中，我们将讨论使用 Optotune 液态透镜与 Halcon 配合的第 3 种应用场景。这些示例均使用 HDevelop XL 25.05 Progress 版本。如第 1.2 节所述，第 3 种应用场景适用于任何相机，且液态透镜的控制是通过 ECC-1C 的串行通信实现的。自动对焦算法通过在 PC（主机）上运行的 Halcon 算法实现。ECC-1C 的串行通信参数详见其数据手册。

该场景的示例脚本位于此处的 AutoFocus_OptotuneECC_1C_Serial.hdev 中

该自动对焦算法与第 2.2 节中所述的算法完全一致，即通过粗调和微调扫描分两步寻找最佳焦距。本文通过一个 Python 示例展示了该算法在 Optotune ECC-1C 上的应用。此处与第 2.2 节所述的主要区别在于，液态透镜的焦距控制是通过与 ECC-1C 的串行通信实现的。关键在于必须在相应的命令 optotune_ecc_1c_init(‘COM4’, ECC_1C) 中正确选择 COM 端口。其他部分，如相机属性以及 AutoFocusParams，与第 2.1 节和第 2.2 节中讨论的内容完全一致。此外，若要将焦距设置为特定值，应使用 optotune_ecc_1c_set_focalp (ECC_1C, 0.75) 之类的命令。

(a)

```

1 * Initialize COM Port to talk to Optotune ECC-1C controller
2 * TODO adapt COM port to your setup
3 dev_update_off ()
4 optotune_ecc_1c_init ('COM4', ECC_1C)
5 * optotune_ecc_1c_set_focalp (ECC_1C, 0.75) * Test FP
6
7

```

(b)

```

1 serial_init (SerialPort, Serial)
2 serial_send (Serial, 'START')
3 serial_rcv (Serial, 4, Response)
4 create_dict (ECC_1C)
5 ECC_1C.Serial:=Serial
6 if(Response!='OK')
7   throw (['ECC-1C not initialized'])
8 endif
9 return ()

```

图 9. 与 ECC-1C 的串行连接

3 配备 MERLIC 的 Optotune 镜头

MERLIC 是 MVTec 推出的一款直观且功能全面的机器视觉软件，专为偏好图形化、无代码操作环境的用户设计。它使开发人员和操作员无需具备高级编程技能，即可构建强大的视觉应用。凭借其拖放式界面和集成工具，MERLIC 支持检测、测量和定位等核心机器视觉任务。当与 Optotune 液态镜头结合使用时，MERLIC 可通过符合 GenICam 标准的相机动态控制对焦，从而快速适应变化的物体距离，并提高质量检测、物流和自动化装配等应用的效率。

如场景 1 和 2 所述，在 MERLIC 中只能通过相机接口控制 Optotune 液态镜头。在此配置中，ECC-1C 必须连接至相机，且与液态透镜的所有通信均通过相机接口进行。MERLIC 提供对相机功能的访问权限，包括液态透镜参数。如果相机固件包含自动对焦 (AF) 算法，MERLIC 可以利用该算法；否则，仅支持手动调节焦距。

要在 MERLIC 中开始使用 Optotune 液态透镜，首先应在“运行时环境设置”中添加一个新的图像源，并在可用设备中选择带有液态透镜控制功能的相机，如图 10 所示。之后，应激活该配置。操作方法是点击“激活配置”以连接该设备并进行配置。

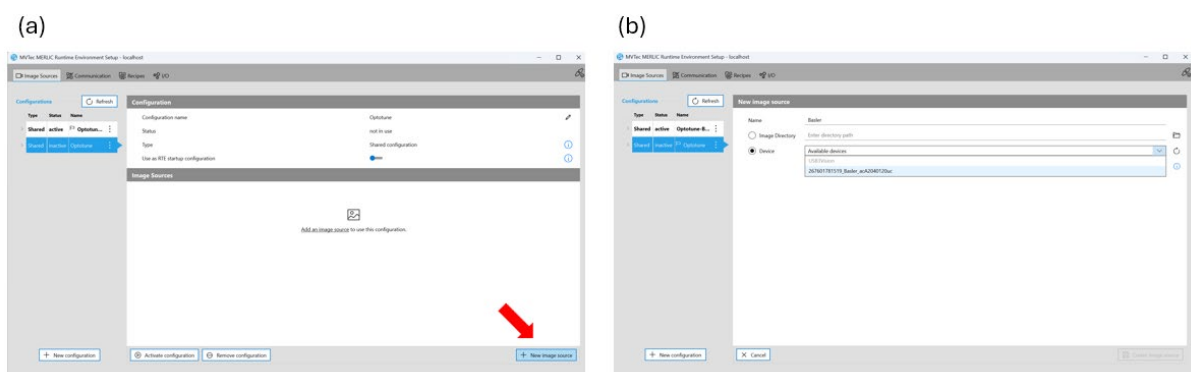
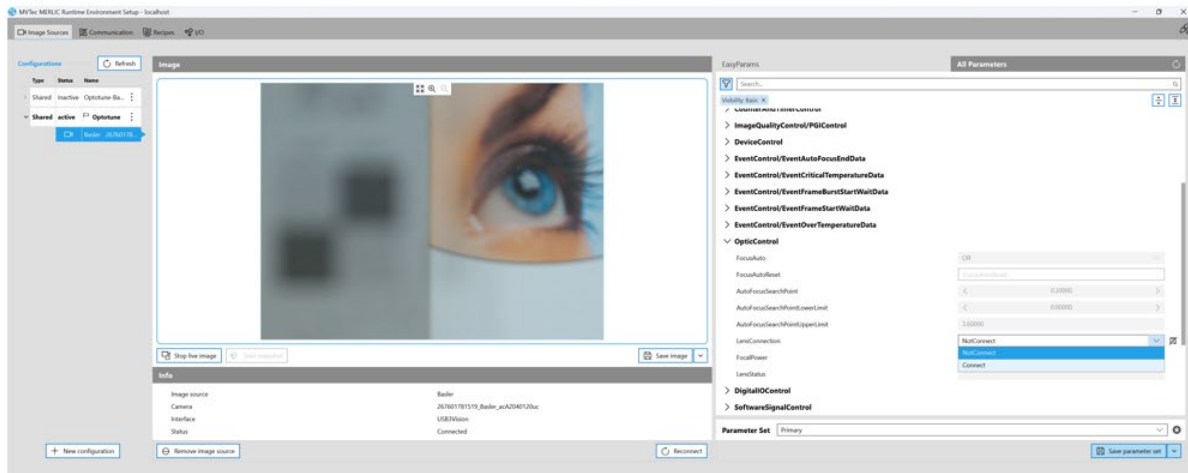


图10. MERLIC中的图像源选择

MERLIC 提供摄像头的实时预览功能，使用户能够在调整摄像头参数的同时实时查看图像。所有标准摄像头设置均可通过该界面访问，包括集成式液态镜头的设置。液态镜头的具体控制参数取决于摄像头制造商以及它们在 GenICam 功能树中的组织方式。在所示的 Basler 摄像头示例中，这些参数被归类在 OpticControl 部分下。要启用控制功能，必须先将 LensConnection 参数设置为 Connect。建立连接后，即可通过 FocalPower 滑块交互式地调整镜头的焦距，如图 11(a) 所示。可使用 FocusAuto 命令执行自动对焦，其相关参数位于 AutoFunctionControl 部分，如图11(b)所示。

Imagesource liveview 可添加到 MERLIC 的 ToolFlow 中，液态镜头功能（如摄像机的其他任何参数）均可按顺序进行调整。通过摄像机参数直接控制液态镜头的能力，为在 MERLIC 内开发广泛的机器视觉应用和工具开辟了道路。

(a)



(b)

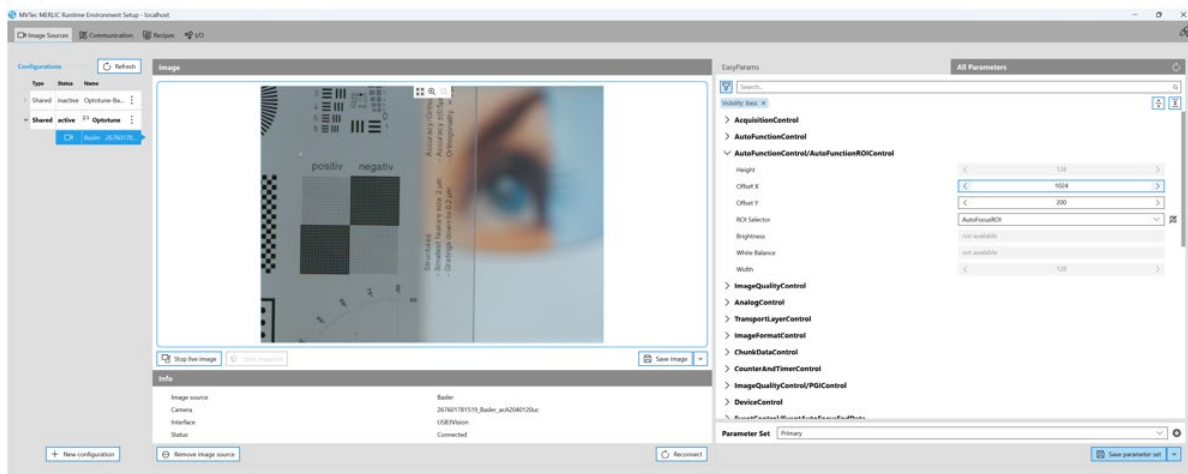


图11. 图像源特征中的相机参数与液态透镜控制

4 结论

将 Optotune 液态透镜与现代机器视觉系统相结合，为工业应用在灵活性、速度和精度方面带来了显著提升。通过实现电子对焦控制，这些透镜消除了对机械调整的需求，从而降低了系统复杂度并提高了吞吐量。当与 MVtec 的 HALCON 和 MERLIC 软件结合使用时，用户可以利用先进的图像处理算法和易于使用的工具，轻松实现自动对焦或景深适应。

本文讨论的三种接口方案——相机集成式自动对焦、通过相机接口基于 HALCON 的控制，以及与 ECC-1C 的直接串行通信——可满足广泛的应用需求。无论是追求内置相机固件解决方案带来的极致简便性，还是希望通过基于 PC 的处理实现全面控制和定制，Optotune 透镜都能提供适合各种机器视觉配置的可扩展解决方案。

最终，将可调光学元件、符合 GenICam 标准的相机以及 HALCON 和 MERLIC 等强大的软件平台相结合，将打造出高度适应性强、结构紧凑且可靠的系统。这种协同效应赋能了从机器人和物流到精密检测和质量控制的多种应用，确保机器视觉解决方案始终高效、面向未来，并随时准备满足现代自动化日益增长的需求。

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。

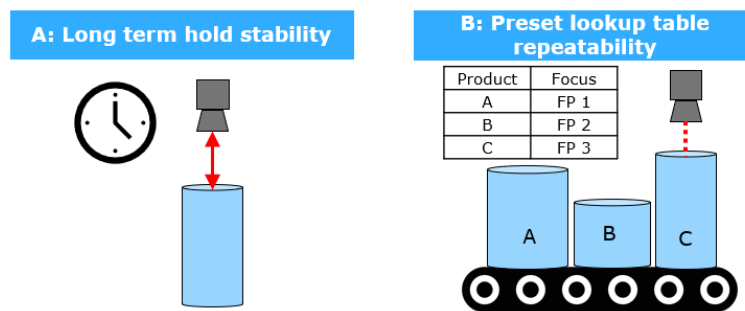


图1：两个应用场景的示意图。场景A（左）模拟在特定焦距下进行长期保持；场景B（右）模拟在预设焦距值下进行快速重新对焦。

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()
```

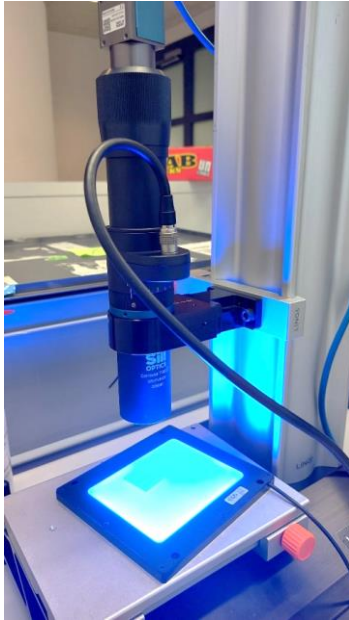


图2: 实验装置, 展示了集成 EL-16-40-TC 的 Sill 2x 同轴镜头 S5VPJ6420。

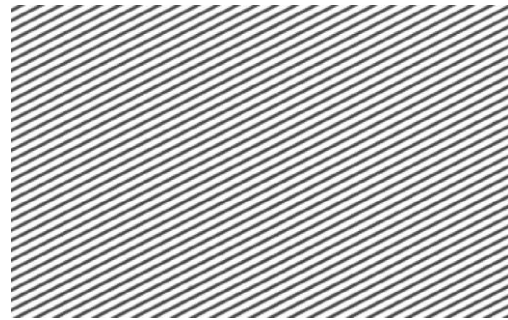


图3: 用于计算对比度的罗奇 (Ronchi) 条纹标靶 (50 lp/mm) 图像。

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。

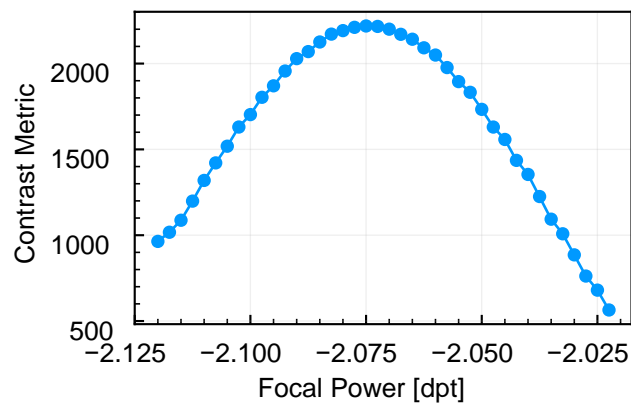


图4: 测试开始前的对比度与焦距校准曲线示例

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(\pm)10 mdpt, 如图6右侧所示。

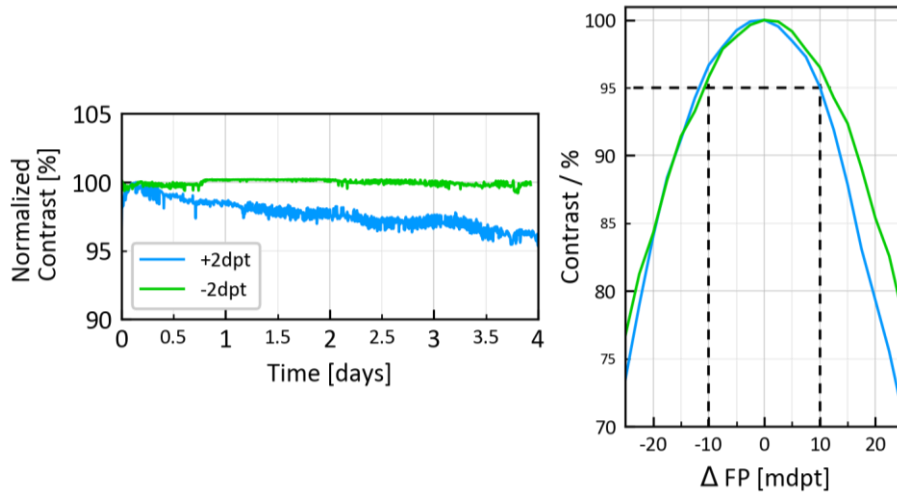


图6: 焦距在-2和+2 dpt处长期保持的结果

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。

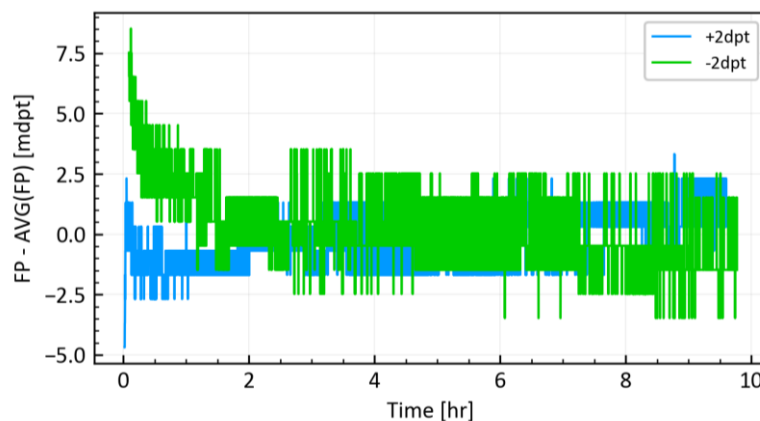


图7: 使用哈特曼-夏克波前传感器进行长期焦距保持的结果

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。

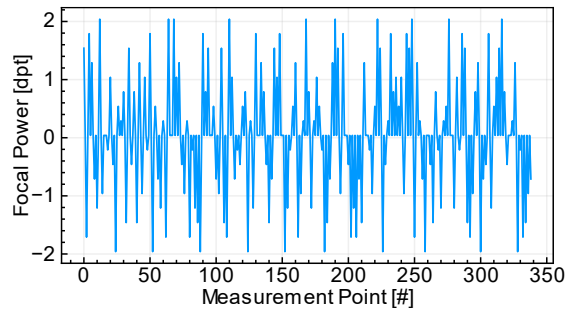


图 8: 焦度突变为 0 dpt 的随机列表。每次突变均为 0.25 dpt 的倍数, 并重复了 10 次。

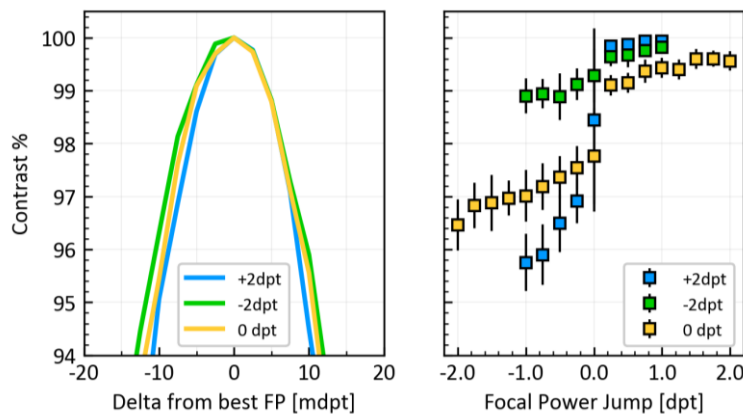


图 9: 分别在 -2、0 和 +2 dpt 焦度下进行的短期重复性测试结果。通过将不同焦度跳变点 (右侧) 获得的对比度值的平均值和标准差, 与描述对比度与焦度之间关系的曲线 (左侧) 进行关联, 可以得出结论: 可实现 ± 10 mdpt 范围内的重复性。

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距下，焦距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距误差的分布情况。

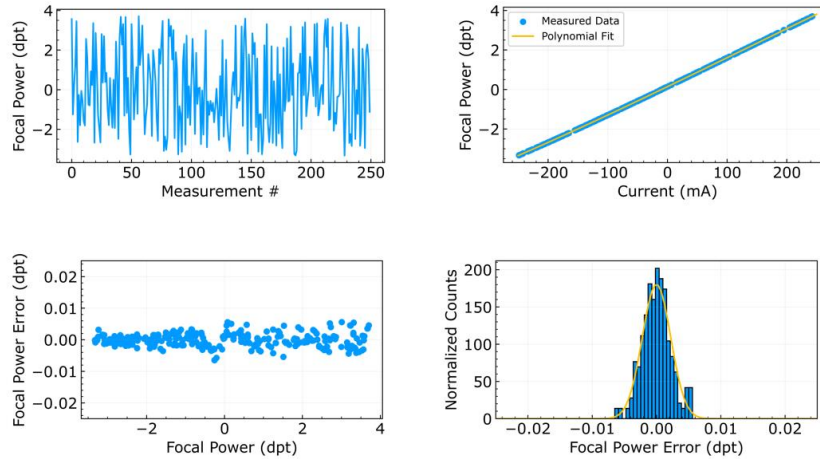


图10：使用SHS进行的重复性测试。向液态透镜施加了250次随机电流跳变，每次跳变之间将电流重置为0 mA（左上），由此得到的校准曲线（右上）被建模为电流与焦距之间的一条三阶多项式拟合曲线。左下图展示了校准曲线中焦距与焦距误差之间的关系，表明误差始终保持在 ± 10 mdpt的范围内。右下图展示了焦距误差的分布情况，结果与此一致。

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距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>

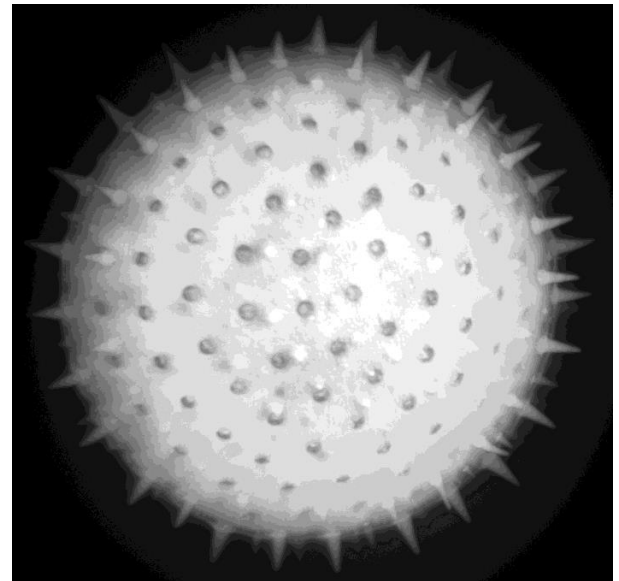
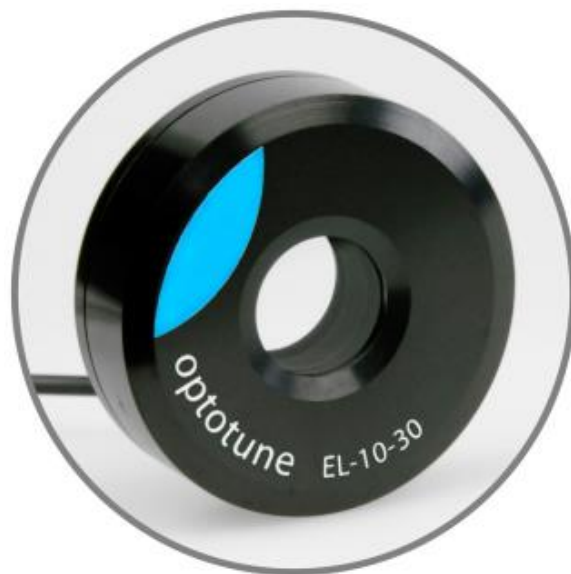
激光散斑衰减器：<https://www.sintecclaser.com/optical/laser-speckle-reducers.html>

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

应用说明：

适用于宽场、共聚焦、双光子及薄光片显微镜的可调焦透镜



更多信息与技术支持

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

摘要

EL-10-30 具有大光圈、响应和驱动速度快以及优异的光学性能，在显微镜领域的各种应用中具有广阔的前景。在本应用说明中，我们将探讨在三种不同的显微镜技术中应用电调焦透镜（ETL）实现快速轴向调焦的方法，这三种技术分别是：（1）经典宽场荧光显微镜，（2）荧光共聚焦显微镜，以及（3）双光子显微镜。关于这些技术的详细介绍，请参阅 <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/index.html>。

一般考虑因素与典型应用

ETL可用于显微镜领域的多种应用，包括专用可调谐照明系统以及电控变焦光学系统等。在本应用说明中，我们将专门讨论利用ETL沿光轴进行对焦的应用。根据ETL的具体实现方式及光学性能要求，可实现30至700微米的轴向对焦范围。尽管如此，本文中关于在显微镜中使用ETL的大部分技术细节同样适用于其他应用场景。在标准显微镜中，轴向对焦通常通过移动Z轴载物台上的样本或移动显微镜物镜来实现。实现精密对焦的常见替代方案是使用压电驱动的物镜转台。然而，这些对焦技术依赖于相对于样本的机械轴向运动。若采用光学对焦方案，则可实现无机械运动且更快速的对焦。将ETL集成到显微镜的光路中，是实现光学对焦的一种便捷方案。现代显微镜物镜具有无限远校正光学系统，这意味着源自物镜焦平面内某一点的光线不会聚焦到像平面内的某一点，而是以平行光束（聚焦于无限远）的形式从物镜射出（图1）。需要额外添加一支管透镜，才能在探测器上形成实像。

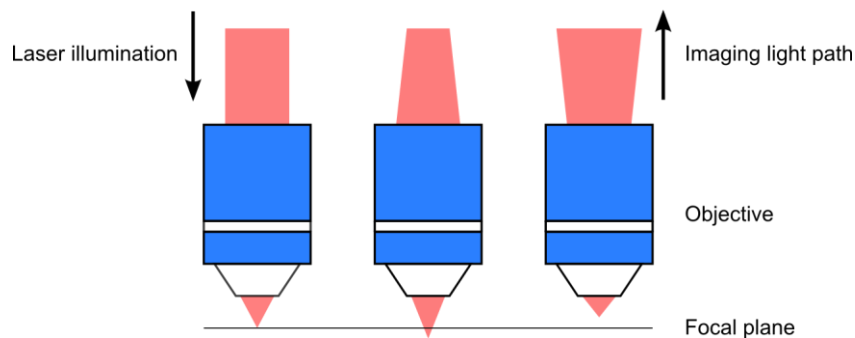


图1：在成像过程中，经过无限远校正的物镜将一束平行光聚焦到其焦平面上形成一个光斑，反之亦然。位于标称焦平面下方或上方的点光源，将分别产生会聚光束或发散光束。

如果物体或光源向物镜前透镜靠近，物镜会产生发散光束；反之，如果物体位于标称工作距离之外，则会产生聚光束。这些条件也可以反过来看：如果能利用可调光学元件在物镜处产生发散或聚光束，则可以沿光轴对显微镜进行对焦。这既适用于通过物镜的照明光路，也适用于成像光路，例如在激光扫描显微镜中。

由于 EL-10-30 只能产生可调的聚光束，因此必须与负焦距的偏移透镜配对，才能实现从负焦距到正焦距的调谐范围（图2）。

我们将焦距为 -100 mm 的平凹单片透镜与 EL-10-30（低色散型，焦距范围为 50-200 mm）组合在一起。ETL 与偏移透镜 (OL) 的组合可安装在定制的透镜支架或标准的 30 mm 透镜管中。

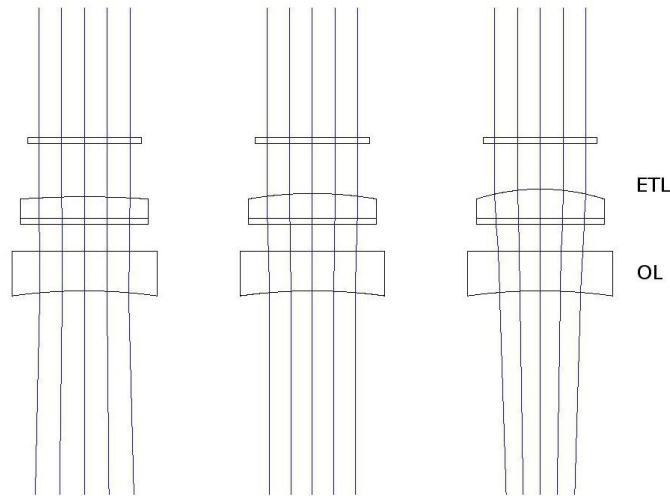


图2: EL-10-30 (ETL) 与焦距为负值 ($f = -100$ mm, Thorlabs LC 4232) 的偏移透镜 (OL) 的 ZEMAX 模型。请注意可调表面曲率的变化及其导致的光束发散角变化。

实现光学对焦的最简单方法是将 ETL/OL 组件尽可能靠近物镜安装 (图3)。例如，可以将 ETL 和 OL 安装在一个带有两个 RMS 螺纹的镜筒中，并将其插入物镜转盘与物镜之间——这与安装压电对焦装置的方式相同。

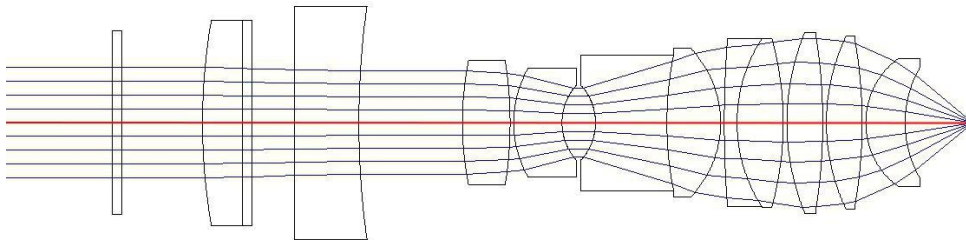


图3: ETL/OL 组件与显微镜物镜组合系统 (美国专利 4231637)。整个系统的轴向长度约为 50 mm。在该系统中，将 EL-10-30 的焦距从 150 mm 调节至 80 mm，可在标称工作距离附近实现约 $-50 \mu\text{m}$ 至 $+50 \mu\text{m}$ 的轴向焦点扫描。所使用物镜的焦距为 4.4 mm。

将 ETL 和 OL 定位在物镜后止挡附近操作简单且易于实现，但这对于光学聚焦而言并非最佳位置，也不适用于所有成像应用。大多数显微镜物镜都是同心物镜，这意味着每个光束中的中心光线（例如图3中的轴上光线，红色），也称为主光线，在离开物镜前透镜后会沿光轴传播。当 ETL 置于物镜附近进行对焦时，会导致非同心条件 (图4)。其结果是，若轴向焦距位置发生变化，视场 (FOV) 大小或放大倍率也会随之改变。如果所需的焦距偏移较小 ($< 50 \mu\text{m}$)，这种偏差尚可接受。另一种方案是，通过 4f 中继系统 (例如由两个消色差透镜组成的 4f 系统) 将 ETL/OL 组件定位在显微镜物镜的共轭瞳平面处，因为大多数物镜的光阑无法直接访问 (图5)。

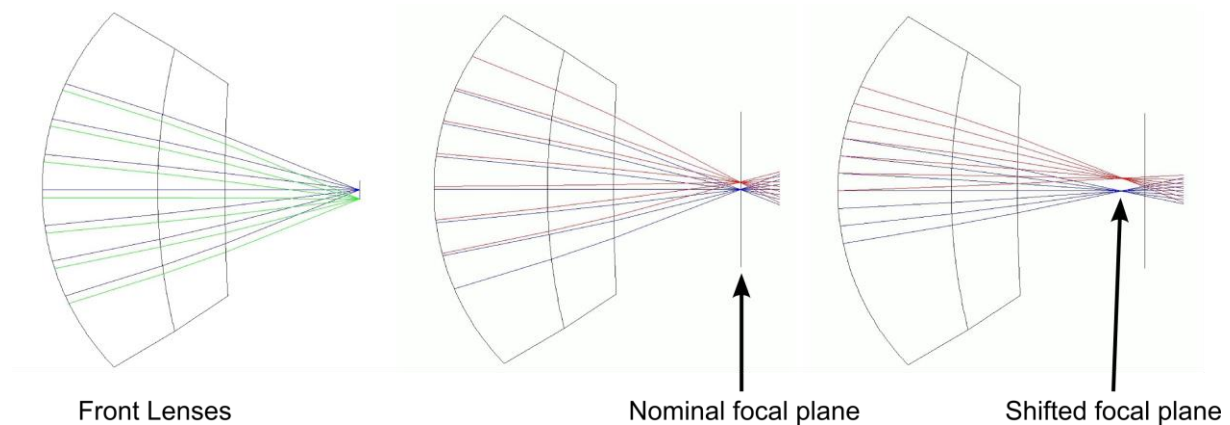


图4：显微镜物镜前组透镜，其两束光线在样品上聚焦于不同的侧向位置。左图显示了在两束光线在同心条件下的情况——中央的绿色（主）光线与光轴平行传播（蓝色主光线）。中间和右侧面板展示了使用同一物镜，并将ETL/OL插入其后阻挡附近时的聚焦情况。倾斜（红色）光束的主光线不平行于光轴传播，因此，如果将焦平面移近物镜，红色和蓝色焦点的距离就会增大（导致放大倍率或视场大小发生变化）。

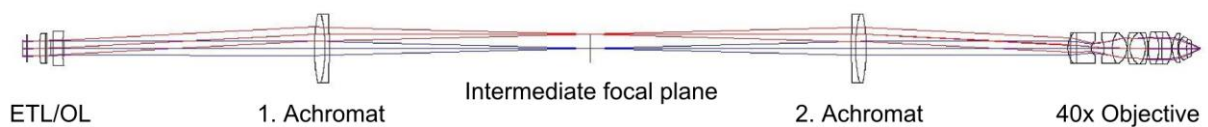


图5：用于保持同心成像条件的4f中继系统的布局示例。ETL/OL组件（左侧）通过由中间段两个 $f=100\text{ mm}$ 消色差透镜组成的4f系统，被放置在物镜（日本专利8-292374；右侧）的共轭瞳平面处。瞳孔（红光与蓝光光束的交点）被重新成像至物镜中。该系统的总长度约为380毫米。为形成图像，系统左侧需配备一支管透镜。在基于ETL的对焦过程中，中间焦平面会发生位移。

然而，大多数商用显微镜不允许在光路中插入中继系统。在这种情况下，将中继系统放置在相机或激光端口处可能是一个可行的方案。

EL-10-30的控制

EL-10-30可通过激光二极管专用精密恒流驱动器（例如Edmund Optics NT56-804、Thorlabs LD1255R）以及0-250 mA可编程模拟输出，轻松实现计算机控制。对于简单的对焦应用，只需建立一个将控制电流与对焦位置关联起来的校准查找表即可（请参见图15）。

以下是对这两种实现方式的总结：

类型	ETL/OL 靠近后止点	ETL/OL 位于共轭瞳孔处
优点	易于实现，特别是在商用显微镜中	在整个对焦范围内，视野大小和放大倍率均保持不变
缺点	在对焦范围内视场大小/放大倍率的变化。 在对焦范围内数值孔径及分辨率的变化	根据工作条件，由于前镜片的暗角现象，数值孔径可能会发生变化。需要中继系统，因此实现起来较为复杂，且需要占用空间
典型应用	共聚焦显微镜（分辨率约为50 μm ） 双光子显微镜（分辨率最高可达700 μm ）	非常适合定制显微镜。 适用于视觉观察。

应用示例：宽场显微镜

在目视观察时，对焦过程中视场（FOV）或放大倍率的改变会令人困惑（因为其视觉效果类似于变焦效应）。对于微小的对焦增量（几微米），这种现象尚可接受；否则，该效应将变得令人分心。在这种情况下，必须将ETL/OL组件放置在共轭瞳位置。在大多数显微镜中，必须将一个包含额外中继光学元件和ETL/OL组件的定制模块插入光路中。在典型的正置显微镜中，限位位置位于物镜内部且无法直接接触，因此需要采用中继系统。然而，在倒置显微镜中，共轭瞳通常由显微镜机身内部的光学系统形成；在某些类型的倒置显微镜中，该瞳孔位于光学路径的垂直段且可直接接触，因此非常适合插入基于ETL的对焦系统。图6所示的1980年代蔡司Axiovert 35显微镜便是此类设备之一。

系统配置

将ETL/OL组件插入30毫米的镜头管中，并将其安装在光学导轨上，使其靠近瞳孔（图8）。为了确定瞳孔位置，可以使用一个简单的技巧：将用于相位显微镜的相位掩模重新成像到共轭瞳孔平面上。聚光镜或物镜中相位掩模形成清晰像的位置，即是ETL的理想安装位置（图8插图）。这种基于ETL的对焦方式还具有额外优势，即ETL可与多种物镜配合使用。根据物镜的不同，ETL和OL的最佳位置可能会发生偏移，因为某些类型的物镜在瞳孔成像特性上存在差异。

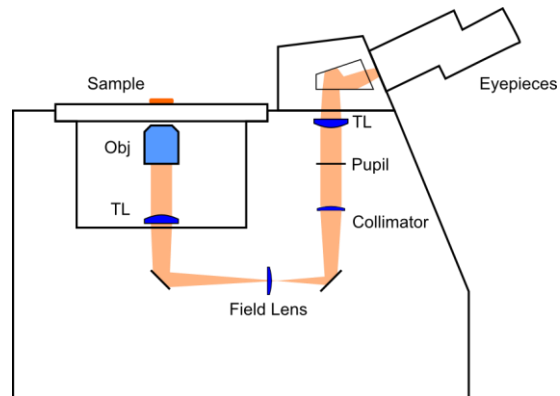


图6: Axiovert 35显微镜的光路。ETL/OL组件可直接放置于瞳孔位置, 无需额外插入中继系统。TL: 管镜。

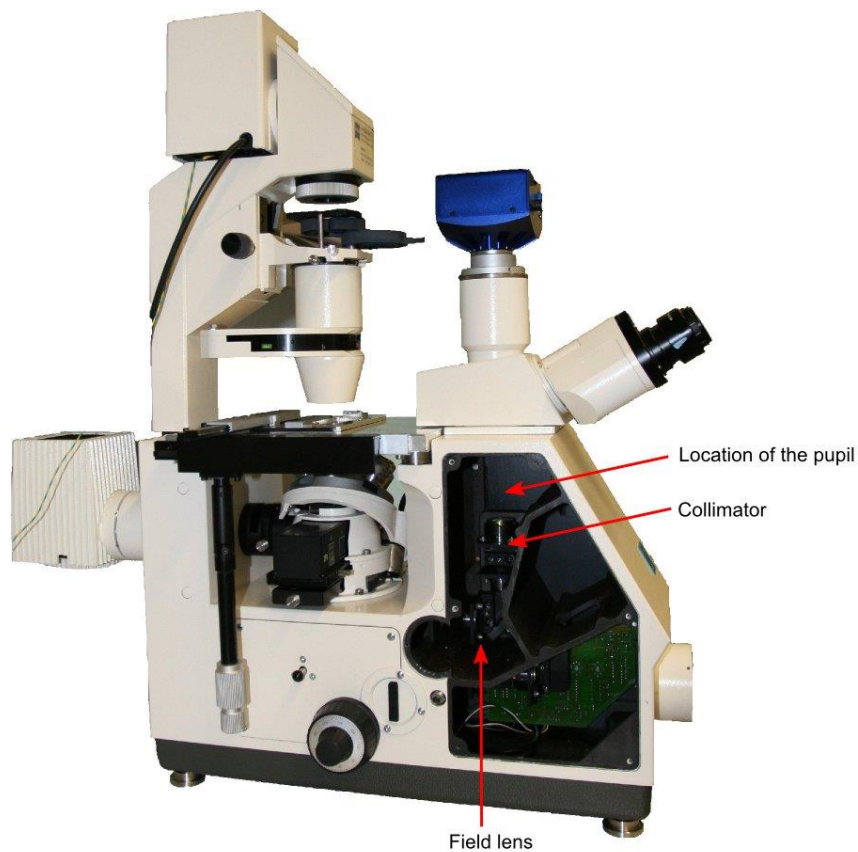


图7: Axiovert 35显微镜, 侧盖已拆下以便观察瞳孔。图6中所示的部分光学元件在此图中已标出。

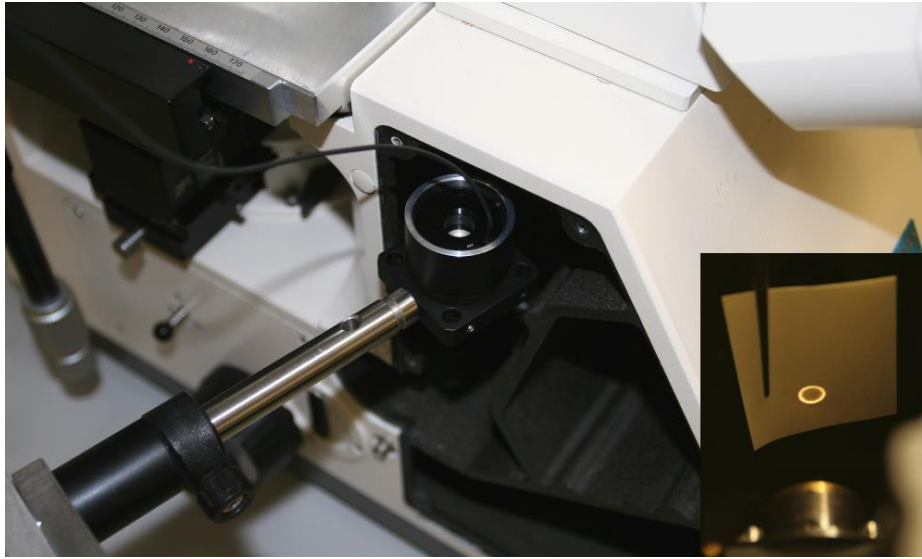


图8：将ETL/OL组件安装在共轭瞳位置。ETL和OL安装在与光学导轨相连的立柱上。插图：可通过观察相位环的清晰图像来确定共轭瞳位置。

结果

配合使用40倍、数值孔径0.6的物镜（Zeiss LD Achromplan 40x / 0.6 Korr Ph2），可实现高达 $120\mu\text{m}$ 的失焦范围（校正环设置为固定位置）。图9展示了利用ETL对焦技术对一组花粉粒进行Z堆栈成像的示例图像（落射荧光模式）。

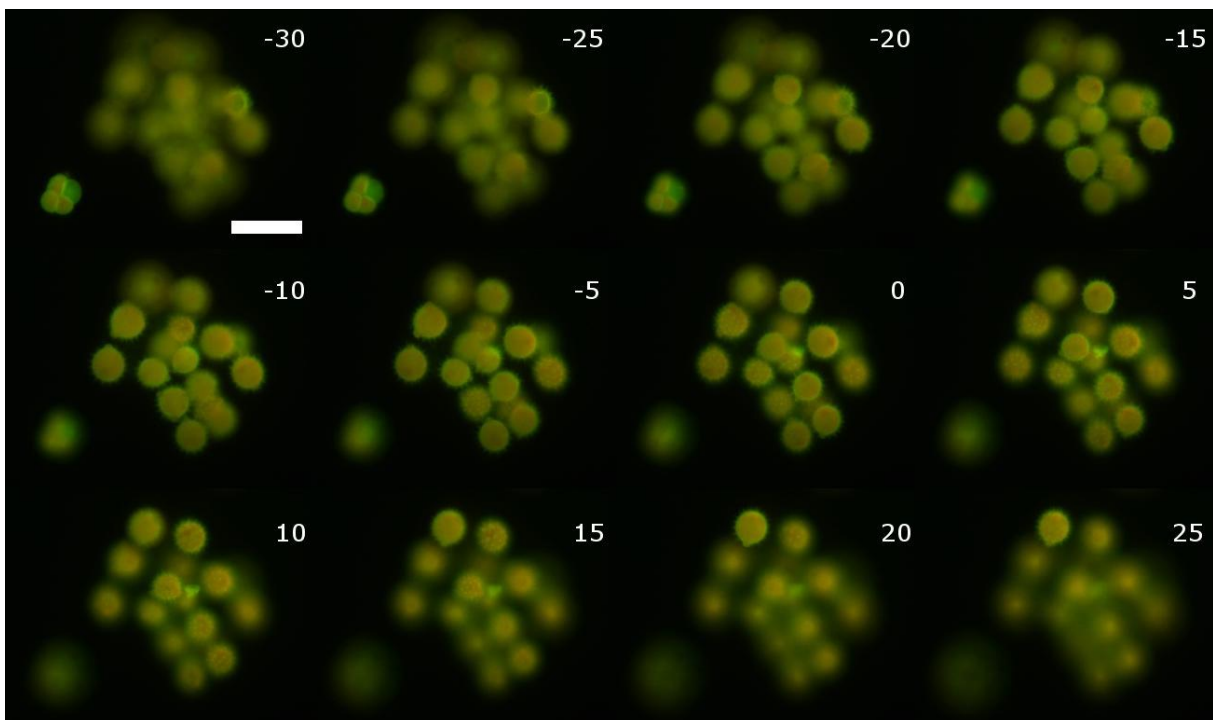


图9：基于ETL的聚焦系统对一组花粉颗粒的轴向扫描成像结果。成像范围相对于标称像面在 $-30\mu\text{m}$ 至 $+25\mu\text{m}$ 之间变化。由于EL-10-30被放置在共轭瞳面位置，因此系统在轴向调焦过程中不产生放大率变化。比例尺： $100\mu\text{m}$ 。

应用示例：共聚焦显微成像

共聚焦显微镜是最重要的显微成像技术之一，在细胞生物学、单分子物理及众多科研领域具有广泛应用。关于该成像方法及不同类型共聚焦系统的详细介绍，可参考：

<http://micro.magnet.fsu.edu/primer/index.html>.

系统配置

标准共聚焦显微系统通常为高度集成化设计，在大部分光路中无法直接插入或更换光学元件。根据具体显微镜结构，可采用不同方式引入 ETL/OL 组件。一种方案是在不影响共聚焦成像所需滤光片的前提下，将 ETL/OL 组件集成至定制滤光片转盘模块 (filter cube)，并安装于显微镜的滤光转轮中。另一种方案是将 ETL 集成在中继成像系统中 (见图10)。

本研究中所使用的系统1 (图11) 为旋转盘共聚焦显微镜 (spinning disk confocal)，共聚焦模块 (Yokogawa Electric Corporation CSU-X1) 及 CCD 相机连接至 Olympus Corporation IX-71 显微镜的侧端口。该结构允许在滤光转轮中插入经过改装的原厂滤光片组件，其中集成 ETL 与 OL，而无需对显微镜进行大范围改造。在实际运行过程中，只需将滤光转轮旋转至空位，即可将 ETL 从光路中移除，实现快速切换。

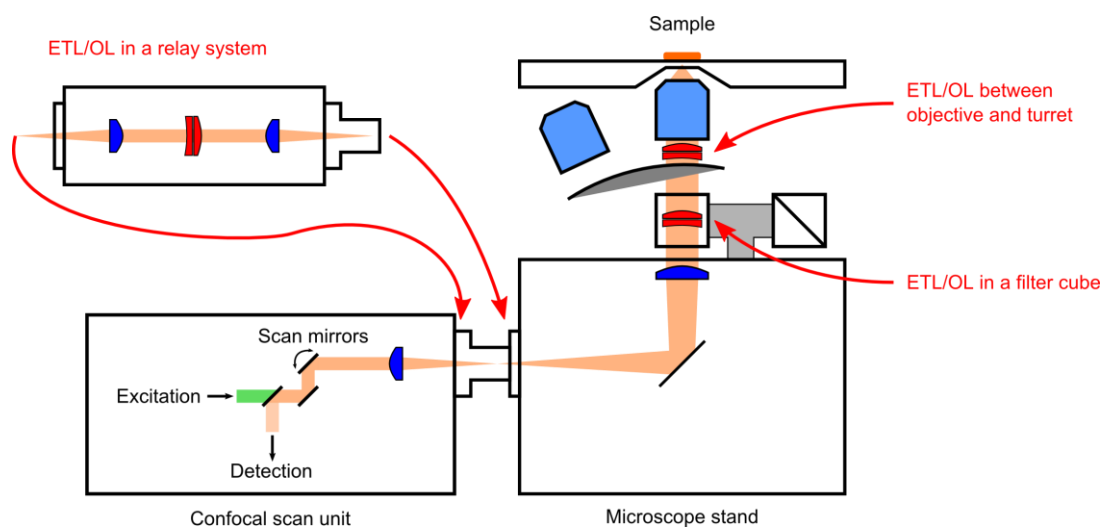


图10：在典型倒置式激光扫描显微镜中基于ETL实现调焦的三种方案。

- (1) ETL/OL 组件可置于物镜与物镜转盘之间，其作用类似于压电驱动式调焦单元。
- (2) 在允许的情况下，ETL 与 OL 可集成于定制滤光片模块中并安装于滤光转盘内。上述两种方案的共同缺点是：在调焦过程中可能引起显著的放大倍率变化。
- (3) 为避免该问题，可在共聚焦扫描单元与显微镜主体之间引入中继成像系统。为获得最佳系统性能，ETL 应尽可能安装在光路的垂直段；否则，由重力引起的非对称膜面形变可能导致成像质量下降。

¹ 我们感谢苏黎世联邦理工学院 (ETH Zurich) Helge Ewers 实验室 (<http://www.neuro.nano-optics.ethz.ch/>) 提供使用 EL-10-30 并与旋转盘共聚焦显微系统联合测试的机会。

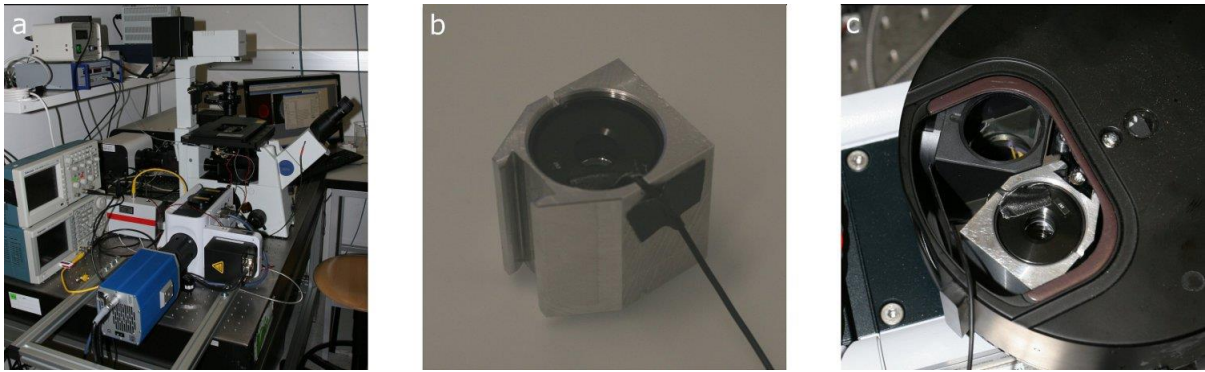


图11: ETL与OL在共聚焦显微镜中的集成实现。

(a) 旋转盘共聚焦单元安装于显微镜机架的左侧端口，蓝色CCD相机用于图像采集。驱动ETL的电流转换器由函数发生器进行控制。

(b) ETL/OL组件集成于定制滤光片模块中。

(c). 该滤光片模块被插入滤光转盘内，并将滤光转盘重新安装至显微镜机架中，位于物镜转盘下方。

结果

在与 $40\times$ 、数值孔径 $NA = 1.3$ 的物镜（Olympus Corporation UPLFLN 40XO）组合使用时，实现了约 $60\ \mu\text{m}$ 的轴向扫描范围。图12展示了花粉颗粒（直径约 $100\ \mu\text{m}$ ）z-stack中的单层切片图像。

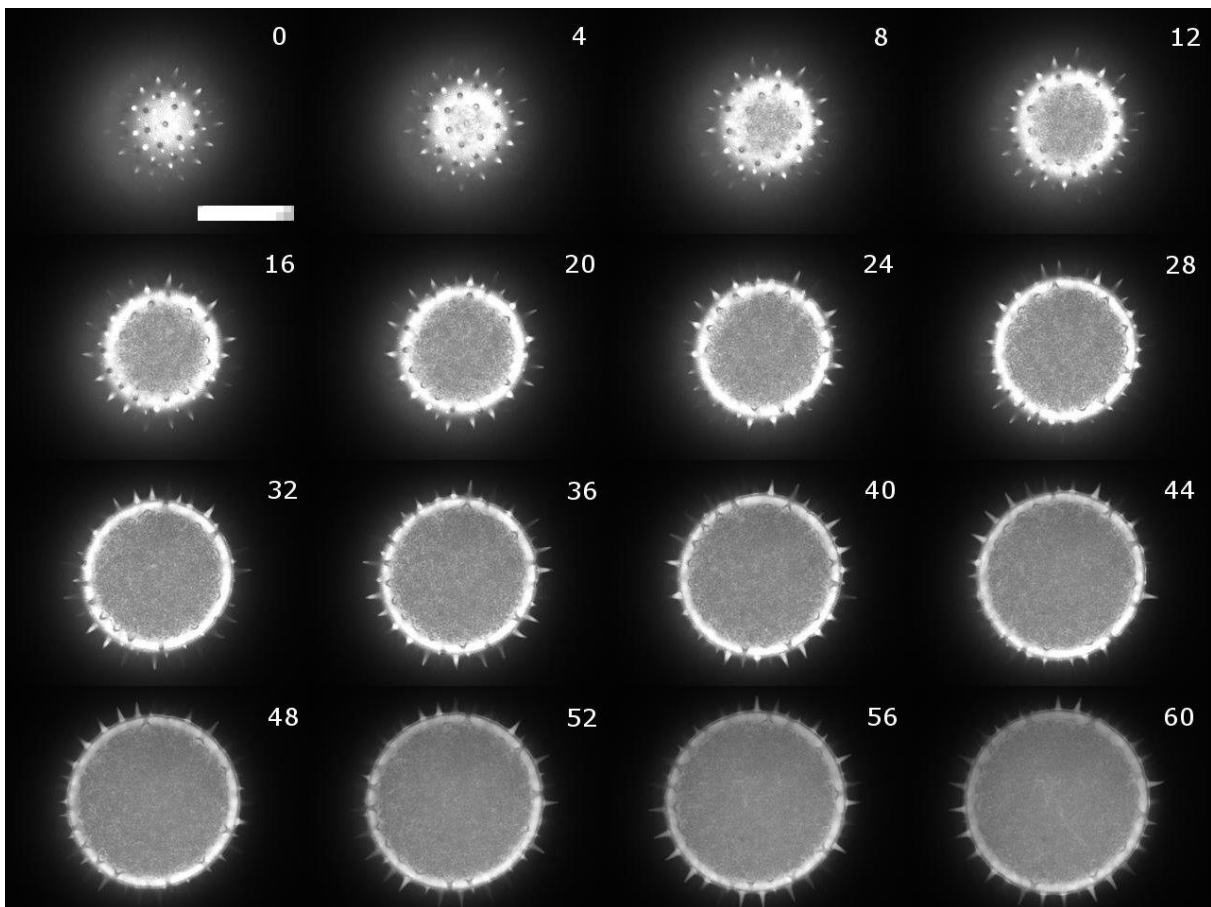


图12: 花粉颗粒（直径约 $100\ \mu\text{m}$ ）的Z-stack成像，轴向扫描范围为 $60\ \mu\text{m}$ 。各图像对应的Z位置相对于第一张图像已标注。比例尺： $50\ \mu\text{m}$ 。

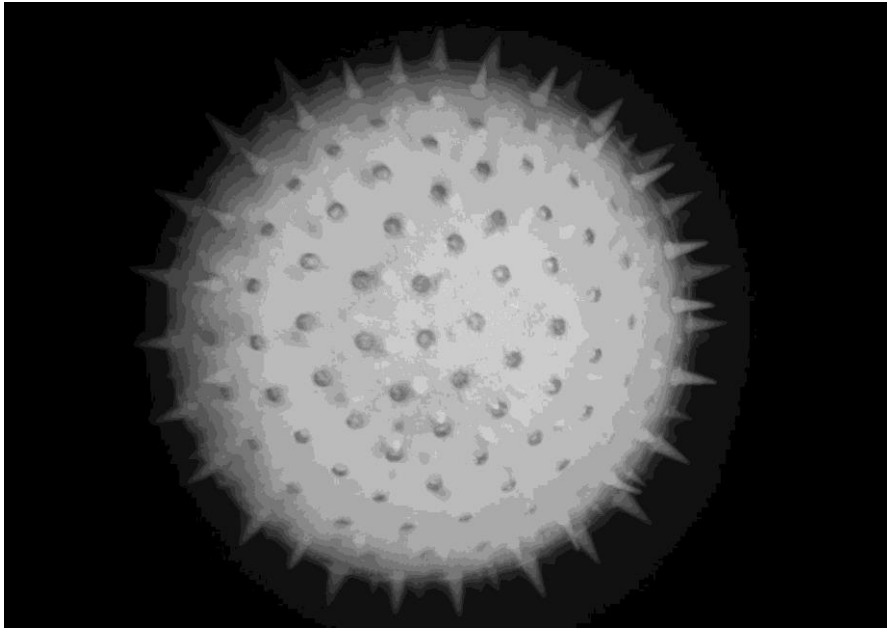


图13：图9所示数据的最大强度投影结果。

应用示例：双光子显微成像

由于其在强散射介质中具有优异的成像能力，双光子激发技术非常适用于组织深层的荧光成像（关于双光子方法的详细介绍可参考：<http://www.olympusmicro.com/primer/techniques/fluorescence/multiphoton/multiphotonintro.html>）。结合神经元活动功能性指标以及在体成像实验方案，双光子显微镜已成为记录活体小鼠脑内深部神经活动的标准方法，可用于观测从数十到数百个神经元的群体活动。由于神经元在三维空间中分布，仅采集单一焦平面只能反映局部网络活动的有限信息。因此，对快速、简洁的三维显微成像技术具有明确需求，而使用ETL提供了一种结构简单且实现直接的解决方案。事实上，ETL与双光子显微成像具有高度互补性与良好适配性，主要体现在以下方面：

- 在大多数双光子显微系统中，轴向扫描可以仅通过在激发光路中引入光学调焦方案来实现。这是由于双光子显微所采用的非线性激发机制，使得荧光激发仅发生在焦点处。因此，通过调节激发光束实现焦点的轴向与横向移动，即可完成三维双光子激光扫描显微成像。
- 激发激光通常工作在近红外（NIR）波段，在本系统中为850 nm。较长波长使系统对波前像差具有更高容忍度，而这些像差在可见光波段会显著降低成像质量。
- 激发光源较窄的光谱带宽（10 nm FWHM）降低了由非消色差设计的ETL/OL组合可能引入的色差影响。
- 对于大多数用于功能性细胞活动测量的生物学应用，ETL/OL组件靠近物镜安装所引入的视场（FOV）变化通常不会干扰实验结果。在功能成像中，需要对同一组细胞进行重复扫描；当放大倍率变化导致细胞间距发生变化时，相应的扫描点仍可重新定义并进行匹配采集。

系统配置

与定制双光子显微镜联合使用的系统结构如图14所示。

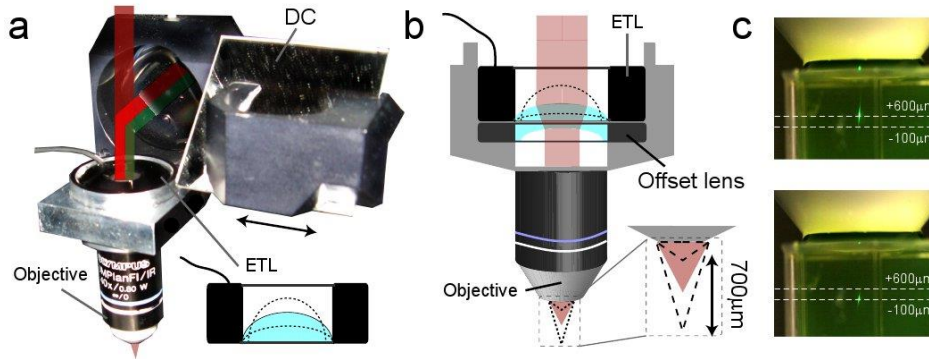


图14: ETL/OL组件在双光子显微镜中的集成实现。

(a) ETL与OL安装于定制物镜支架中，该支架连接至显微镜检测系统。通过可移动二向色镜（DC），发射荧光信号可被引导至背景中的检测系统。支架底部配有RMS螺纹接口，可用于连接 Olympus Corporation LUMPlanFI/IR 40× NA 0.8 水浸物镜。

(b) 定制支架内部ETL与OL组件的剖面示意图。

(c) 在荧光素溶液中对双光子激发焦点的直接可视化结果。与40×物镜组合使用时，焦点（绿色拉长光斑）在约700 μm范围内可进行轴向移动。

结果

通过将ETL焦距在50 mm至200 mm范围内调节，实现了最高约700 μm的轴向调焦范围。由此引起物镜工作距离（标称值为3.3 mm）的变化范围为2.8 mm至3.41 mm。对于大多数成像应用而言，实际所需的轴向扫描范围通常更小。

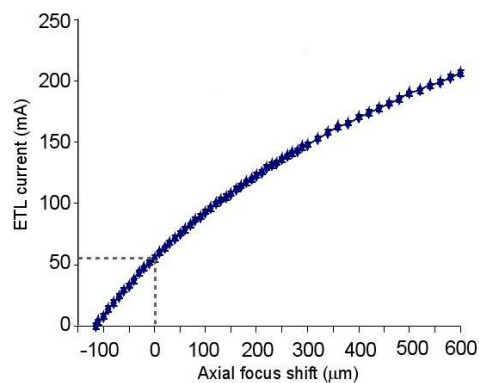


图15: 轴向焦点位移与施加于ETL控制电流之间的关系（40×物镜，-100 mm补偿透镜条件下）。该标定数据集被用于建立查找表（lookup table），以实现目标焦点位置的精确调节与定位。

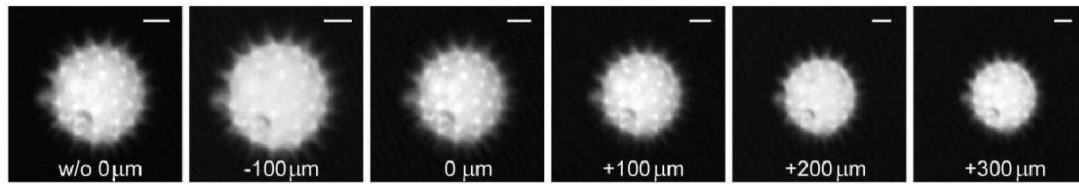


图16: 花粉颗粒成像结果对比。(左图) 未使用ETL调焦时的成像; (右图) 在不同轴向焦点位移条件下, 通过ETL实现再对焦后的成像, 位移量由显微镜电动Z轴平台测量得到。需注意放大倍率及视场 (FOV) 尺寸的变化。比例尺: 5 μm 。

对于基于该系统获取的神经元活动快速功能测量结果, 可参考以下文献:

Benjamin F. Grewe 等: 《基于电控可调透镜的快速双层双光子神经元群体成像》, Biomedical Optics Express, Vol. 2, Issue 7, pp. 2035-2046 (2011), doi:10.1364/BOE.2.002035 (<http://www.opticsinfobase.org/boe/abstract.cfm?uri=boe-2-7-2035>)

应用示例: 检测显微镜

在采用标准镜头组件的检测显微系统中, 可调焦透镜通常安装于无限远校正物镜与筒镜之间。以下示例展示了一个基于标准商用组件的系统配置, 该系统将 EL-10-30-Ci 与 Qioptiq Photonics GmbH & Co. KG 的 Optem 微型检测镜头进行组合应用。所有光学组件均采用 C-mount 接口设计, 因此可实现无缝机械与光学对接。该配置实现的轴向扫描范围 (Z-range) 及分辨率性能如下表所示。



C-mount工业相机
1/2" 5MP 传感器

1.5x 迷你筒镜
P/N 29-90-28-000

可调焦透镜
EL-10-30-Ci-VIS-LD-MV

变倍镜头(0.75x-5.25x) P/N
399510-309

同轴照明单元(带镜头) P/N
296515-310

替代光源: LED环形光

工作距离: ~90mm



0.65mm

放大倍率	1.1x	3.5x	7.9x
轴向扫描范围	400mm	40mm	8mm
轴向分辨率	100 μm	10 μm	2 μm
景深(近似值)	1mm	0.3mm	0.1mm
水平视场	4.5mm	1.4mm	0.65mm

图17: 采用标准商用组件构建的高倍率检测系统示例。图中显示一块PCB在7.9 \times 放大倍率下的成像结果(导线宽度为10 μm)。

在显微成像中使用ETL的检查清单

- TL/OL组件应插入光路的哪个位置？该位置是否具备可达性与机械安装空间？
- 是否可以将ETL/OL组件在光学系统中垂直于地面安装，以避免因重力作用导致ETL膜面产生非对称形变？
- 光束直径是否足够匹配 EL-10-30 的10 mm通光孔径？（此要求同样适用于共轭瞳面的尺寸。）如果不需要电动调焦功能，可考虑使用 ML-20-35 手动可调透镜，其自由通光孔径为20 mm。
- 所需的调焦范围是多少？在大多数情况下，ETL的光学调焦需与机械调焦装置配合使用，以满足整体行程需求。ETL通常适用于中高数值孔径物镜下的几十微米至数百微米调焦范围；对于低倍率、低NA物镜，调焦范围可扩展至约1 mm。
- 对光学性能有哪些约束要求？例如在双光子显微中，近红外准单色激发光对色差及其他像差的要求较低，因此可实现数百微米的调焦范围，适用于在体脑成像。而共焦显微系统通常对像差校正要求更高，但样本尺度较小（几十微米量级），因此ETL仍可在特定应用中有效使用。通常通过完整光学系统仿真可优化ETL调焦方案以满足性能需求。
- 目标调焦速度是多少？已有实验表明 EL-10-30 可实现快速调焦，例如在40× NA 0.8物镜条件下，100 μm 焦点位移可在15 ms内完成，对应焦距从108 mm变化至82 mm。

参考文献与致谢

衷心感谢以下人员在 EL-10-30 相关应用测试中的支持与贡献，并参与了本应用说明的实验验证与技术完善：Benjamin F. Grewe、Fabian F. Voigt、Marcel van 't Hoff、Fritjof Helmchen（苏黎世大学脑研究所），以及 Helge Ewers（苏黎世联邦理工学院物理化学实验室与生物化学研究所）。本文档由 Fabian F. Voigt 撰写。本应用说明中的研究工作得到了苏黎世大学、瑞士国家科学基金会（SNSF）、欧盟第七框架计划（EU-FP7）以及瑞士 SystemsX.ch 计划（项目 2008/2011-Neurochoice）的资助与支持。

使用 Optotune 透镜的相关文献

- B. F. Grewe, F. F. Voigt, M. van 't Hoff, and F. Helmchen, “利用电控可调透镜实现神经元群体快速双层双光子成像” *Biomedical Optics Express* **2**, 7, 2035-2046 (2011). (<http://www.opticsinfobase.org/boe/abstract.cfm?uri=boe-2-7-2035>)
- B. Kemper, R. Schubert, S. Dartmann, A. Vollmer, S. Ketelhut, G. von Bally, “自干涉数字全息显微中的改进定量相位衬度及利用内吞微球探测细胞质动态折射率变化” *SPIE 三维及多维显微成像: 图像获取与处理 XX*, Proceedings Vol. 8589 (2013). <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=1656293>
- F. O. Fahrbach, F. F. Voigt, B. Schmid, F. Helmchen, and J. Huisken, “基于可调透镜的快速三维光片显微成像” *Optics Express* **21**, 18, 21010-21026 (2013). (<http://www.opticsinfobase.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-21-18-21010>)
- J. L. Chen, O. A. Pfäffli, F. F. Voigt, D. J. Margolis, and F. Helmchen, “利用可调透镜在线校正双光子成像中的舔舐引起脑运动” *Journal of Physiology* **00**, 00, 1-10 (2013). (<http://jp.physoc.org/content/early/2013/08/29/jphysiol.2013.259804.abstract?sid=52004717-fd2e-4c39-8c6a-24cc2df0645a>)
- J. M. Jabbour, B. H. Malik, C. Olsovsky, R. Cuenca, S. Cheng, J. A. Jo, Y.-S. L. Cheng, J. M. Wright, and K. C. Maitland, “利用电控可调透镜实现共焦显微中的轴向光学扫描”, *Biomedical Optics Express* **5**, 2, 645-652 (2014). <http://dx.doi.org/10.1364/BOE.5.000645>