

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度值来实现（见图 1）。焦距功率（以屈光度计）与对比度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。

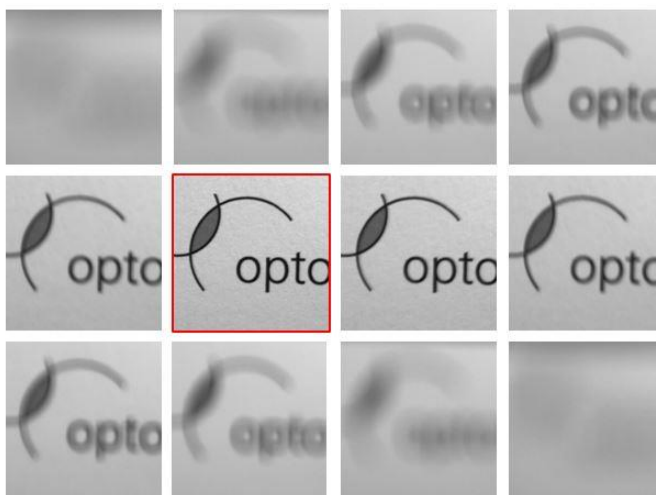


图 1：通过可调焦液态透镜在不同屈光度设置下扫描，以找到图像的最佳焦点。

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。随后将对比度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度值。随后确定与（迄今为止）最大对比度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。

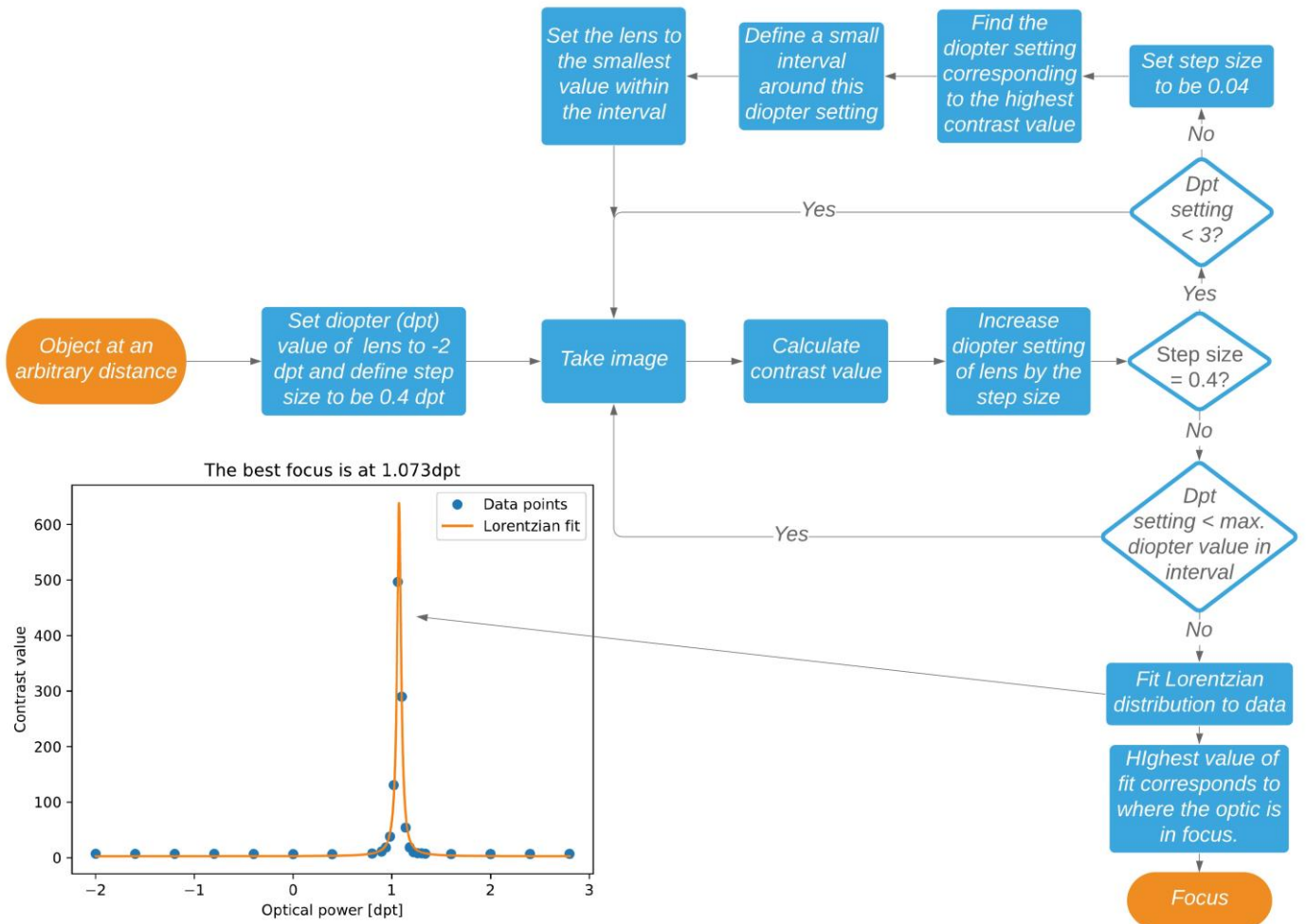


图 2：自动对焦算法的程序流程。软件在不同屈光度设置下采集图像的对比度值。第一次扫描采用较大的步长遍历整个屈光度范围，第二次扫描采用较小步长，在最大对比度附近采集数据点。随后对数据点拟合洛伦兹分布，分布峰值即指示最佳焦点对应的透镜屈光度。

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。

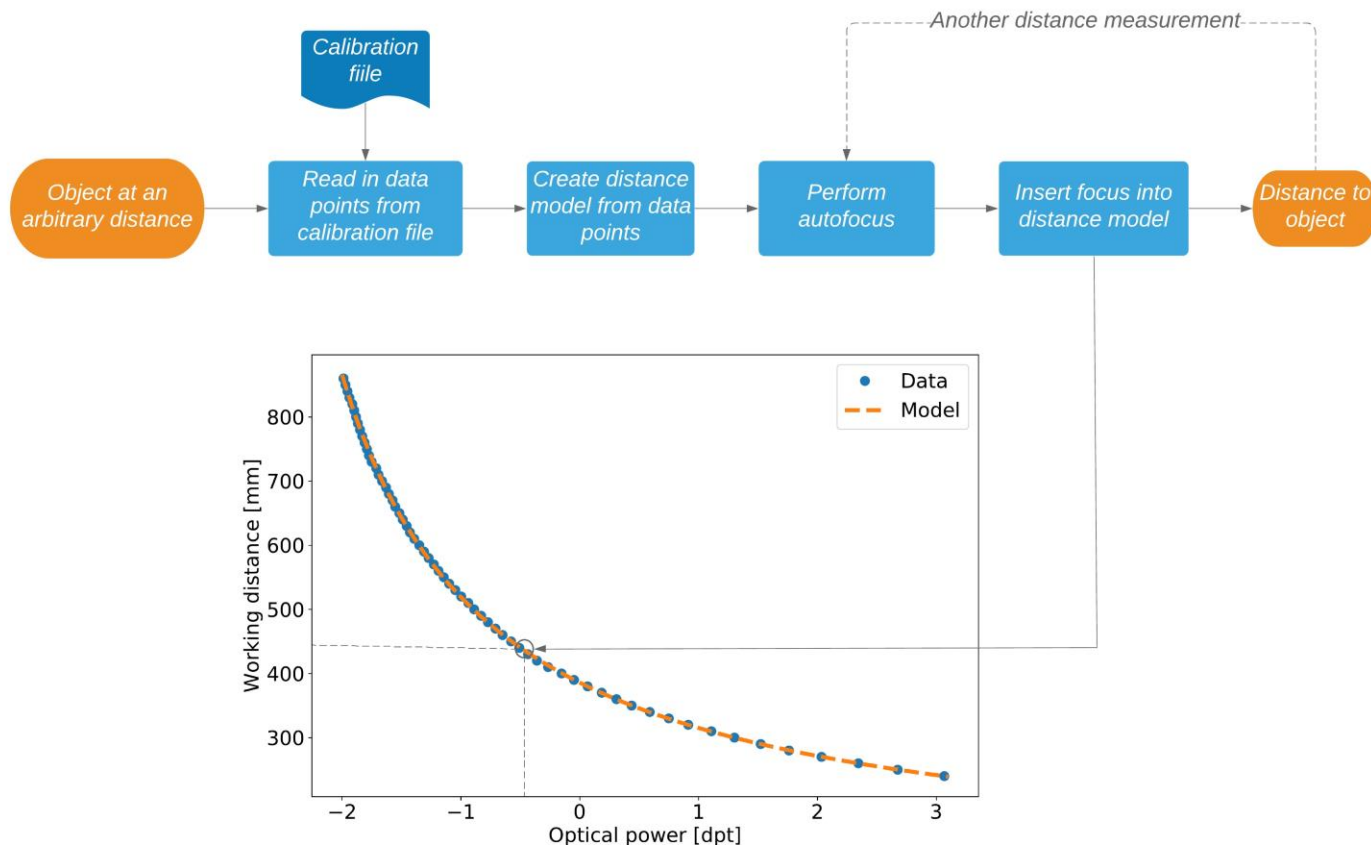


图 3：距离传感器的程序流程。软件首先读取包含拟合模型所需数据的校准文件。在我们的设置中，透镜光学功率与工作距离呈反比，因此模型以 $1/x$ 形式建立。一旦完成自动对焦，获得的焦点位置会被代入距离模型，从而计算物体距离。

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。

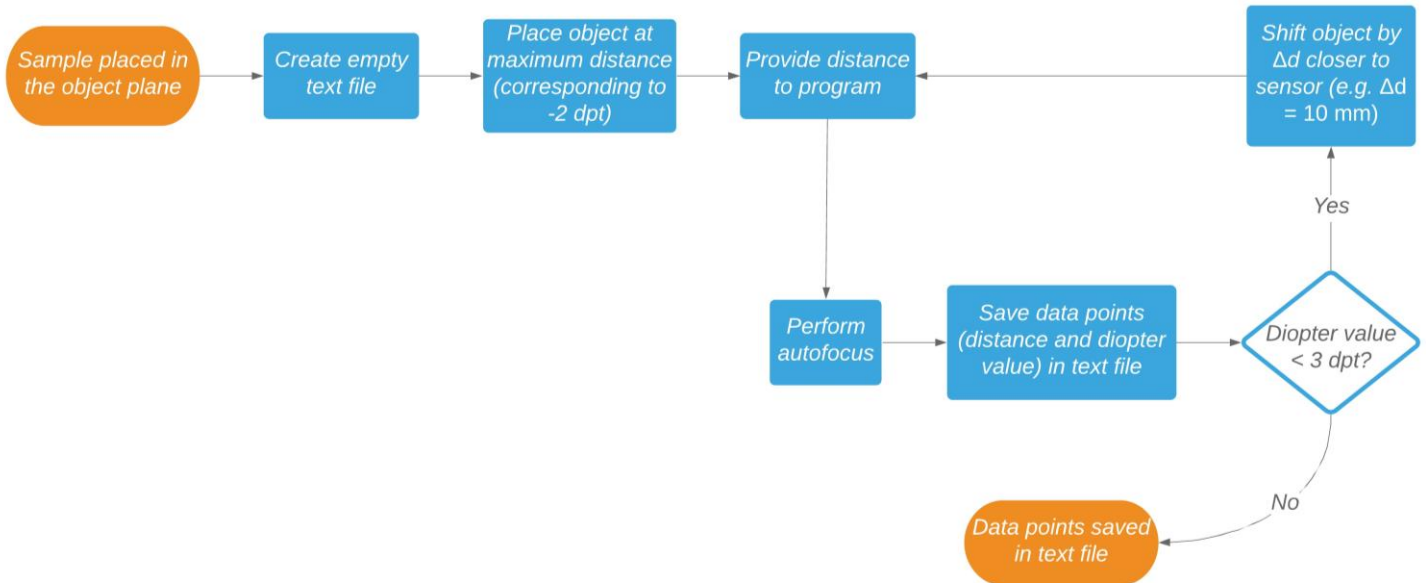


图 4：距离校准的程序流程。软件采集相机到物体的实际距离及对应的屈光度设置，并将数据保存到文本文件中。该数据用于距离传感器的校准。增加校准点的数量可提高距离测量的精度，因此物体的位移 Δd 应保持较小。

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 300 mm，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 16 mm 有效通光孔径（对应等效光圈数 F/3.1）。系统采用“前透镜配置”，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、50 mm 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。

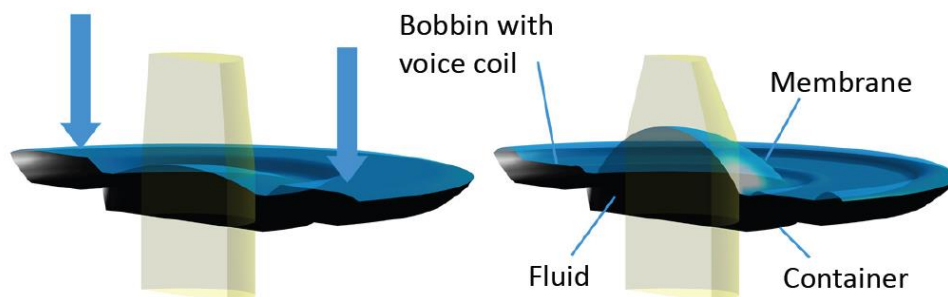


图 6：电动可调焦液态透镜 EL-16-4 的工作原理

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。

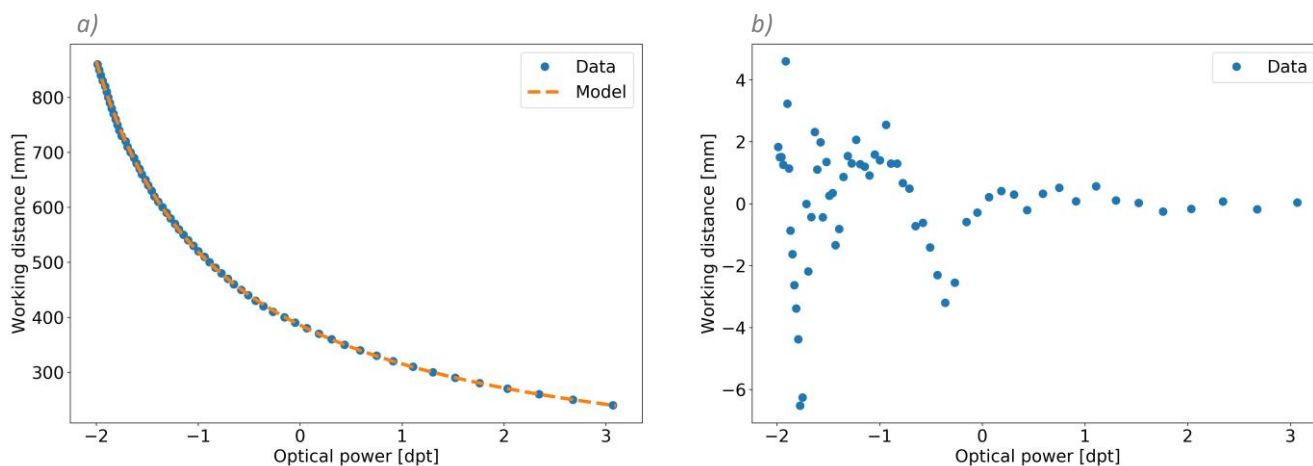


图 7：(a) 距离传感器的校准曲线，用于在图 5 所示配置下，根据已知光学功率获得对应的物体距离。(b) 校准曲线的残差（第 i 个数据点 x_i 与模型在 x_i 处预测值之差）。在负屈光度或较大距离区域，残差分布更为分散，表明该距离传感器在透镜正屈光度范围内具有更高的测量精度。

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。

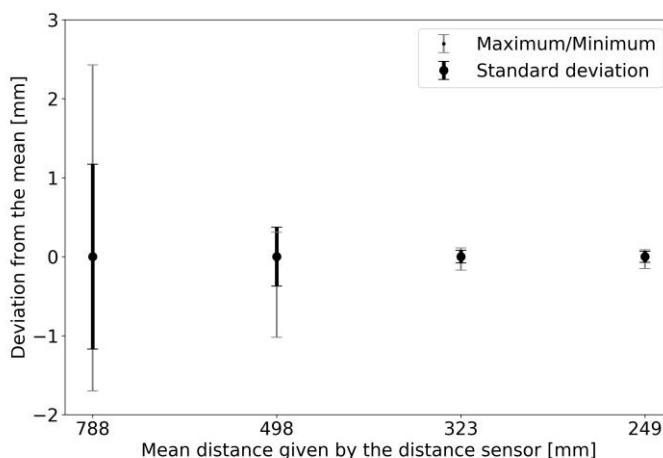


图 8：所述配置的重复性测试结果。图中给出了在四个不同距离下进行 10 次测量所得的标准差，以及相对于均值的最大与最小偏差。所有测量结果均处于景深范围之内；且在较短工作距离下景深更小，从而对应更高的测量精度。

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