



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。

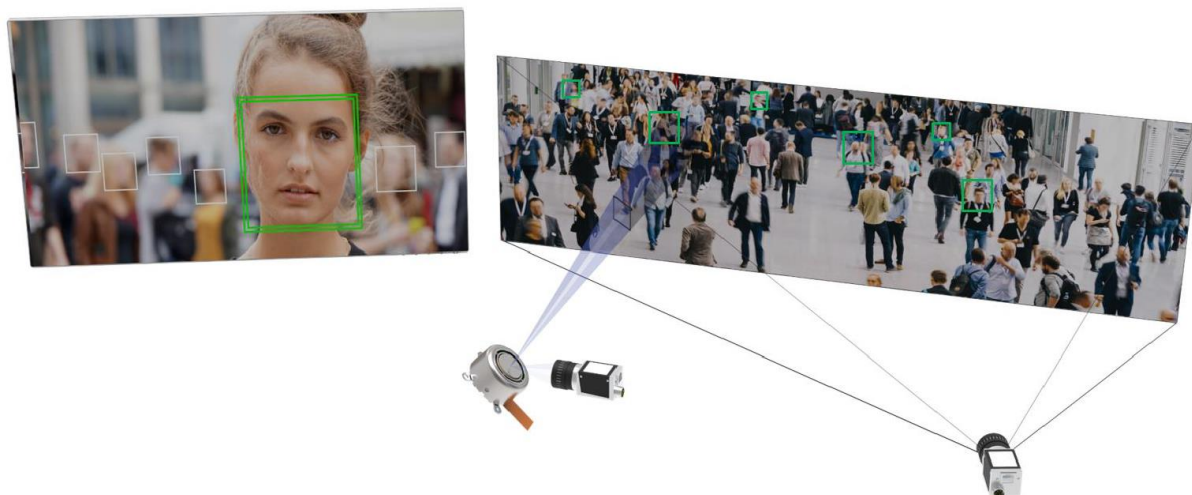


图 1: 利用二维快速转向镜实现视场扩展与感兴趣区域选择

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。

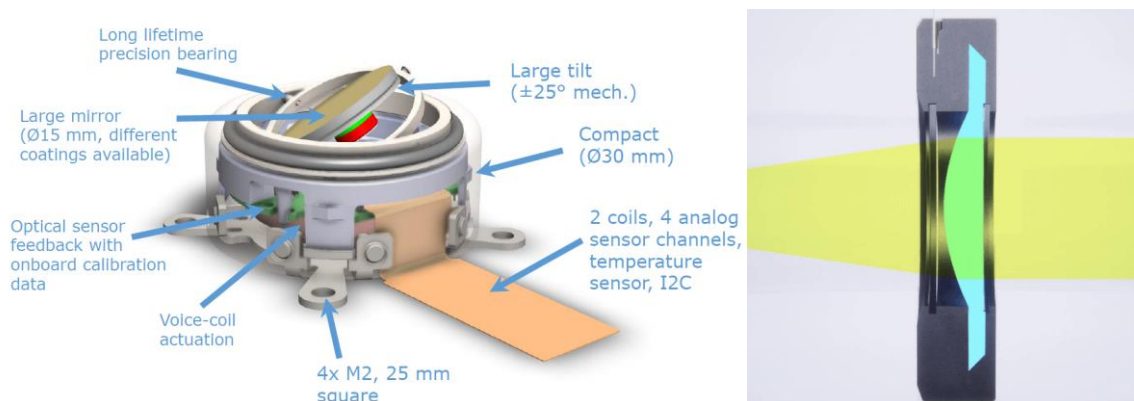


图 2: MR-15-30 快速转向镜的主要技术优势及可调焦透镜的工作原理

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。

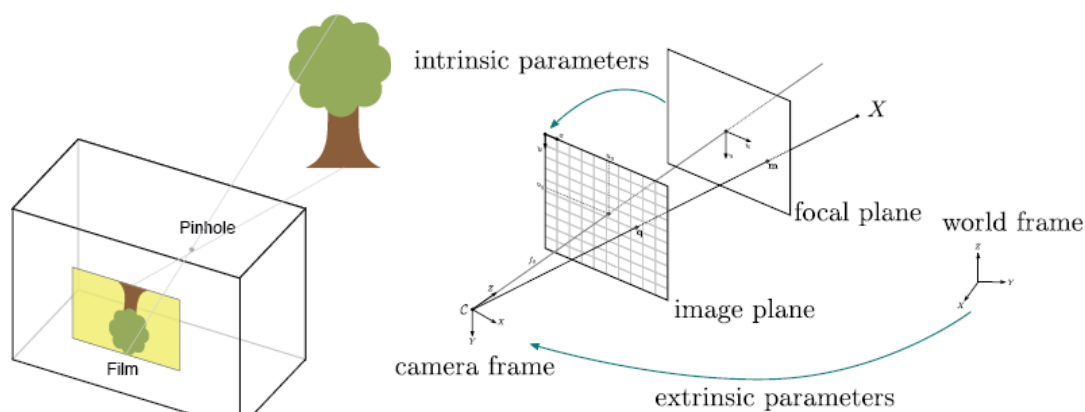


图 4: 左侧为针孔相机模型，右侧为相机内参与外参标定示意图。

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。

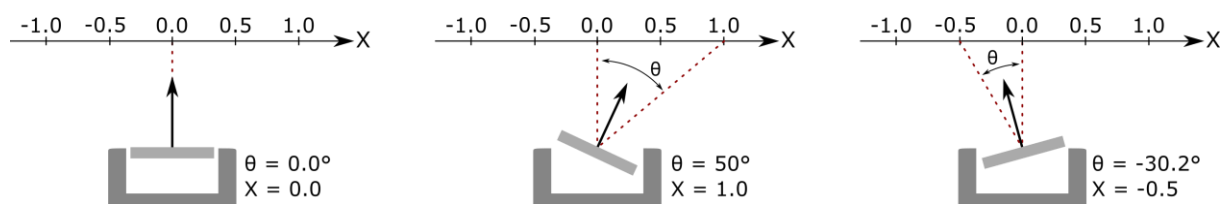


图 6：示例镜面偏转及其对应的 X 坐标，依据镜面坐标系定义。

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。

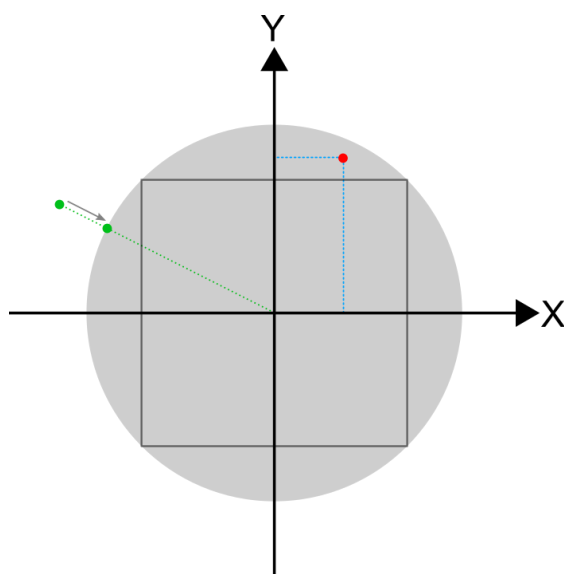


图 7：镜面坐标系及可达位置示意图。

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 。

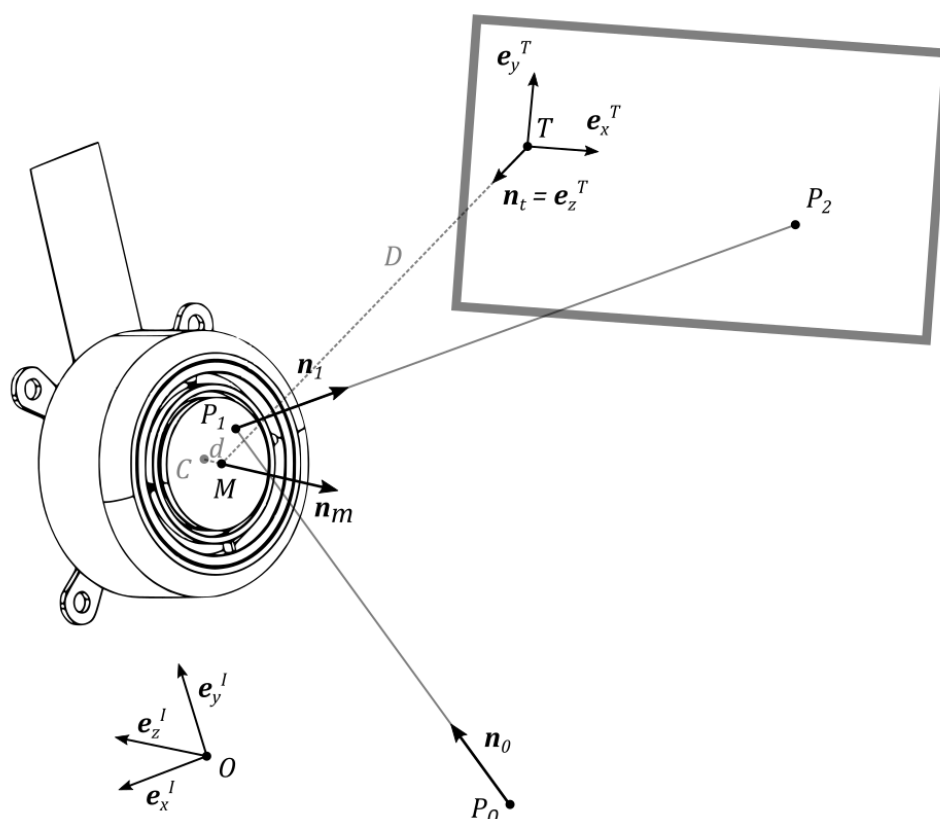


图 8：镜面与目标平面的坐标系定义。

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。

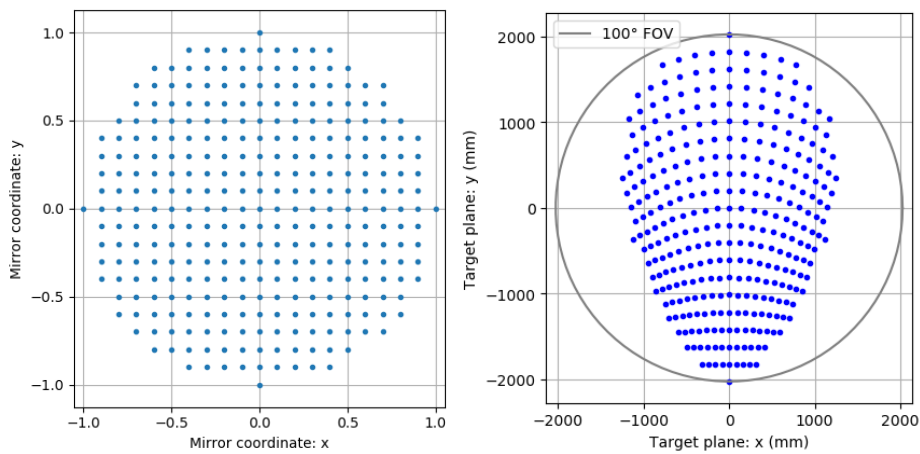


图 9: 在 45° 入射角 (AOI) 条件下, 对镜面可用角度范围进行等间隔采样所得到的模拟视场 (右图); 作为参考, 同时给出了 0° AOI 条件下产生的 100° 视场 (左图)。

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。

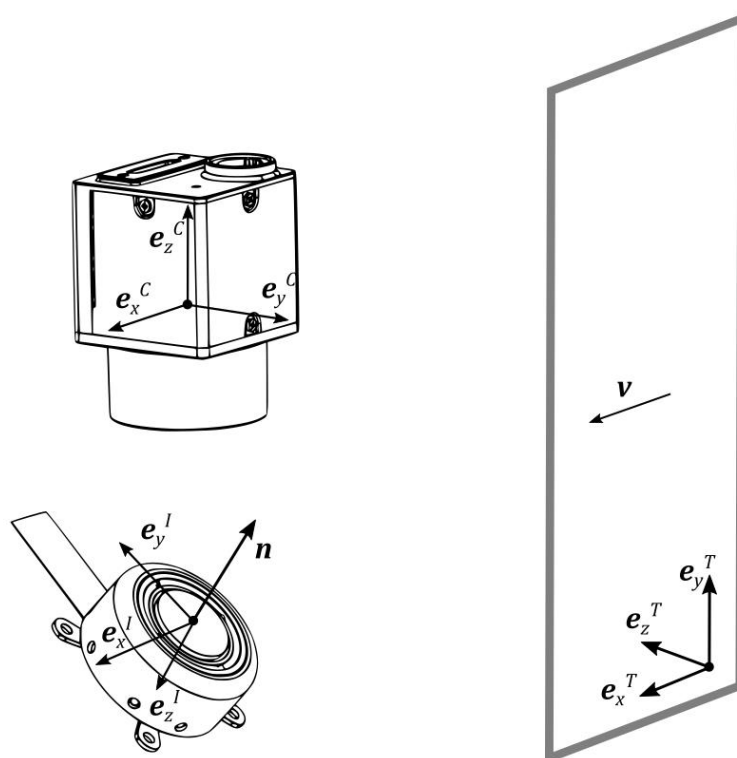


图 10：三种不同参考系——分别与物体/目标平面、镜体以及相机对齐的坐标系。

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:

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

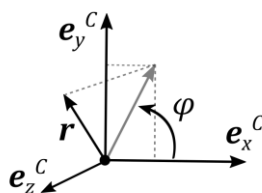


图 11: 向量 \mathbf{r} 在图像传感器平面上的投影。经过镜面反射后, 水平向量 \mathbf{v} 以角度 φ 发生旋转。

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。

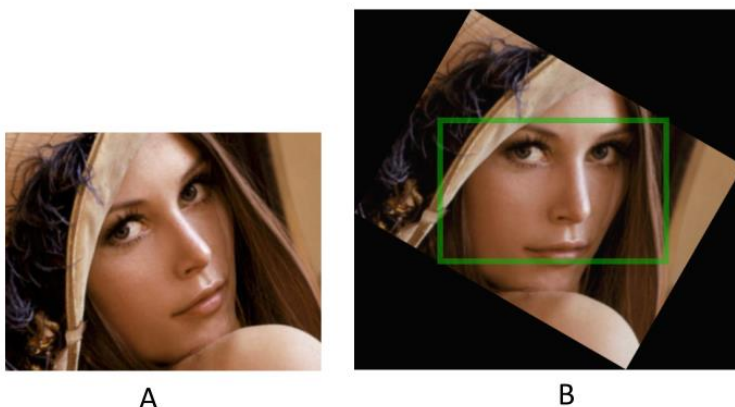


图 12: 相机采集的旋转图像 (A) 与反向旋转校正后的图像 (B)。

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。

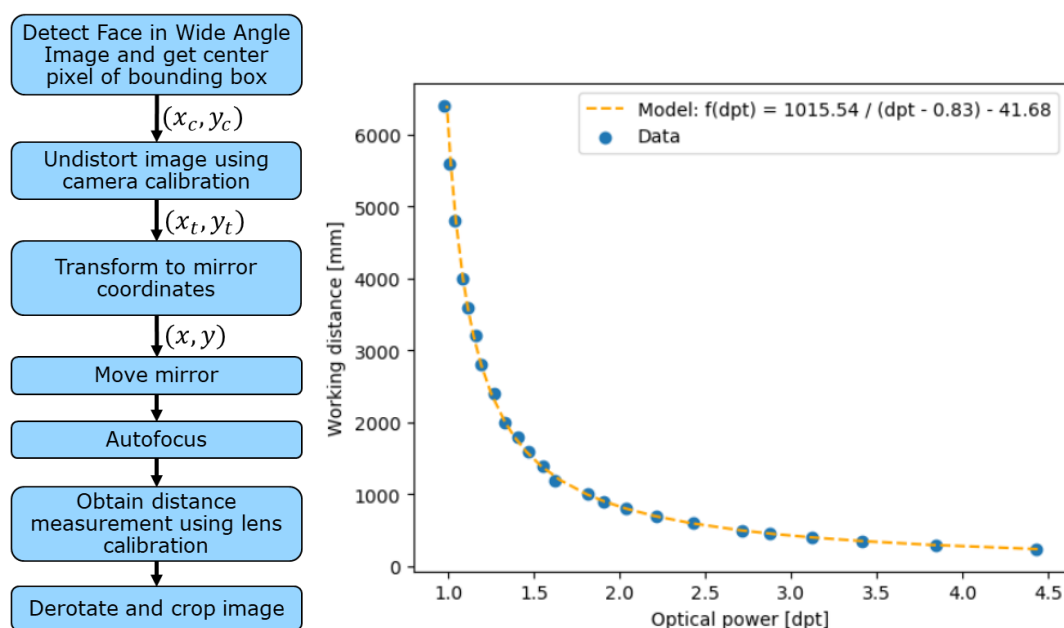


图 13: Cockpit 中人脸检测演示程序流程图 (左) 以及距离-离焦定例 (右)。

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。

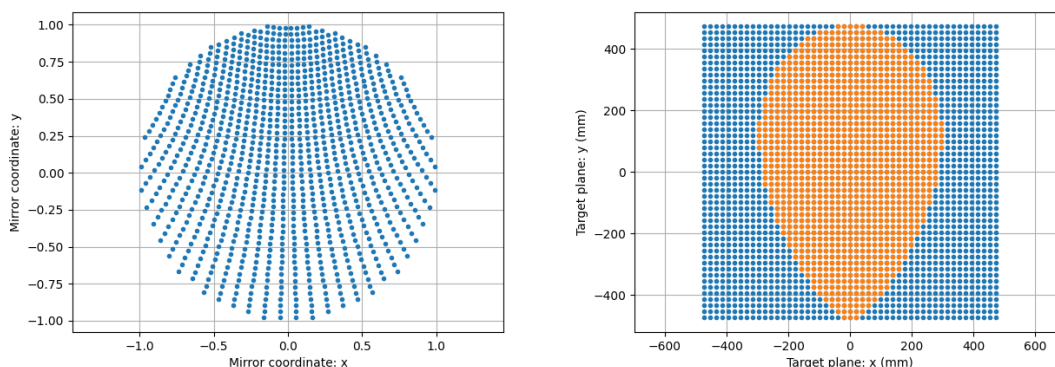


图 15: 非均匀分布的镜面位置集合 (左) 在目标平面上对应均匀分布的坐标 (右, 以橙色标示)。

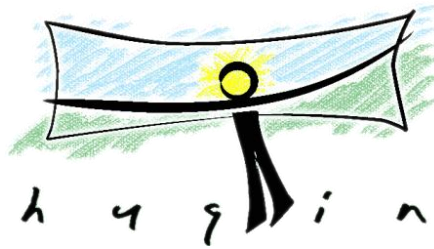
6.2. 图像采集示例 Python 脚本

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

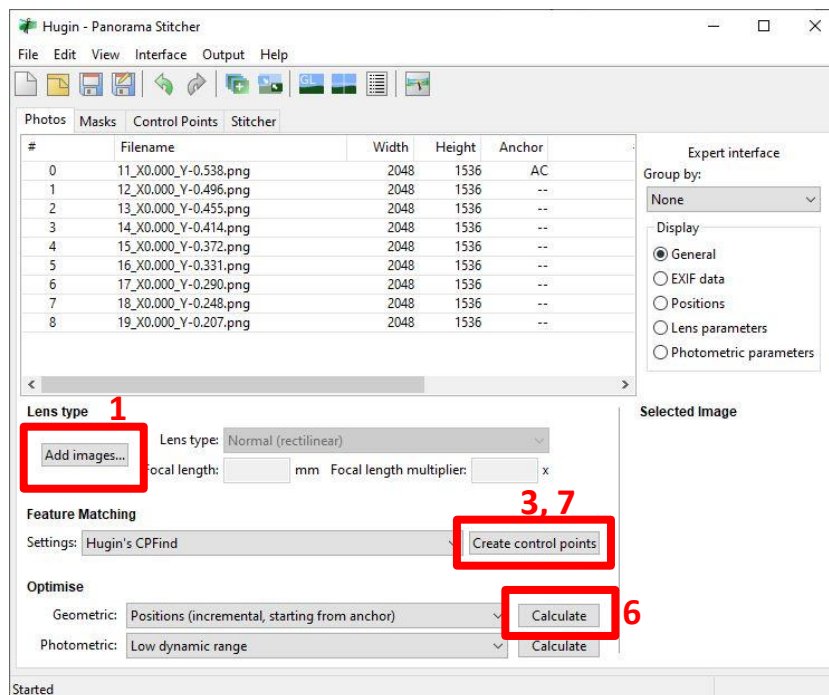
6.3. 拼接处理

拼接过程基于开源且功能强大的 Hugin 软件实现。

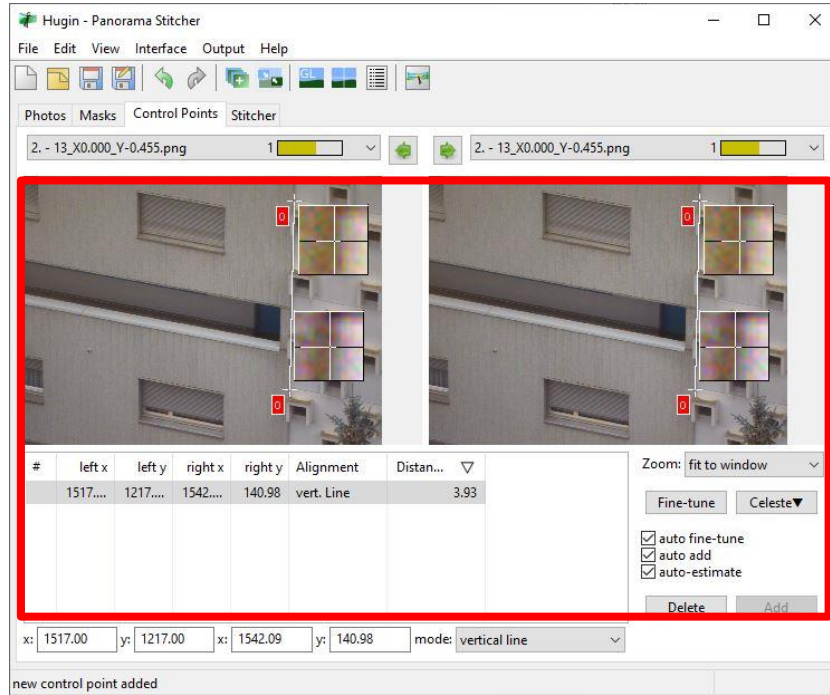


- 1) 导入所有图像。将当前 Hugin 工程保存为 project.pto。
- 2) （可选）根据镜面位置获取初始图像分布及图像旋转信息。该步骤用于限制图像匹配仅发生在相邻图像之间。通过命令行执行：“pto_var --set-from-file filename --output=output.pto project.pto”其中文件（filename = “Hugin.csv”）由用于拍摄图像的 Python 脚本生成。该步骤可使所有图像在拼接后大致位于其最终位置附近。若该过程效果良好，可直接跳至第 7 步。
- 3) 生成控制点（CP）：在特征匹配过程中，创建新的控制点检测器（cpfind.exe，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）。

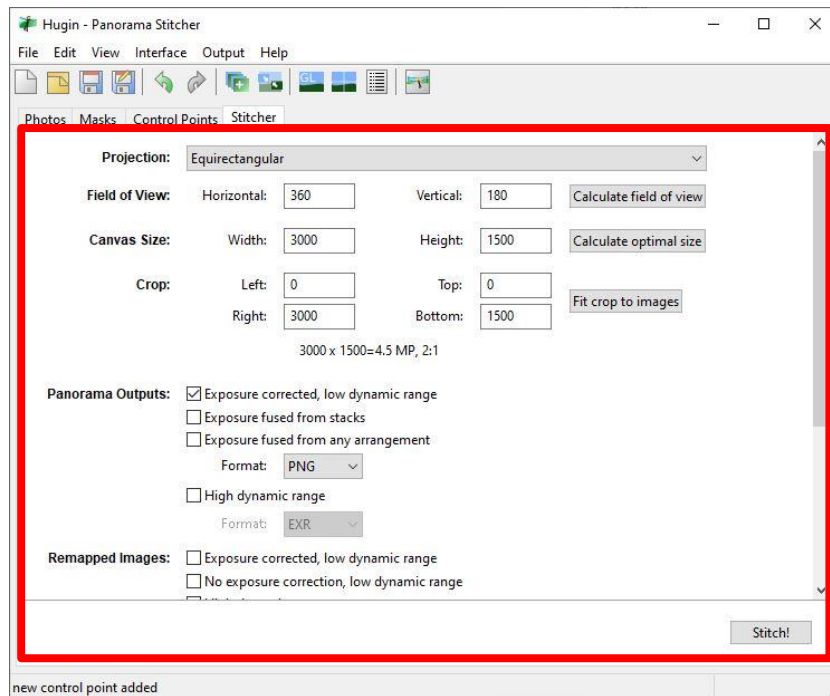
- 8) (可选) 添加水平/垂直直线：该步骤有助于减少拼接图像中的畸变。在图像不同区域添加线性特征（例如建筑物边缘等）可提高拼接质量；但在视场同一区域集中添加大量线条并无实际效果。
- 9) 验证与剔除错误控制点（CP）：可在控制点（CP）表中快速识别错误点，通常表现为距离较大的点（可按距离排序）。对这些点进行逐一验证，并删除不正确的控制点（由于图像中重复纹理结构，如建筑物，可能会产生大量错误CP）。在删除错误点后，应定期重新执行优化步骤。
- 10) 光度优化：选择多个光度参数进行优化，尤其是渐晕参数³。需注意选择一张曝光正常（既不过曝也不过暗）的图像作为曝光锚点（在 Photos 面板中右键设置）。
- 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