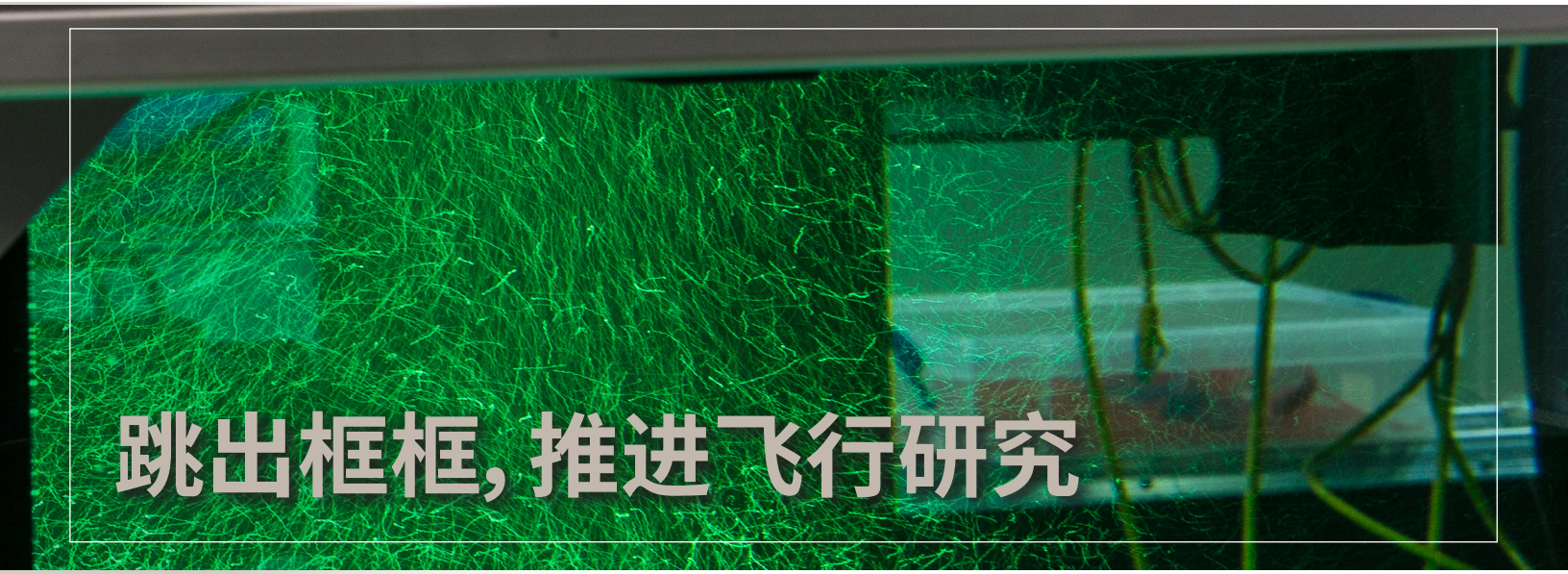
PHANTOM®

2023
实例探究



跳出框框，推进飞行研究

空气动力学研究人员在进行飞机机翼运动的关键研究时，使用 8 台 400 万高速摄像机和 LTP 方法摇动盒子来跟踪粒子。

拉格朗日粒子跟踪（LPT）是一种流行的流动可视化技术，它允许科学家们使用高速摄像机在三维体积中跟踪示踪粒子。这种方法在许多流体力学研究中发挥着重要作用，特别是那些研究湍流的研究。

为了突破这一技术的局限性，一些研究人员开始使用多台高速摄像机和先进的三维测量软件，以使用时间分辨数据集中包含的时间信息来跟踪流体中密集的粒子。这种较新的技术被称为“摇动盒子”（STB），可以预测被跟踪的粒子的位置，然后使用图像匹配来校正误差。该算法可以在测量域中对新粒子的位置进行三角测量，使科学家能够以比传统 LPT 更高的位置精度来观察更高的粒子密度。

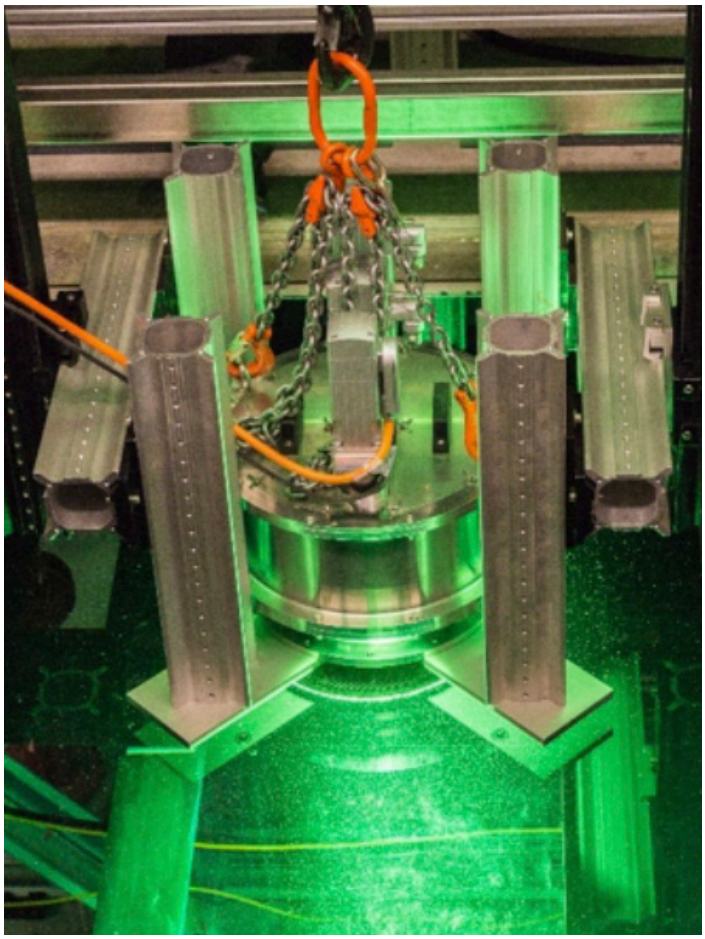
VISION RESEARCH / AMETEK®

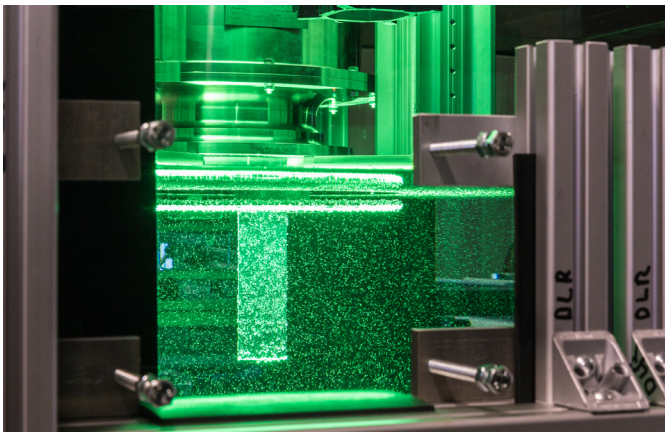
德国航空航天中心采用 STB

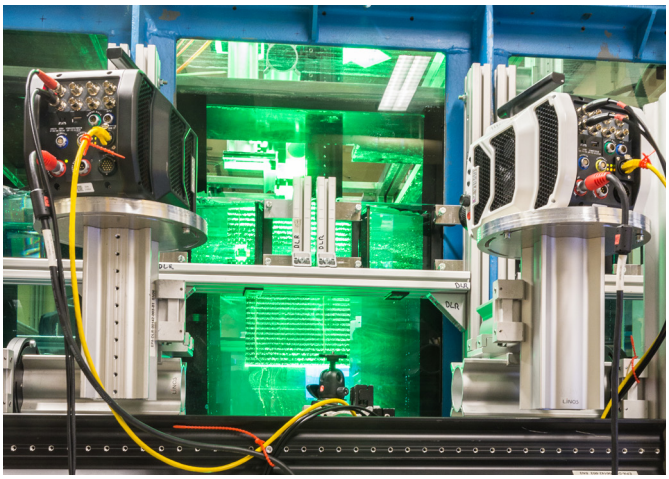
一组来自德国航空航天中心(DLR) 的研究人员最近使用 STB 方法来观察当柔性机翼在水洞内扇动时，作用在柔性机翼上的 Collar 力三角形——空气动力、弹性和惯性力。这个小组由Andreas Schroeder 博士和 Daniel Schanz 博士组成，他们在水洞中加入了示踪粒子，让它们在机翼周围流动，以计算体积压力场并确定空气动力载荷。同时，他们使用画在机翼表面上的跟踪标记来确定弹性和惯性力。

数据是用 Phantom 高速摄像机和 LaVision 的集成成像系统采集的，LaVision 以其在流动和流体动力学方面的专业知识而闻名，专门为时间分辨粒子图像测速（TR-PIV）和粒子跟踪测速（PTV）等先进的光学测量技术设备提供系统。

据德国航空航天中心的团队说，这些测量结果对开发微型航空器很有用。“我们的灵感来自于鸟类拍打翅膀，”Schroeder 说。“了解机翼配置如何影响机翼周围的流动现象和空气动力，可以帮助我们设计出更有效地产生升力和推力的车辆，或者可以更灵活地处理阵风。”







动态测试装置。

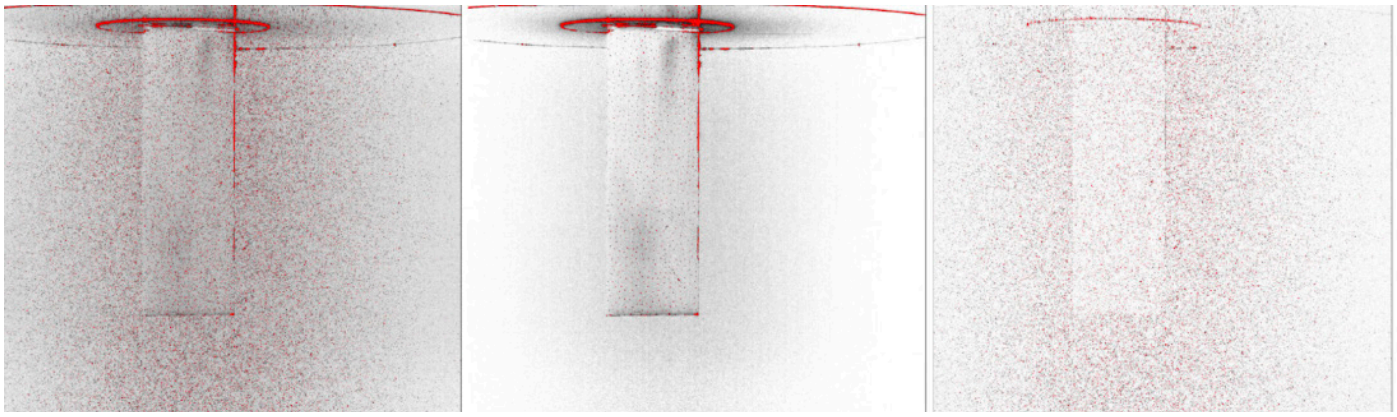
DLR 团队使用一个顶部开放、侧面和底部有窗户的水洞进行了实验。在水洞周围，他们放置了八台 400 万像素（Mpx）的高速摄像机：六台 Phantom v2640 和一台 Phantom v1 840，以及一台 Phantom T1340。三个大功率的 LED 阵列提供照明。这个实验装置还包括一个机动的机翼机构，其中包括三个具有不同灵活性的 NACA 0012 机翼。机翼的运动受到了自然界的启发，该团队根据先前对自由飞行的猫头鹰的测量，确定了每个机翼的形状和运动参数。

八台 Phantom 摄像机以 2 千赫兹（kHz）的功率运行，每台摄像机包含 72 GB 的内存，使研究人员能够以 400 万的像素分辨率捕获 12,597 张连续图像。

据 Schroeder 说，在一个典型的 LPT 实验中，整个测量体积都在摄像机的视场内。他解释说："然而，当机翼移动时，水洞中的机翼总是阻挡了一部分摄像机的视野。"为了克服这个问题，Schroeder 和他的同事们将摄像机排成两组，每组四台，其中一组中的每台摄像机各面向水洞的一侧，每台机器都通过万兆以太网连接到一个记录工作站上。"通过这种设置，我们总是有三或四台摄像机记录体积中的每个照明区域，这使我们能够捕捉到整个机翼周围的粒子分布。"

为了确定作用在机翼上的弹性和惯性力，研究人员在流体中加入了 60 微米（μm）的球形聚酰胺粒子。他们还在机翼的表面上画了一个随机的白色点状图案，这使他们能够对机翼在水中的运动和形状进行时间分辨测量。在实验过程中，团队在每次 6.3 秒的运行时长中捕获了 12,597 张连续图像，他们共运行了 6 次。

A.) *B.)* *C.)*



机翼标记和粒子的完整视图：a) 第一张是原始图像；b) 第二张是六张图像综合出来的最小值图像，是在机翼运动的同一相位位置提取的；c) 第三张是从摄像机原始图像减去的最小图像 (a-b)。

NACA 机翼是指由国家航空咨询委员会开发的飞机机翼，机翼的形状用 NACA 字样后面的一连串数字来描述。

摇动盒子是如何工作的

这些实验成功与否取决于 STB 拉格朗日粒子跟踪，据研究人员称，它有两个要素。

第一个要素被称为**迭代粒子重建** (IPR)。DLR 团队的专用跟踪软件在捕捉到的图像上检测粒子的峰值，然后利用来自多台摄像机的图像对粒子的位置进行三角测量。

“在粒子重建中，粒子的三维位置往往与真实位置略有偏差，”Schanz 解释说。“这可能是由于噪声、图像重叠或存在重影粒子引起的。”为了克服这个问题，研究小组通过将粒子的三维位置和强度与摄像机图像进行拟合，对每个重建后的粒子的位置和强度进行了优化。这个基于图像匹配的位置优化步骤在 IPR 中是必不可少的。根据 Schanz 的说法，“我们可以通过比较粒子的原始图像和我们合成的图像来优化粒子的位置。然后，我们可以看到重新投影的图像和原始图像之间的不匹配情况。”这种在空间中移动粒子以优化其位置的过程就是我们所说的“摇动盒子”。

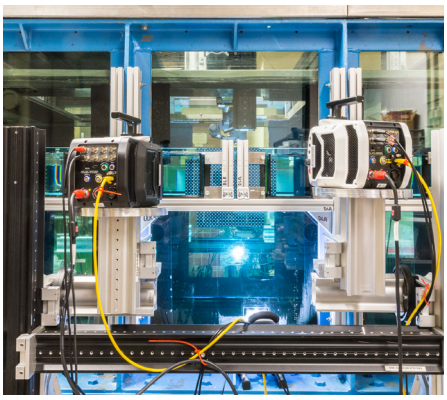
尽管 STB 解决了在较高的粒子密度下的粒子跟踪问题，但重影粒子仍然是一个挑战。这就是第二个 STB 要素发挥作用的地方：**对时间域的利用**。跟踪软件利用现有的时间信息，将已知的粒子轨迹延伸到下一个时间步，然后通过摇动过程校正预测误差。

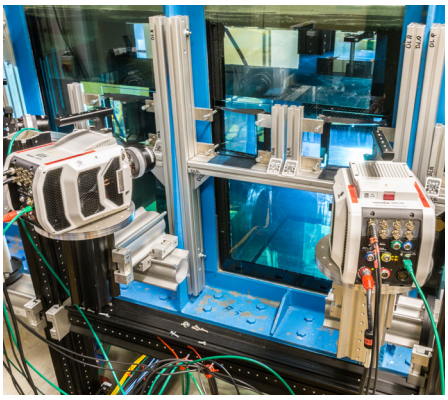
“STB 的价值是它能够利用现有的时间信息来减少每个时间步的重建复杂性，”Schanz 说。“因为我们使用了多台摄像机，所以我们有完整的时间序列可供使用。STB 从时间序列中同一粒子的多个图像中提取我们所需的额外的时间信息。”

据科学家称，STB 算法最初集中在序列中的前四个时间步 (T1-T4)。重建其中每一个时间步的粒子，使研究小组能够区分出好的粒子和坏的粒子。Schanz 解释说：“重影粒子是在时间步的不同位置随机出现的，而真正的粒子是按照轨迹移动的”。“鉴于这一事实，我们可以将好的粒子与坏的粒子区分开来。我们还可以将已知的粒子轨迹延伸到时间序列的下一步。”

在第五个时间步 (T5)，STB 算法使用之前跟踪到的粒子的信息来预测它们的位置。“虽然我们可以做到高度准确，但由于粒子加速或噪声等原因，仍有不可避免的误差，”Schanz 说。“为了纠正这些偏差，我们摇动盒子，以从原始图像中减去投影的图像。”

STB 算法以这种方式继续预测、纠正和摇动更多的粒子，直到处理完整个时间序列为止。





四台 Phantom 摄像机，分别安装在水洞的每一侧，形成了一个摄像系统。

适合这项任务的摄像机

虽然观察机翼两侧需要使用多台高速摄像机，但具体应该选择哪种摄像机型号是根据帧率、传感器分辨率和易用性等因素来确定的。“在这些实验中，我们知道我们需要至少 2 千赫兹的重复率，或大约每秒 2,000 帧，或者更高，”Schantz 说。“我们还需要一个至少 400 万像素的传感器分辨率，以便对足够多的粒子进行成像，从而解析流体的空间结构。”

Phantom v2640 和 v1840 满足这些技术要求，在 2048 x 1952 分辨率下能够达到至少 4,500 帧/秒。用于这些实验的第三种高速摄像机型号是较新的 Phantom T1340。它以更小的外形尺寸为研究人员提供了所需的性能，是有限空间环境的理想选择。每一个 Phantom 型号都具有低噪声 (8.7 e- 或以下)，这是一个巨大的好处，能够在图像的黑暗和通常难以捕捉的区域捕捉到清晰的细节。

所有三种类型的摄像机都符合传感器分辨率的要求，并超过了帧率的要求。Schanz 说：“Phantom 摄像机为我们提供了包含丰富细节的图像，以便我们为我们的 STB 分析对粒子进行成像。”

Phantom 摄像机的其他重要特征包括：

与 LaVision 成像系统集成。Phantom 摄像机与 ***LaVision DaVis*** 相结合，后者是一个功能齐全的软件包，用于流量测量技术领域的智能成像应用。虽然研究人员使用他们自己的软件进行粒子跟踪和 STB 分析，但他们也使用了 LaVision 软件进行图像捕捉和保存过程。

操作简便。DLR 团队过去不得不为每台摄像机设置一台 PC，对于需要多台摄像机的现场实验来说，这是很麻烦的。Schroeder 说："对于这些机翼实验，我们只需将所有 8 台 Phantom 摄像机连接到一台由 LaVision 配置的 PC 上，这大大简化了我们的设置。"

快速的下载速度。由 Phantom 摄像机的万兆以太网连接实现的闪电般的下载速度对研究人员来说是非常重要的，他们以前需要等待 30 分钟或更长时间才能下载他们的图像。Schroeder 说："每次我们去现场，我们都必须快速安装和拆卸我们的设备，[标准以太网]对我们来说不是一个可行的选项。""缓慢的下载速度浪费了我们太多的时间。"

另外，在这些机翼实验中，研究小组可以使用万兆以太网和集成的 LaVision 系统在几分钟内运行所有 8 台摄像机并同时下载所有图像。

最小的振动。"安静模式"可以进一步优化图像的质量。这个摄像机功能可以在拍摄过程中关闭冷却风扇。Schroeder 说："这个方案消除了一个可能影响我们测量准确性的振动源。"

对未来充满希望

虽然德国航空航天中心的研究团队由于新冠疫情的影响还没有评估这些数据对流动物理学的意义，但他们已经实现了许多里程碑，特别是，他们发现 STB 能够准确跟踪包含密集粒子的流体。此外：

- 试验表明，可以使用 8 台高速摄像机成功地进行 STB，而通常，只使用 3 或 4 台摄像机进行 STB。
- 实验表明，在障碍物与示踪粒子占据相同测量体积的情况下，可以成功地解析多台摄像机的视线等各种变量。

与 DLR 研究小组合作的 LaVision 应用顾问 Alex Nila 说："这些实验采用我迄今为止看到的最高的示踪粒子密度。多台摄像机、传感器的高分辨率和简化的设置使我们获得了如此高质量的数据。因此，我们相信我们会获得满意的结果，并在未来取得引人注目的研究成果。"

"我们的评估正在进行，"Schanz　补充说。"我们的下一个任务是将机翼的三维有限元模型拟合到捕捉到的标记云上，这将使我们能够完全描述机翼的弯曲情况。"

*要了解更多信息，请访问：**www.phantomhighspeed.com**。*

PHANTOM® VISION RESEARCH / AMETEK®

*某些 Phantom 摄像机需要出口许可证。有关更多信息，请访问 www.**phantom**highspeed.com/export。*