

# Shake-the-Box

高密度体空间粒子追踪术



**LAVISION**

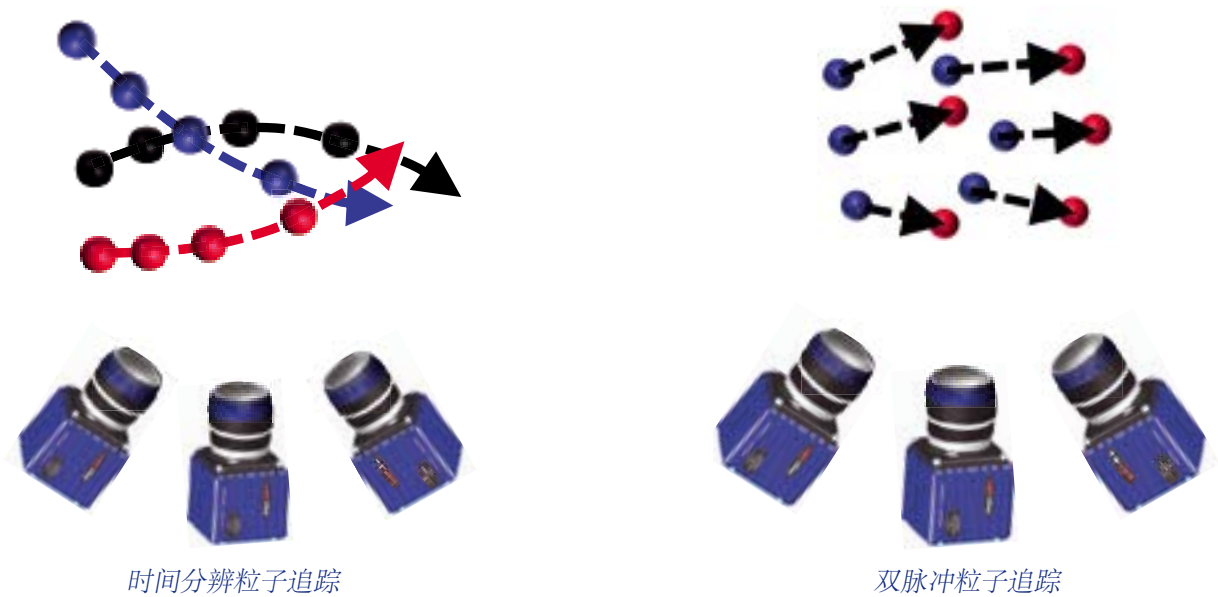
FOCUS ON IMAGING



## 时间分辨抖盒子：超高注入密度下的粒子跟踪

**抖盒子 (Shake-the-Box)** [1,2]是目前最为先进的粒子跟踪方法。这种方法的独特优势在于能在迄今最高粒子注入浓度下追踪粒子轨迹。非介入式速度、涡量、加速度和压力场测量所能实现的最高空间分辨率与粒子追踪所获得的粒子轨迹的巨大数量有着直接联系。

基本的**时间分辨抖盒子**原理已经更新发展可用于**双脉冲**和**4脉冲抖盒子**[3,4]处理并集成在LaVision的DaVis10版本软件平台中。现在，有史以来第一次使用常规的双帧PIV相机，在每帧曝光时间内，照射一或两个光脉冲，就可以进行高浓度粒子轨迹追踪了。与时间分辨测试系统相比，其最大可测量速度上限获得极大提升。



时间分辨粒子追踪

双脉冲粒子追踪



抖盒子实验：直升机的地面效应 (DLR友情提供)

### 参考文献：

- [1] Patent: DE102013105648B3
- [2] Schanz et al., „Shake-The-Box: Lagrangian particle tracking at high particle image densities“, Exp. Fluids (2016) 57:70
- [3] Jahn et al., „2-pulse STB: 3D particle tracking at high particle image densities“, ISPIV 2017
- [4] Novara et al., „Multi-exposed recordings for 3D Lagrangian particle tracking with Multi-Pulse Shake-The-Box“, Exp. Fluids (2019) 60:44



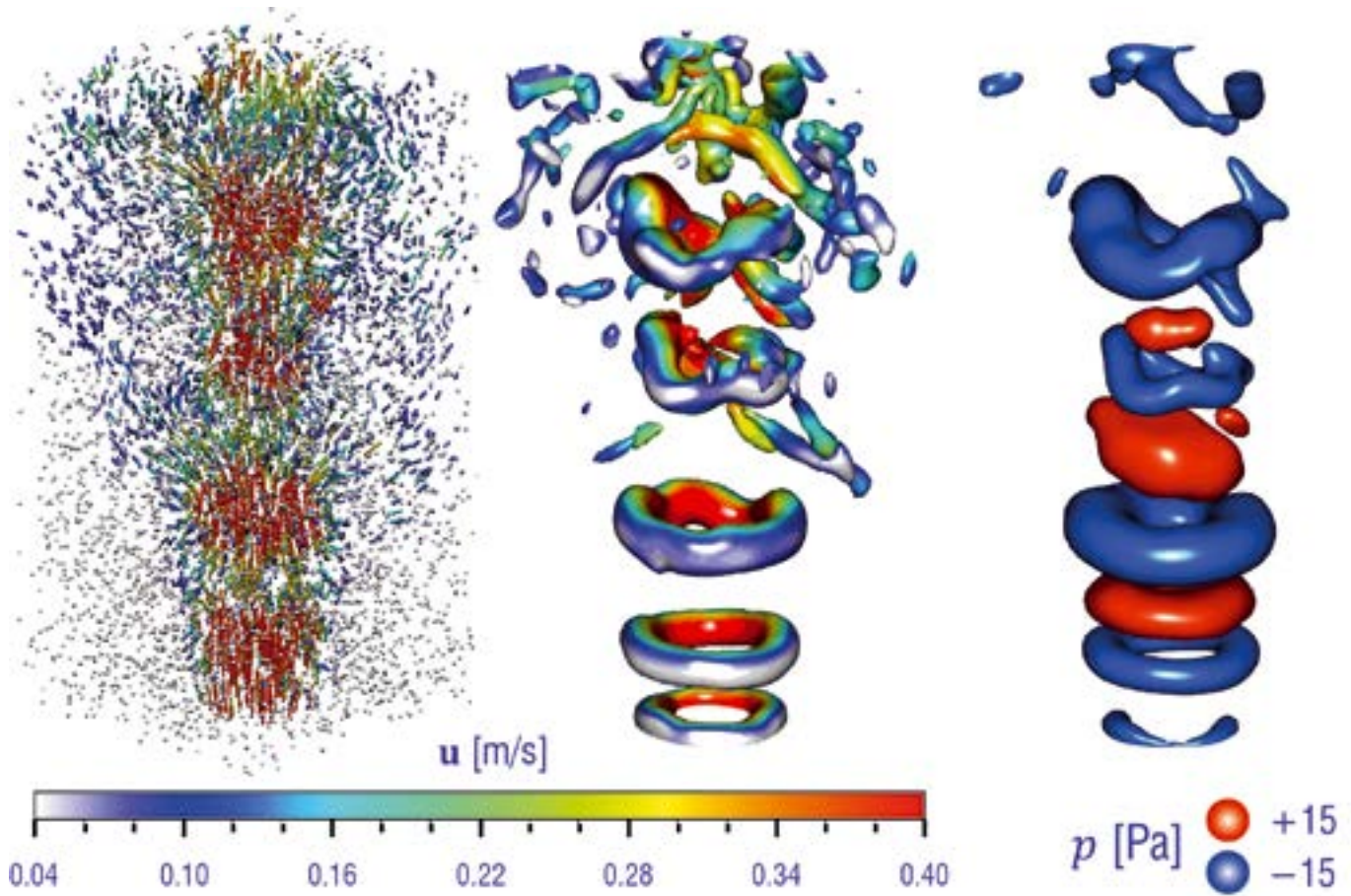
### 抖盒子粒子 轨迹

### 流体结构

Swirl strength  $\lambda_2 = -2000 \text{ s}^{-2}$

### 压力结构

$p - p_{\text{avg.}} = \pm 15 \text{ Pa}$

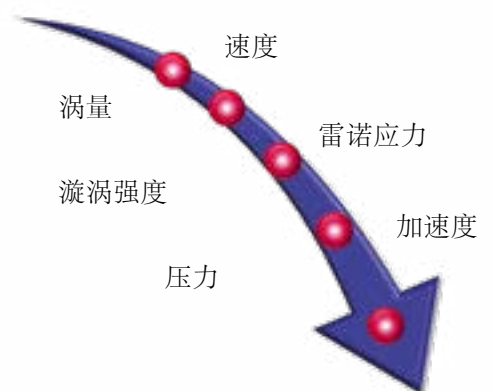


抖盒子实验：水中射流（代尔夫特大学友情提供）

## 抖盒子特点：

- ▶ 获奖的粒子追踪算法<sup>[5]</sup>
- ▶ 迭代粒子重构确定高精度粒子位置<sup>[6]</sup>
- ▶ 运算耗费低——分析时间短
- DaVis 10**中的新功能
- ▶ 在**时间分辨抖盒子**分析功能中添加**多脉冲抖盒子**功能，拓展应用范围
- ▶ 通过数据像素合并或精细尺度重构（VIC#）<sup>[7]</sup>将粒子轨迹转换为矢量网格，从而获得极高的空间分辨率
- ▶ 用PIV求压力模块进行非介入式压力测量<sup>[8]</sup>

粒子轨迹

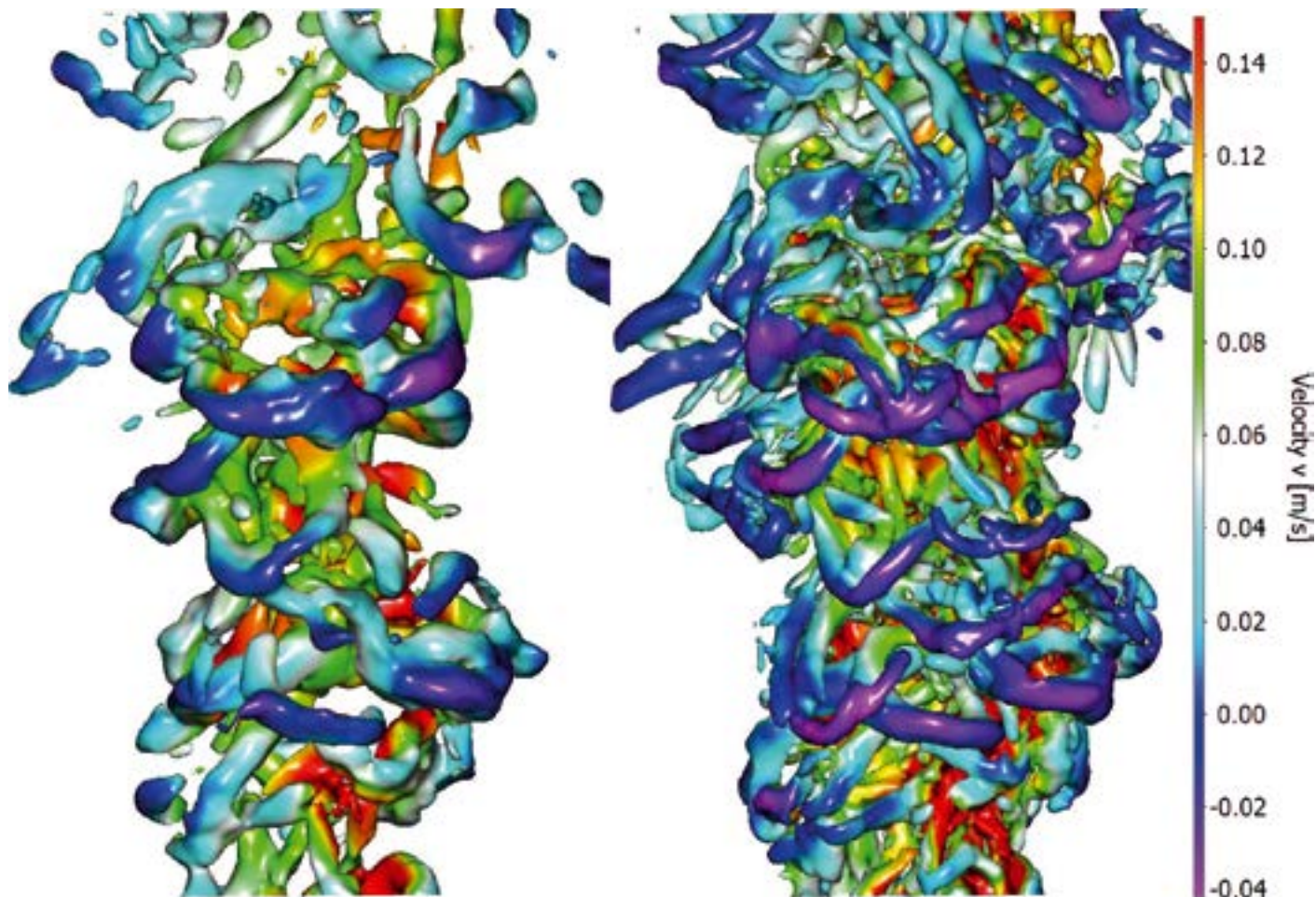


## 参考文献：

- [5] Kähler et al., „Main results of the 4th International PIV Challenge“, Exp. Fluids (2016) 57:97
- [6] Wieneke, „Iterative reconstruction of volumetric particle distribution“, Meas. Sci. Technol. (2013)
- [7] Jeon et al., „4D flow field reconstruction from particle tracks by VIC# with additional constraints and multigrid approximation“, ISFV 2018
- [8] van Oudheusden, „PIV-based pressure measurement“, Meas. Sc. Technol. (2013) 24

像素合并

精细尺度重构



分别用高斯像素合并(左)和精细尺度重构(右)将相同的抖盒子轨迹转换到规则网格  
对比结果显示了精细尺度重构方法在揭示流场细微特征方面的强大能力

显示的是旋涡强度等值面，其中 $\lambda_2 = -1.0 \text{ 1/s}^2$ ，由垂直速度分量进行颜色编码。数据来自于大视场热羽流实验<sup>[9]</sup>  
(记录数据由DLR友情提供)



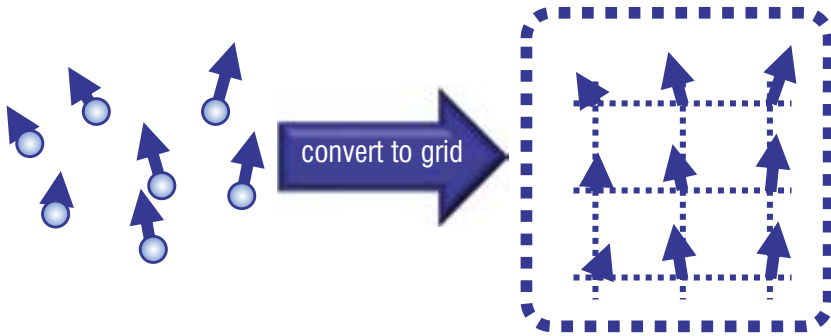
精细尺度重构是DaVis 10  
中的抖盒子分析的一个新  
特色功能

参考文献:

[9] Huhn et al., „Large-scale volumetric flow measurement in a pure thermal plume by dense tracking of helium-filled soap bubbles“, Exp. Fluids (2017) 58:116



## 将粒子轨迹转换到常规网格上的数据



利用流体动力学定律进行数据同化的精细尺度重构

Navier-Stokes方程:

$$\nabla p = -\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} + \mu \nabla^2 \mathbf{u}$$

涡量输运方程:

$$\frac{\partial \boldsymbol{\omega}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \boldsymbol{\omega} = (\boldsymbol{\omega} \cdot \nabla) \mathbf{u}$$

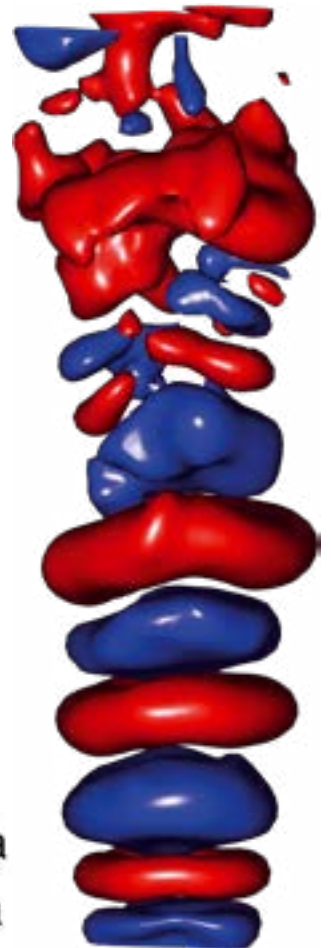
**抖盒子**分析的结果是粒子轨迹：粒子随时间变化的系列位置。多项式拟合给出速度和加速度数据。然而，通常情况下，规则网格上的数据更适用于可视化、诠释以及计算导出量，如涡度、压力、空间频率等等。

粒子轨迹转到规则网格的传统方法是像素合并。这时，网格点处的数据通过最近的相邻粒子数据的高斯平均或多项式回归计算出来。这两种方法在LaVision的DaVis软件中都可以实现。

多年来像素合并一直是最先进的方法。但LaVision致力并推动了更强大技术的开发和应用。现在的探索要用到物理规律原理和实验数据这两种形式的信息来源：数据同化显著提高了数据质量和空间分辨率（参见第4页的图）。测量的轨迹数据与流体动力学定律的结合孕育了LaVision的新的精细尺度重构算法。它以前所未有的质量和空间分辨率将**抖盒子**算法得到的粒子轨迹转换为网格上的流场数据。精细尺度重构利用了先进的“微单元中的旋涡”-Vortex In Cell (VIC#) <sup>[1]</sup>方法。此外，它甚至还首次实现了从**双脉冲抖盒子**数据进行瞬时压力计算，这在以前是需要时间分辨记录数据的。

## 精细尺度重构

- ▶ 将**抖盒子**数据转换为欧拉网格
- ▶ 提供前所未有的数据质量和空间分辨率
- ▶ 使用流体动力学定律（Navier-Stokes方程、涡量输运方程、不可压缩性限定）进行数据同化
- ▶ 计算压力以及速度和加速度
- ▶ 通过**双脉冲抖盒子**数据得到瞬时压力（见右边的图片）



■ -6.5 Pa  
■ 8.0 Pa

通过双脉冲抖盒子使用精细尺度重构得到压力参数(由代尔夫特大学友情提供)

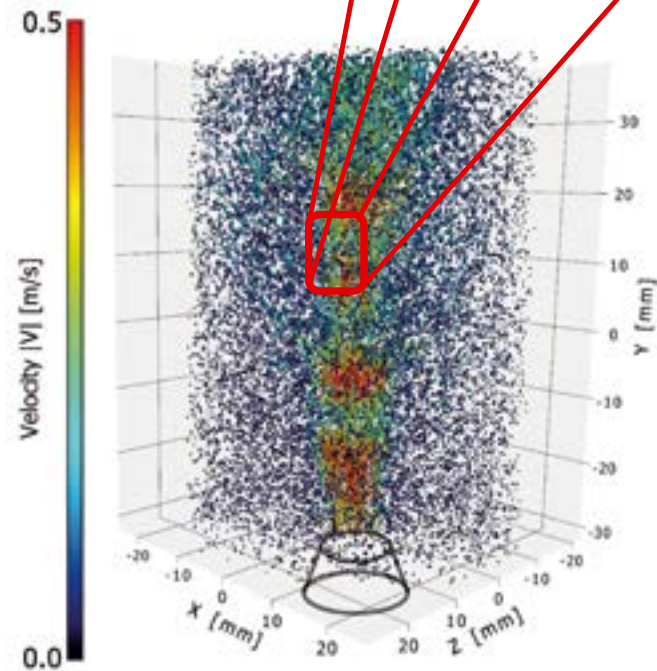


进行三维拉格朗日粒子追踪所选择的方法是**时间分辨抖盒子**<sup>[2]</sup>。在多个等距时间步长上跟踪单个粒子，给出速度和加速度参量。利用时间信息，时间分辨的抖盒子确保即使对加速度数据也具有极低噪声水平。

将数据转换到规则网格后，可以直接得到涡量、雷诺应力和旋涡强度等导出量。利用新的从PIV求压力软件包，还可以获得瞬时和平均压力场。

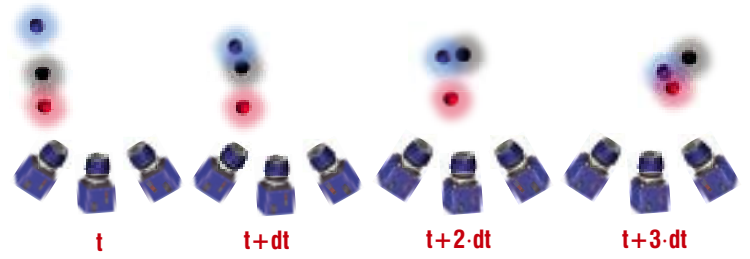


所需的硬件与时间分辨层析PIV-Tomo PIV相同，通常包括四台高重复频率相机和一台高重复率激光器。尽管如此，现在MiniShaker与LED Flashlight 300同轴照明光源相结合，在许多情况下是一种快速且易于使用的另外一种方案。

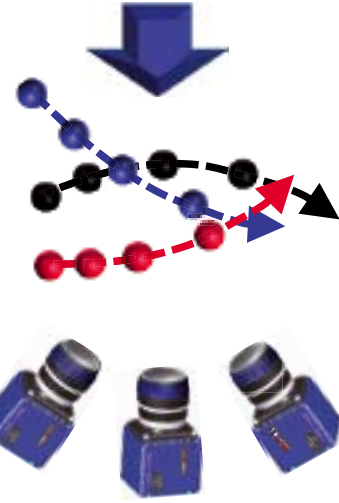


圆形喷嘴水射流的时间分辨抖盒子分析得到的15个时间步长的粒子轨迹，由代尔夫特大学D. Violato友情提供

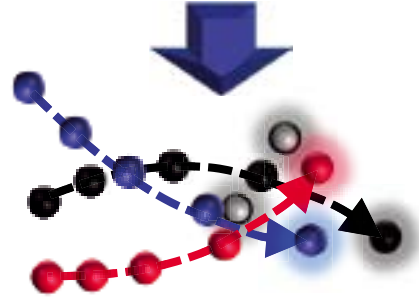
## 工作原理：时间分辨抖盒子



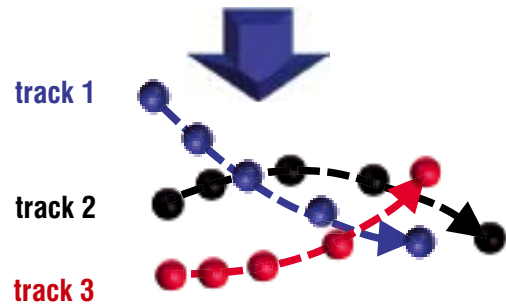
在时间分辨记录的每一帧粒子图像中对粒子进行三角法测量，并借助光学传递函数将这些时间相关（位置）“抖动”到位时<sup>[10]</sup>。



在多个时间步长上跟踪检测到的粒子，并预测粒子在下一个时间步长的位置。

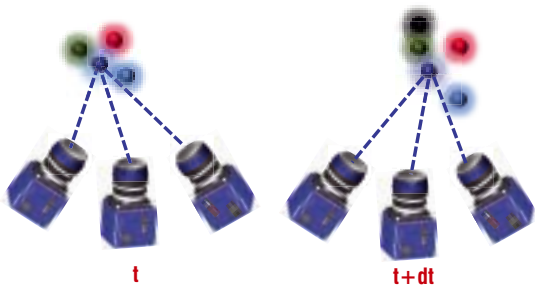


在预测区域中搜索下一个粒子位置并将粒子“抖动”到位。然后，移除已经检测到的粒子，在剩余图像上找到新进入感兴趣区域的粒子。

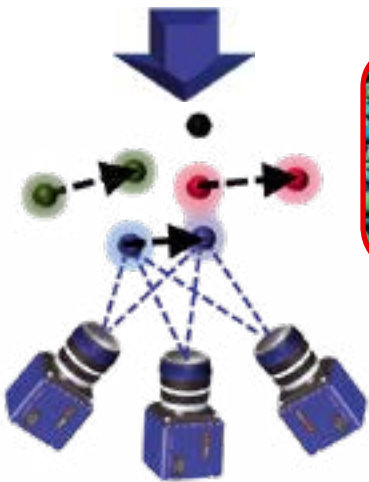


将在至少四个时间步长检测并跟踪的粒子添加到最终粒子流场中。

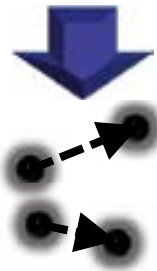
## 工作原理：双脉冲抖盒子



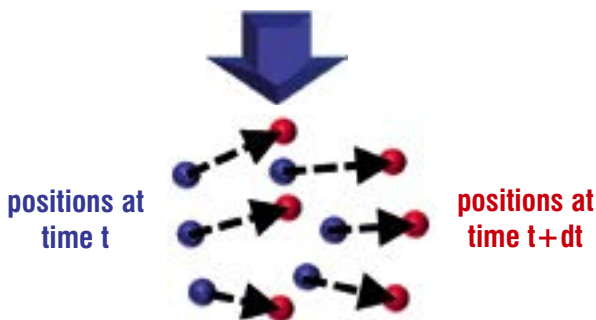
在双帧记录的每帧粒子图像中对粒子进行三角测量，并使用光学传递函数将其“抖动”到合适的位置<sup>[10]</sup>。



跟踪双帧图像中的所有匹配，并再次“抖动”所有在另一帧中具有匹配伙伴的粒子，使之就位<sup>[5]</sup>。



从相机图像中移除所有检测到的粒子的图像，以通过三角法测量找到先前隐藏的粒子。抖动并跟踪它们。在剩余的已经减去了检测到的粒子图像的相机图像上重复这些步骤。



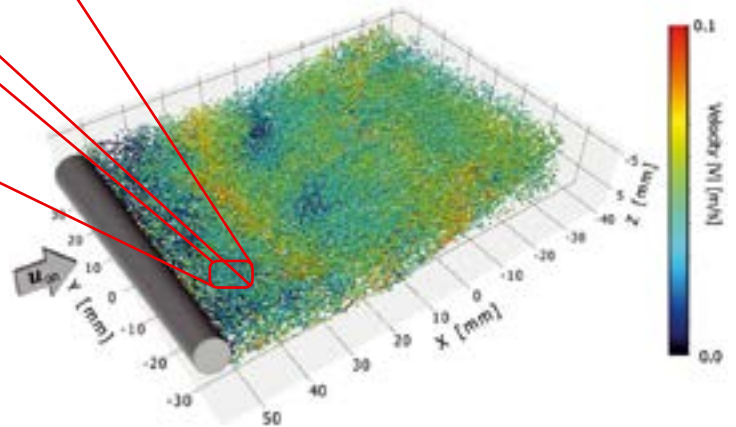
将在所有迭代中检测到并跟踪的所有粒子添加到最终粒子流场结果中。

抖盒子软件包现在扩展包含了双帧相机选项：**多脉冲抖盒子**<sup>[9]</sup>。此时，研究的主要对象为只能借助双脉冲激光的短脉冲间隔 ( $dt$ ) 和双帧相机的短的帧间隔时间来处理的高速流场。

常规的多脉冲选项为**双脉冲抖盒子**。此时，相机两帧中分别被照亮一次，显示出两个时间步长的轨迹。

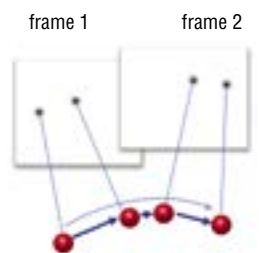
瞬时速度结果可直接从**双脉冲抖盒子**的轨迹数据中获得。使用精细尺度重构计算瞬时加速度和压力。

基于网格的时间平均测量结果可以通过高斯加权和多项式回归<sup>[11]</sup>轻松获取，包括导出的量，如涡量和涡旋强度。利用由PIV求压力软件模块，只需点击几下鼠标即可计算出平均压力场。



圆柱尾流实验双帧粒子图像的抖盒子结果，由F. Scarano, 代尔夫特大学友情提供。

此外，现在DaVis软件平台中也可以加载**4脉冲抖盒子**<sup>[4]</sup>功能。此时，每帧图像被照亮两次。粒子在第一帧中的两个位置与同一粒子在第二帧中的两个位置相匹配。结果是每个粒子包含四个位置的多脉冲轨迹，从而提高了速度精度并可直接获得瞬时加速度信息。



采用四脉冲的多脉冲抖盒子原理

**四脉冲抖盒子**需要与双脉冲版本相同的硬件外加第二台双脉冲激光器。所有脉冲的定时和同步以及相机曝光都由LaVision的可编程时间控制单元通过DaVis方便地控制。

参考文献：

- [10] Schanz et al. „Non-uniform optical transfer functions in particle imaging: calibration and application to tomographic reconstruction” Meas. Sci. Technol. 24 (2013) 024009
- [11] Jiménez et al., „On the performance of particle tracking”, J. Fluid Mech. (1987) 185:447-468



## 模块化和可升级的抖盒子解决方案

LaVision可为您的应用提供一系列完整、灵活和模块化的**抖盒子**系统和组件，为您提供一套集成的“易于使用”的解决方案。系统的模块化保证了所有LaVision的PIV、三维PIV和层析PIV系统都可以直接升级到抖盒子系统。



## 从流体照明到体视流场数据

### 激光器

- ▶ 常规激光器：与传统PIV系统中使用的相同
- ▶ 低重频：测量体积更大，示踪颗粒更小
- ▶ 高重频：时间分辨四维流场成像



### 激光器的体照明光学器件

- ▶ 准直照明高达 $50 \times 100 \text{ mm}^2$
- ▶ 可调节发散角，用于更大测量体积
- ▶ 多程光路设计实现更高照明光强



### LED照明

- ▶ 体照明光源用于水应用和充氮肥皂泡作为示踪粒子的场合
- ▶ 最高20 kHz照明频率
- ▶ 高功率超驱动模式
- ▶ 无需激光安全要求
- ▶ 白光和蓝光两种模式可选



### 相机

- ▶ 支持全部LaVision PIV相机型号
- ▶ Imager sCMOS适用于需要高分辨率和极高灵敏度的场合
- ▶ 支持搭建2至8台相机的成像系统
- ▶ 扩展的DaVis 10应用范围：双帧相机和双脉冲激光器构成的系统也可进行**抖盒子**分析
- ▶ MiniShaker相机系列针对**抖盒子**测量进行了优化：易于使用，多种型号确保涵盖广泛的应用





### FlowMaster抖盒子主要性能特点:

- ▶ 先进的迭代粒子重构和体自标定技术造就了可以提供极高空间分辨率的3D成像系统
- ▶ 适用于低速和高速流体测量以及4D流体分析的时间分辨记录
- ▶ 可升级和多功能的多相机成像理念

### 用于倾斜观察的相机立体支架适配器

- ▶ 对立体支架角度和光轴进行单独调整
- ▶ 电动和软件控制型号
- ▶ 刚性结构，支持亚像素成像，稳定性好



### 3D标定靶盘

- ▶ 高精度的2X2平面靶盘
- ▶ 单次成像标定，无需移动扫描标定靶盘
- ▶ 两侧均可校准
- ▶ 在一个位置即可以进行体视标定



### 同步和时序控制

- ▶ 多通道可编程时间控制单元(PTU X)
- ▶ 支持低速和高速激光器和多台相机的多种灵活组合
- ▶ 即使对于变化的外部触发信号，也可以精确同步
- ▶ 专为复杂触发机制的苛刻实验条件而设计
- ▶ 在DaVis中完全集成设备触发信号生成
- ▶ 由软件控制PIV-dt和相位扫描



### DaVis抖盒子软件包

- ▶ 获奖的极高质量的抖盒子粒子跟踪
- ▶ 时间分辨、双脉冲和四脉冲选项
- ▶ 采用专利的立体自标定技术，最大程度降低标定误差
- ▶ 大规模并行处理：支持多PC处理器
- ▶ 精细尺度重构（转换到网格），可实现卓越的精度和空间分辨率
- ▶ 强大的后期处理和3D显示功能，包括AVI格式视频生成
- ▶ 可基于通用DaVis FlowMaster PIV软件包升级
- ▶ 支持Matlab®和TecPlot®附加组件，用于定制分析和出色的3D可视化
- ▶ 通过抖盒子数据计算压力场（可选）



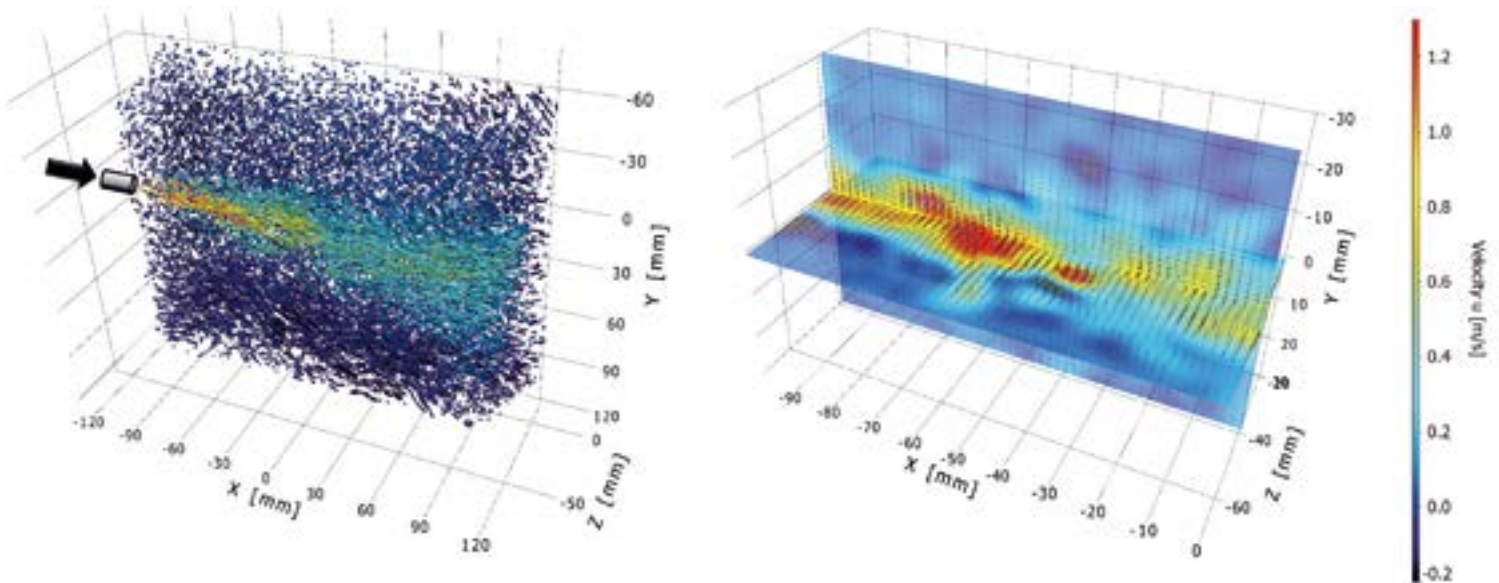


## MiniShaker和LED照明单元

MiniShaker专为**时间分辨抖盒子**测量设计，测量速度最高达5 m/s，**双帧抖盒子**测量速度高达50 m/s。与具有分立相机的系统相比，大大缩短了搭建设置所需花费的时间。

结合LED-Flashlight 300型大功率LED照明光源，可以很容易地以500 Hz的频率对500 x 300 x 1500mm<sup>3</sup>及以上的流场进行时间分辨测量。由于不涉及激光安全，它不仅是一套高效易用的科研测量系统，也可以便捷地用于教学和演示目的。

MiniShaker为流场的三维测量开拓了简便易行的途径。四个传感器预调对准安装在一个紧凑的外壳中，并完全集成到LaVision的DaVis软件中。



使用MiniShaker TR和LED-Flashlight 300测量鱼缸中的水射流：

左侧：截止到喷射位置超过 $\pm 10$ 个时间步长的粒子轨迹，

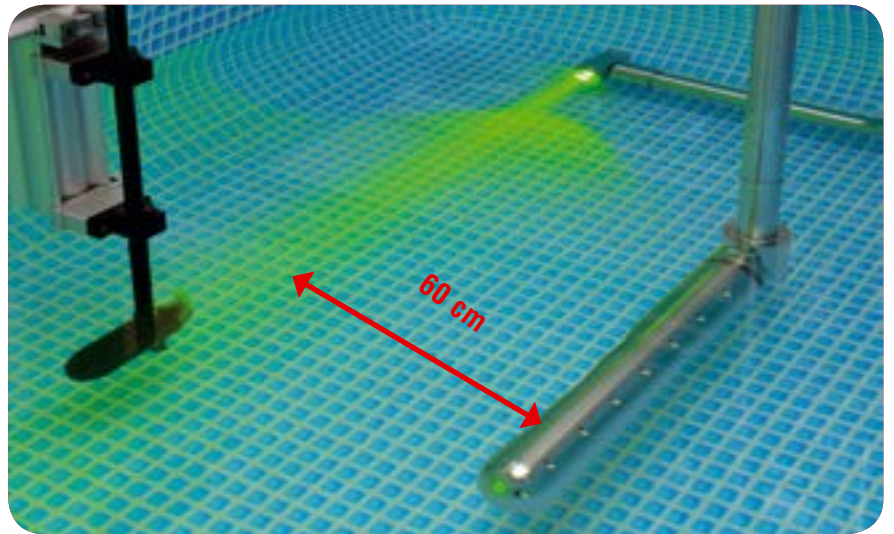
右侧：分辨率1毫米的瞬态流场数据。



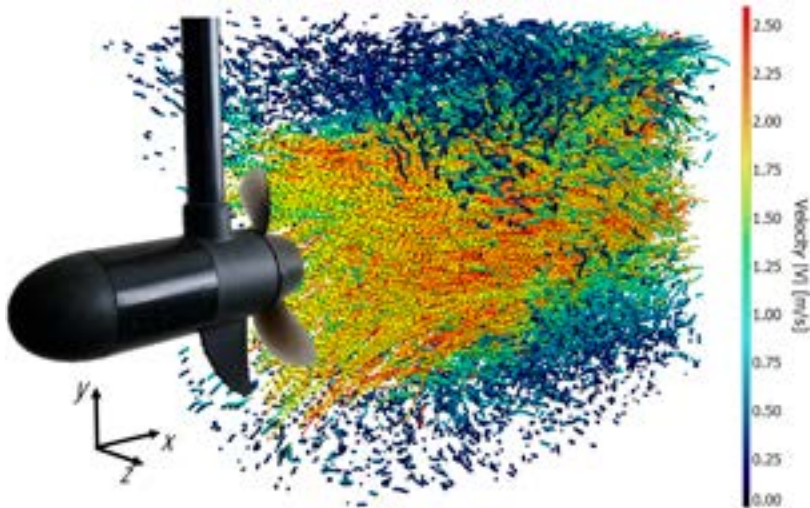
MiniShaker TR



LED-Flashlight 300

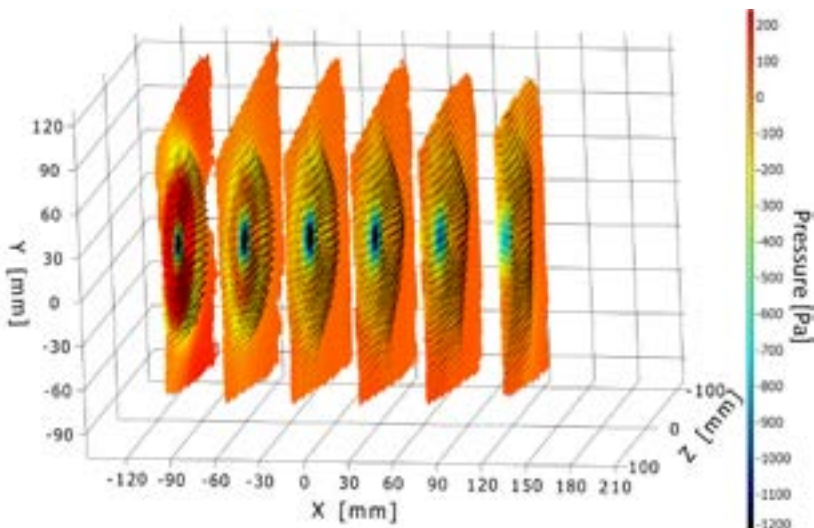


水下四相机系统MiniShaker测量螺旋桨尾流。



### 水下抖盒子

完全模块化系统设计，为在拖曳水池或空化水洞中等水下场合应用的抖盒子系统具有多种配置选项。可以使用带遥控相机镜头和三维立体坐标架适配器的模块，也可以使用具有固定工作距离和免维护光学元件的水下MiniShaker。获益于体积自标定技术，即使在这些振动强烈的环境中也能获得可靠的测量结果。



超过15个时间步长的粒子轨迹（左上图）  
螺旋桨后部流场的瞬态压力数据（左下图）



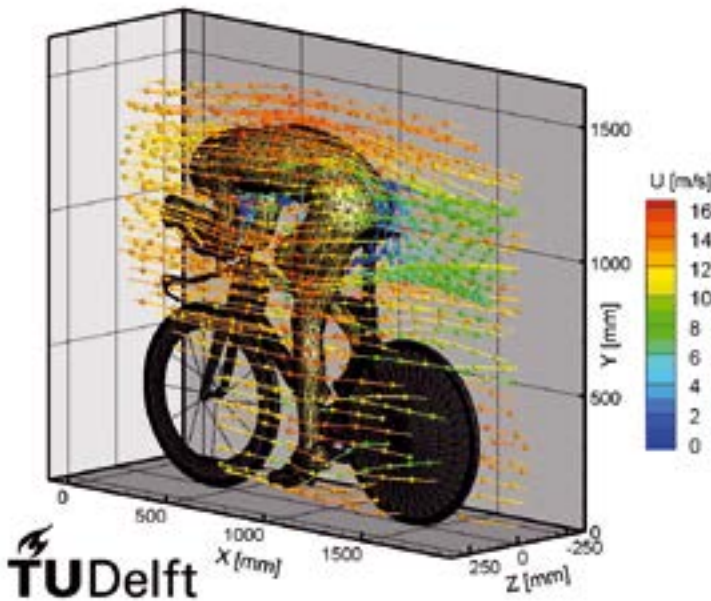
## MiniShaker Aero机械臂

MiniShaker Aero具有空气动力学优化设计的外形，配合灵活的机械臂与LaVision的体积自标定和抖盒子软件相结合，不仅易于安装和校准，还可以在短时间内测量记录大型实验对象周围的全尺寸流场。

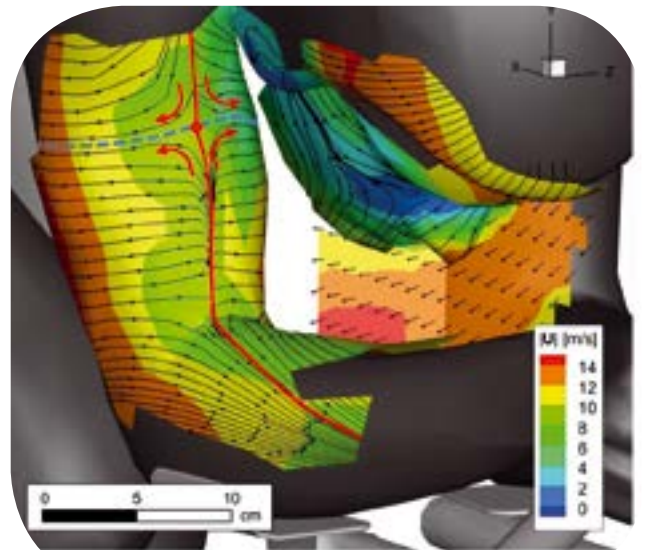
MiniShaker Aero的牢固外壳内装有4台相机，一次标定即可足够满足多个位置的测量需要。在自动机械臂定位的每个位置采集集体视数据，然后将这些位置的数据拼接起来组合得到单个大尺度流场。激光光纤导引同轴照明光束出口位于MiniShaker探头的中间位置，这样，即便对有遮挡的闭塞区也能测量。



安装在机械臂上的紧凑抖盒子测试系统  
MiniShaker Aero型



用抖盒子测量得到的围绕自行车骑手假人模型流场的流线。荷兰代尔夫特大学友情提供<sup>[12]</sup>



近肘部表面流线<sup>[13]</sup>



### 参考文献：

- [12] Jux et al., „Robotic volumetric PIV of a full-scale cyclist“, Exp. Fluids (2018) 59:74
- [13] Schneiders et al., „Coaxial volumetric velocimetry“, Meas. Sci. Technol. (2019)



## 充氮肥皂泡做示踪粒子实现大尺度测量

和普通的在空气流场中添加 $1\mu\text{m}$ 粒径油滴示踪粒子相比，充氮肥皂泡（HFSB）作为示踪粒子，散射光强提高了超过10000倍<sup>[14]</sup>。采用这种示踪粒子，可以在超过1立方米的体积内进行**时间分辨**或**多脉冲抖动盒子**以及层析PIV测量。

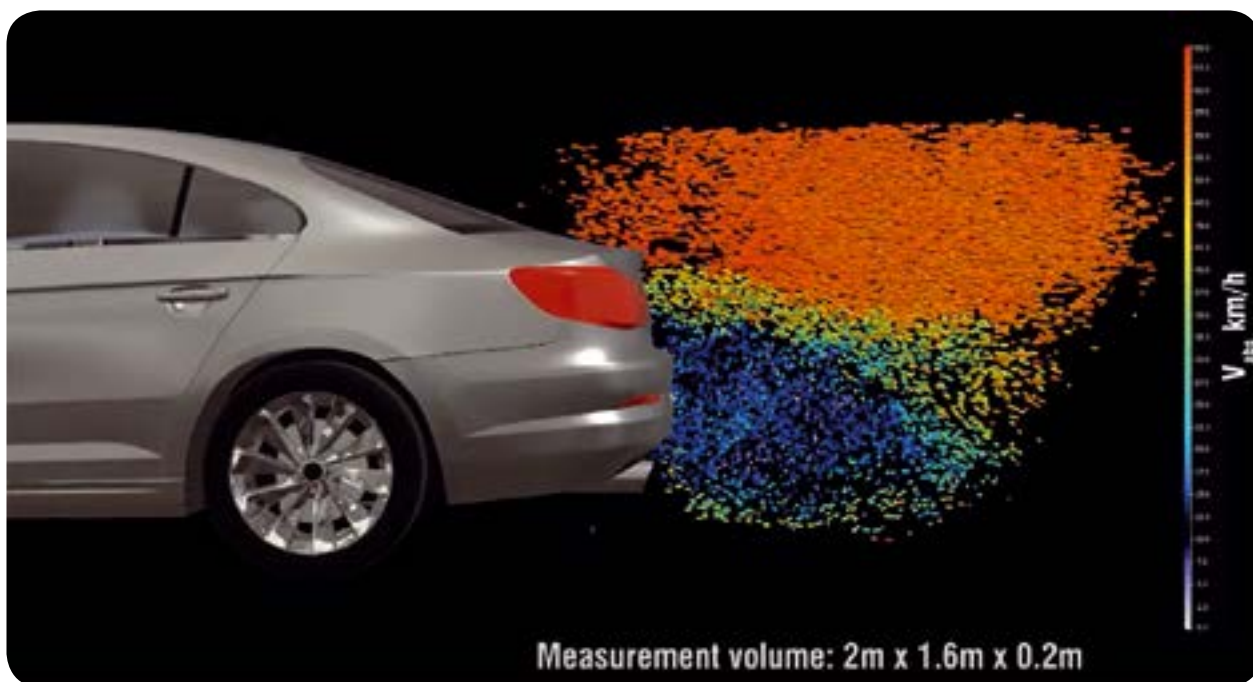
- ▶ 典型配置4台高速相机
- ▶ 适用于大尺度视场和大纵深体积
- ▶ 粒子发生器供液组件带有遥控功能



带有遥控功能的供液组件



空气动力学性能优化的充氮肥皂泡（HFSB）直线型喷嘴阵列



全尺寸大众轿车尾流场测量（VW友情提供）



参考文献：

[14] Caridi, PhD Thesis, TU Delft (2018)



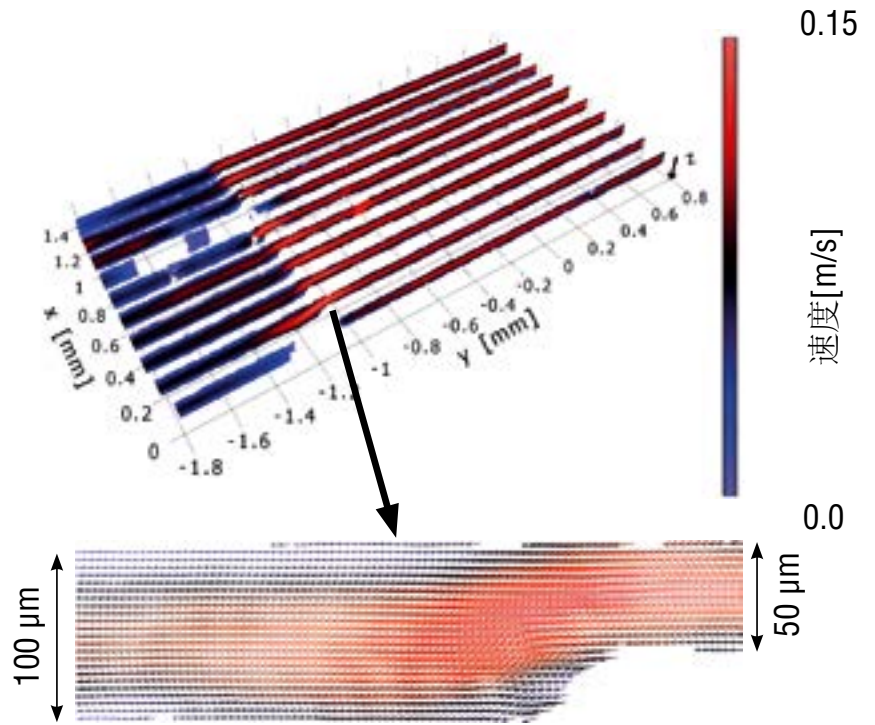
## 抖盒子：微观尺度的体视测量

抖盒子在三维显微测量方面具有独特的优势。尤其对于通常存在于微通道中的具有强剪切应力的流体，抖盒子方法通过跟踪单个颗粒可以确保最佳测量质量<sup>[15]</sup>。

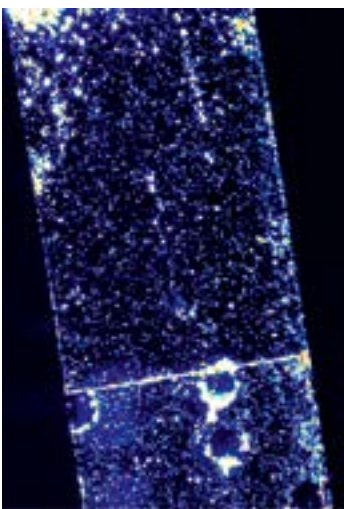
- ▶ 显微镜配备XYZ三维电动位移平台
- ▶ 搭建简便，测量位置可重复性高
- ▶ 照明光通过光纤传导到显微镜
- ▶ 滤光片易于更换



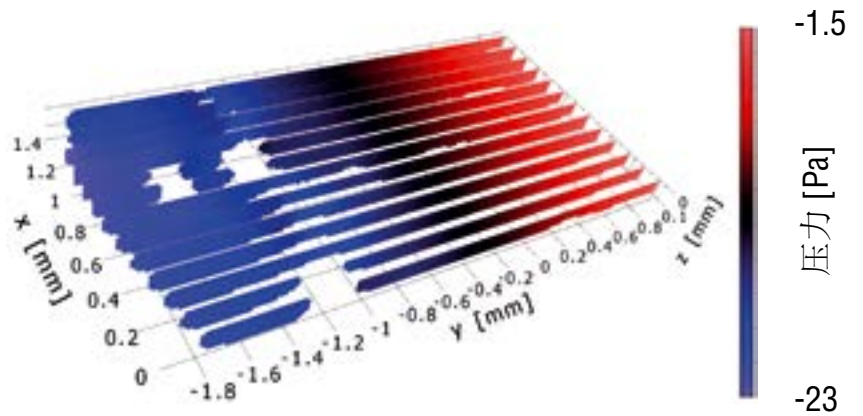
显微抖盒子系统搭建



后向台阶：转换至网格的抖盒子测量结果



粒子图像：后向台阶，在通道中有三个大的主要的气泡和无数个小气泡



平均压力场

参考文献：

[15] Hesseling et al., „Volumetric Microscopic Flow Measurement with a Stereoscopic Micro-PIV System“, ISPIV 2019

## 用于三维重构的高精度相机标定

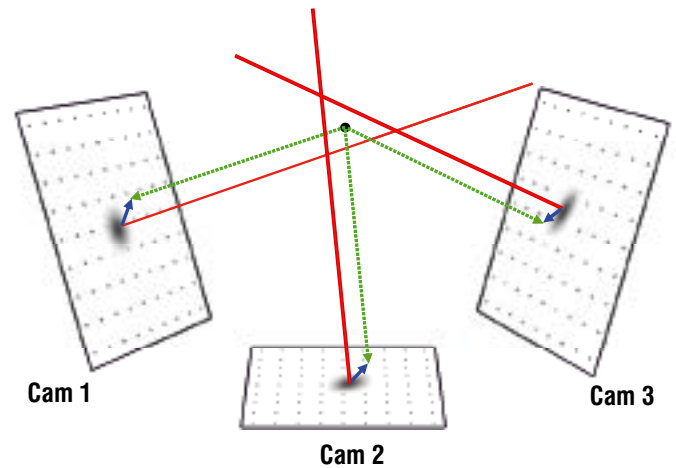
三维粒子跟踪和层析成像应用需要精确体积标定。对于**抖盒子**和层析PIV，整个测量体积区域的标定精度需要优于0.1个像素<sup>[2,5]</sup>。

### 挑战

相机支架或其他机械部件无法做到100%稳固。温度变化会导致机械部件的伸缩，风荷载或其他振动源会影响相机的调整设置（焦距、对焦等参数）。在许多实验中，最初的体积标定在进行实际测量时会变得不再精确，这一点经常会被忽视。

### 解决办法

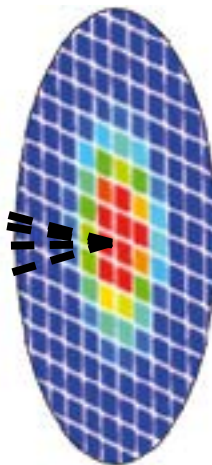
LaVision专利的<sup>[16]</sup>体积自标定<sup>[17]</sup>技术，可以通过示踪粒子本身的图像记录来检测和校正标定误差。最终校正失调引起的误差并达到所需的校准精度。



## 体视自标定

由于标定函数的不精确，被测体积中的示踪粒子在相机中的成像位置会有少许的偏移。对局部子体积中多个粒子的这些差异进行平均，生成三维偏移矢量图，并相应地修正标定函数。

这种被广泛认可的体积自标定过程为可能的校准问题提供了检查和补救措施，是**抖盒子**和层析PIV必不可少的预处理环节。



参考文献：

[16] Patents: EP 1 926 049, US 8,120,755

[17] Wieneke, „Volume self-calibration for 3D particle image velocimetry“, Exp. Fluids (2008) 45:549

# 体空间流动分析技术

粒子图像	处理过程 1	处理过程 2	处理过程 3	结果	速度	速率	加速度	瞬态压力
时间分辨	层析-PIV (SMTE)			网格	✓	✓	✗	✗
时间分辨	抖盒子			轨迹	✓	✗	✓	✗
时间分辨	层析-PIV (SMTE)	由PIV求压力场		网格	✓	✓	✓	✓
时间分辨	抖盒子	像素合并		网格	✓	✓	✓	✗
时间分辨	抖盒子	像素合并	由PIV求压力值	网格	✓	✓	✓	✓
时间分辨	抖盒子	精细尺度重构VIC#		网格	✓	✓	✓	✓
双脉冲	层析-PIV (MTE)			网格	✓	✓	✗	✗
双/四脉冲	抖盒子			轨迹	✓ / ✓	✗ / ✗	✗ / ✓	✗ / ✗
双/四脉冲	抖盒子	像素合并		网格	✓ / ✓	✓ / ✓	✗ / ✓	✗ / ✗
双/四脉冲	抖盒子	精细尺度重构VIC#		网格	✓ / ✓	✓ / ✓	✓ / ✓	✓ / ✓

LaVision一直致力于为各行提供有关流体测试的高端、有效的灵活解决方案，并提供用户研讨会、短期专业培训。

## 北京欧兰科技发展有限公司

北京市海淀区上地十街1号  
 辉煌国际中心1号楼1006室  
 电邮: info@oplanchina.com  
 www.oplanchina.com www.dpiv.cn  
 电话: +86-10-62623871, 62616041, 62621809  
 传真: +86-10-59713638

## LaVision GmbH

Anna-Vandenhoeck-Ring 19  
 D-37081 Göttingen / Germany  
 E-Mail: info@lavisoin.com  
 www.lavisoin.com  
 Tel.: +49-(0)5 51-9004-0  
 Fax: +49-(0)551-9004-100

## 北京欧兰科技发展有限公司郑州办事处

郑州市二七区政通路66号  
 升龙国际B区5号楼一单元1910室  
 电邮: info@oplanchina.com  
 www.oplanchina.com www.dpiv.cn  
 电话: +86-371-86585661  
 传真: +86-10-80115555 (ext: 556992)