

层析粒子成像测速 (Tomo-PIV)

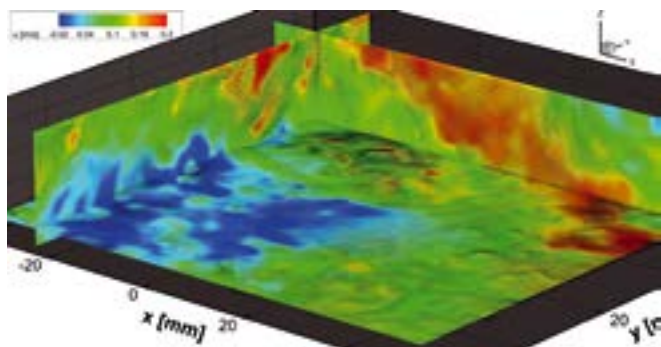
体视流场成像

-定量流动显示的终极解决方案

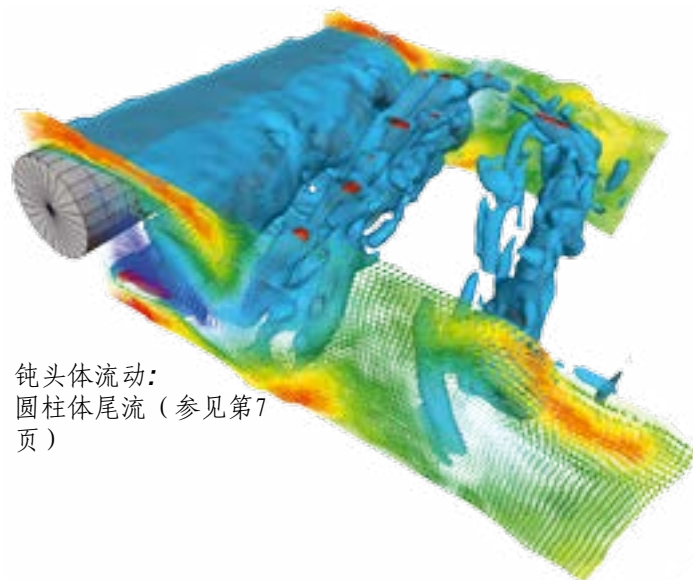


LAVISION

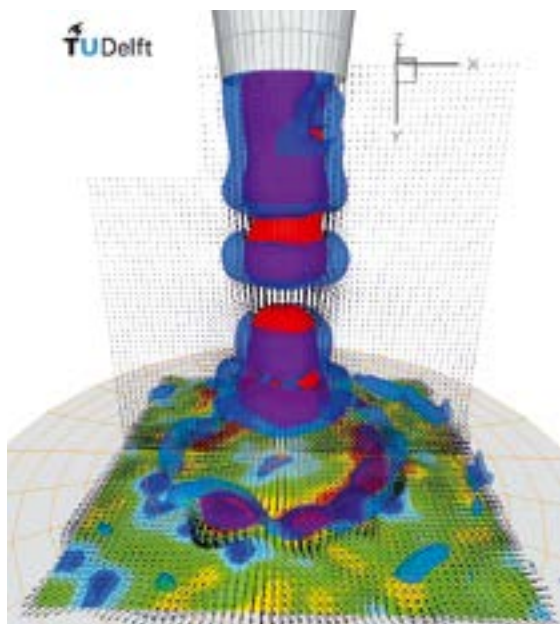
WE COUNT ON PHOTONS



3维空间的3速度分量粒子成像测速结果: 3D3C PIV, D. Schanz, DLR 友情提供



钝头体流动:
圆柱体尾流 (参见第7页)

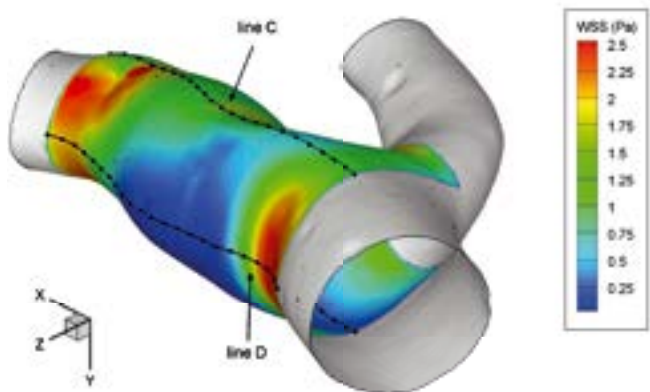


时间分辨层析PIV (TR-Tomo-PIV): 冲击射流 [2]

灵活适用高度自动化的体视流动测量解决方案

湍流本质上具有三维 (3D) 立体结构属性。普通的二维 (2D) 包括采用激光照明的成像测量无法在所有三个空间维度上分辨湍流的结构。而利用多视角成像信息, 采用层析重构技术则可以在三个空间维度上同时捕捉记录复杂流动的瞬态结构。应用针对体像素的三维 (3D) 相关处理技术, 可以由时间相关的体成像数据计算出瞬态三维空间的流场 [1, TU-Delft]。

LaVision功能强大的, 基于层析粒子成像测速 (Tomo-PIV) 和层析粒子跟踪测速 (Tomo-PTV) 技术的**FlowMaster**激光成像系统, 能够以极高的空间分辨率记录强湍流, 火焰以及喷雾对象的瞬态体视流场。



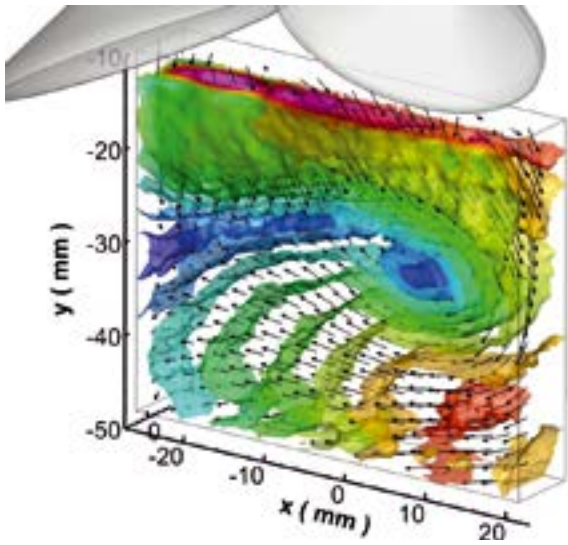
生物流体: 颈动脉剪切应力 (参见第19页)



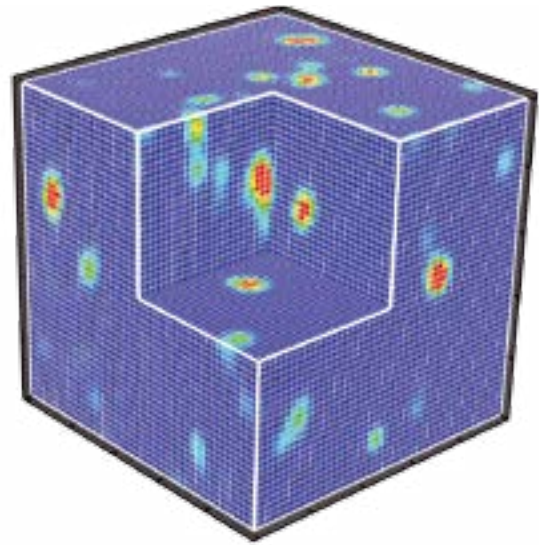
3D火焰成像 (参见第14页)

参考文献:

- [1] Scarano, Meas. Sci. Technol. 24, 2013
- [2] Violato et al., Proc. ASME Engineering Conf. 滨松, 日本, 2011



发动机气缸内体视(3D3C)流场 (参见第17页)



3D重构: 3D空间的体像素 (参见第4页)

由于采用独具特色的模块化概念, 我们的**FlowMaster** 立体PIV (Stereo-PIV) 系统能够直接升级到3D层析成像应用系统。不仅如此, 我们的高速**FlowMaster**层析PIV系统更实现了在3D空间的时间分辨流场成像, 揭示了动态变化流动完备的4维信息 (3维空间加一维时间) !

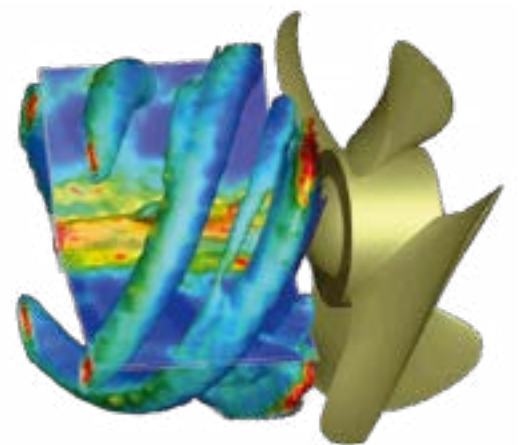
LaVision的**FlowMaster**层析PIV系统在湍流研究, 动物运动以及火焰和喷雾的三维成像等领域得到成功应用。这是其杰出性能的最好证明。这一出色的性能源于采用了例如MART重构, 直接相关处理和体积自标定等最新技术。



液体喷射的3D流场 (参见第7页)

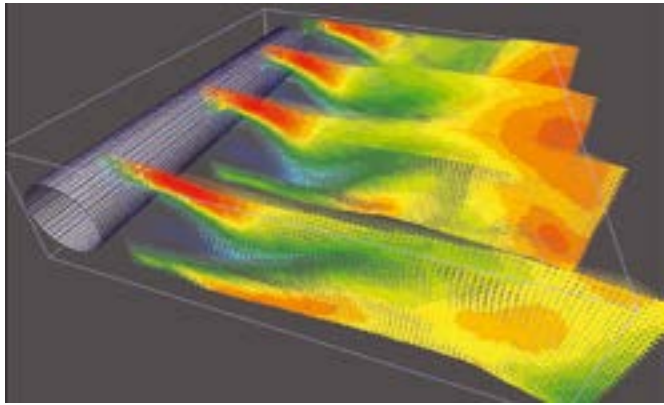


昆虫飞行 (参见第10页)



螺旋桨推进器产生的3D流场 (参见第16页)

*专利: EP1517150, US7, 382, 900, JP 4239175

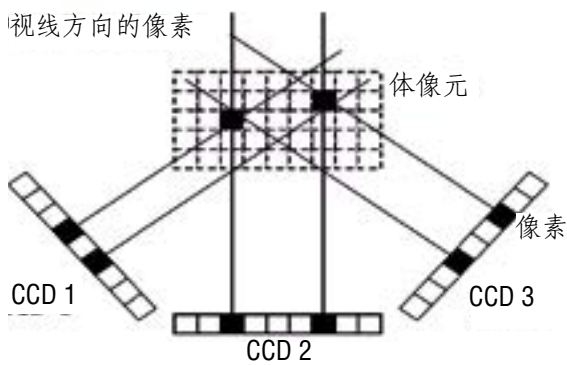


层析重构和体像素强度函数的3D互相关处理

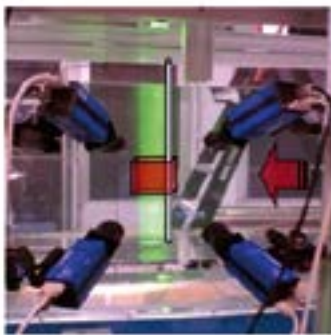
高功率脉冲光源照亮待测体积空间内的示踪粒子，其散射光图像通常由高分辨率相机从4个视角方向同时记录下来。^①

采用层析重构算法（乘法代数重构技术，MART）计算每一个体像元上的3D光强分布来重构3D粒子分布。^②

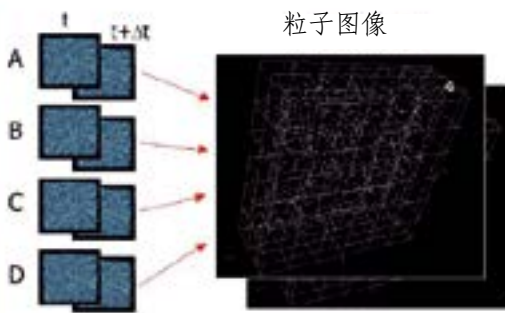
采用先进的多重网格迭代的可变形询问体方法，对重构得到的一对相隔短的时间间隔 Δt 曝光的粒子分布，对选定的询问体进行3D互相关处理求得粒子位移量。^③



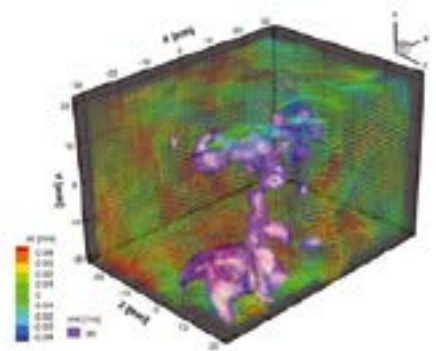
MART 重构算法



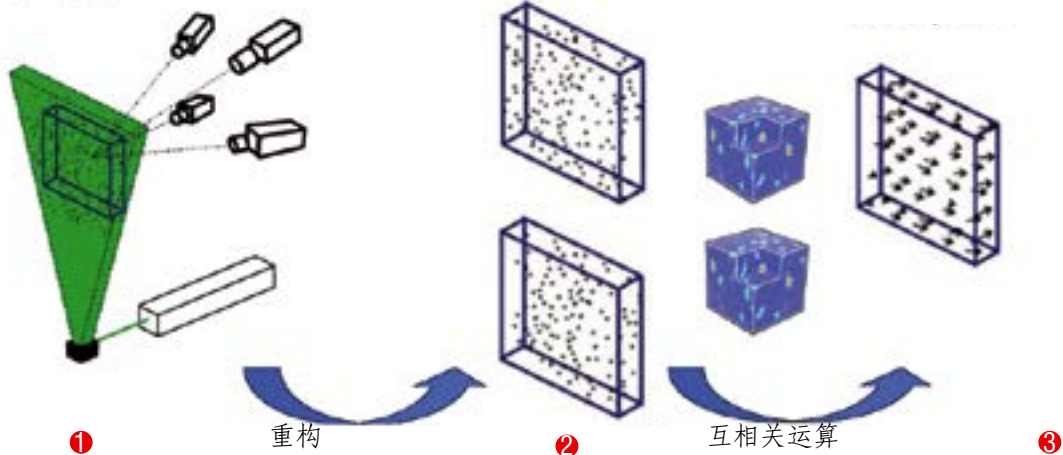
采集透视图



成像体积



速度场的位移量





应用于3D重构的高精度相机标定

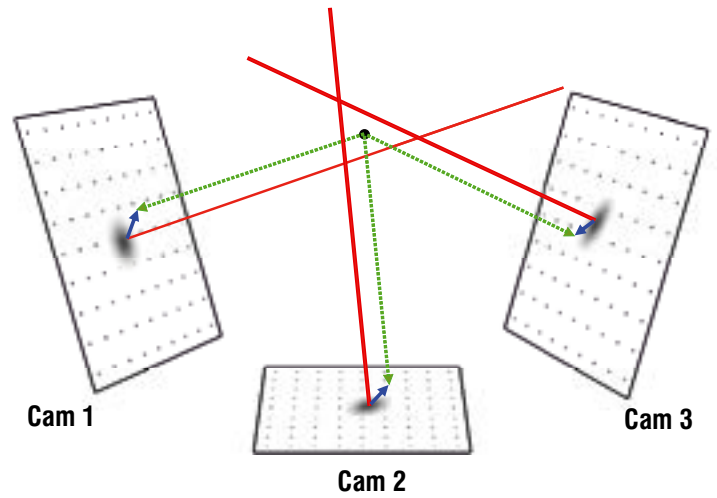
所有层析成像应用都需要进行一种基于标定靶盘的高精度的体积标定。对于层析PIV，标定精度需要在全部测量体积内达到优于0.1个像素的水平[1, 代尔夫特工业大学]。

挑战

相机支架及其它机械部件永远不会达到100%的理想刚性。温度变化会导致机械部件的膨胀或收缩，风载荷或其它振动源会影响相机的调整。尽管可能注意不到，但在大多数实验条件下，初始的体积标定，将在实验测量的时候变得不再精确。

解决途径

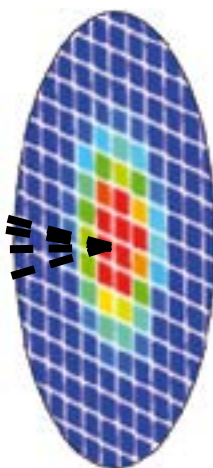
LaVision的专利* 的体积自标定[2, LaVision]技术，可以利用真实实验测量所记录的粒子图像，实现对初始的采用标定靶盘进行标定所带来的误差进行检测和修正。可以校正光路失调并获所需要的标定精度。



体积自标定

由于采用机械靶盘的初始标定函数具有误差，体空间内的粒子在反演映射到相机成像平面的时候会有少许偏离。把在一个局域亚体积元内多个粒子的偏差取平均值，并将所有亚体积元求得的平均值组合起来，就能生成一个3D偏差矢量图，根据这个偏移矢量图就能够对标定函数进行相应的修正。

这种有效的体积自标定过程提供了对标定问题的检测和修正是层析PIV系统中不可或缺的前期处理步骤。



参考文献:

- [1] Elsinga et al., Exp. Fluids 41, 933-947, 2006
- [2] Wieneke, Exp. Fluids 45, 549-556, 2008

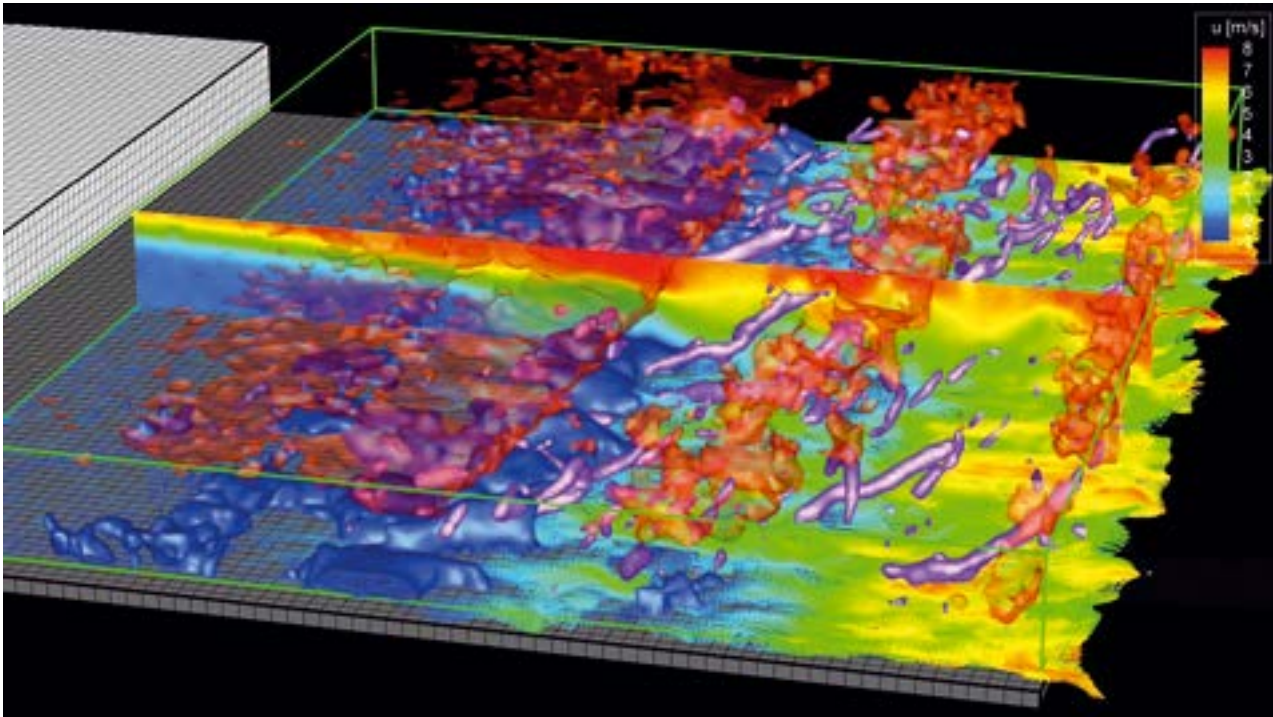
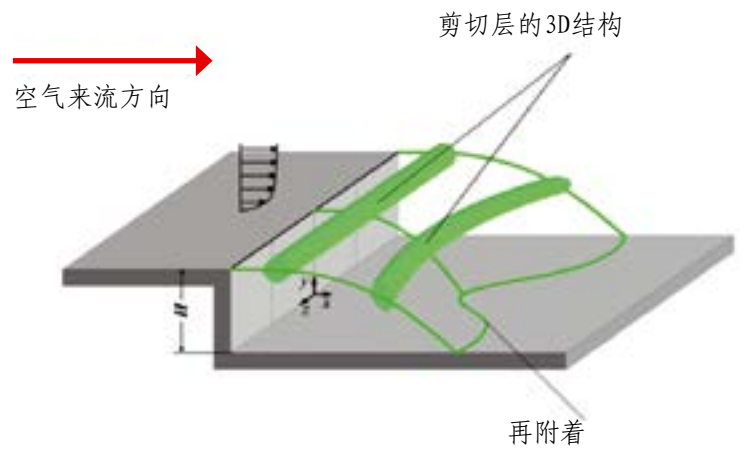
* 专利: EP 1 926 049, US 8,120,755



湍流是几乎所有自然流动现象和技术应用中的流动现象的主要形态。现在可以借助（时间分辨）层析PIV系统为工具，对这种复杂流动的细节进行定量的3D（4D）可视化研究并用于对CFD运算的有效性评估。层析PIV技术的应用，使实验流体力学对流体动力学现象的研究进入到前所未有的深度。这是实验流体力学观测技术手段具有标志性的重大进步。

分离流动和湍动尾流

一套高分辨层析PIV系统，采用了4台16Mpixel ImagerLX型相机，记录风洞中后向台阶对象产生的分离流动和湍动剪切层。采用3D涡量场的等涡面，和一个选定的垂直速度平面，来显示瞬态3D速度矢量构成的，包含了复杂流动结构的，完备的，速度梯度张量的体视流场 [1, 德国宇航中心, DLR]。



空气中后向台阶流场的层析PIV测量

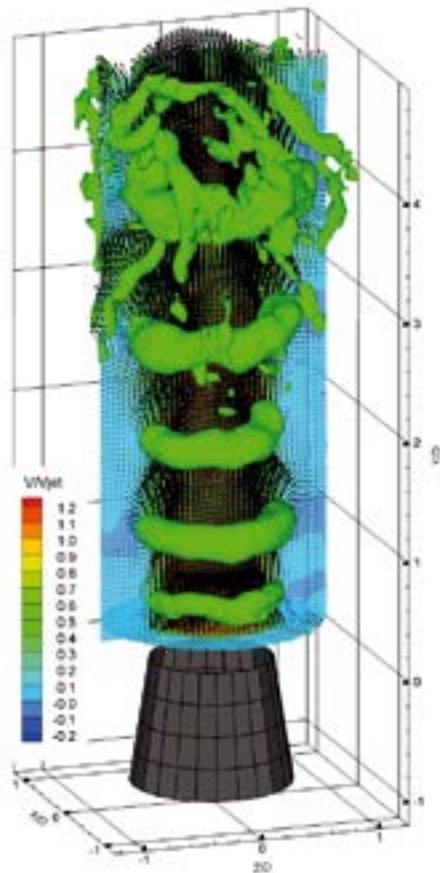
参考文献:

[1] Schroeder et al., 9th Int. Symp. PIV 神户, 日本, 2011



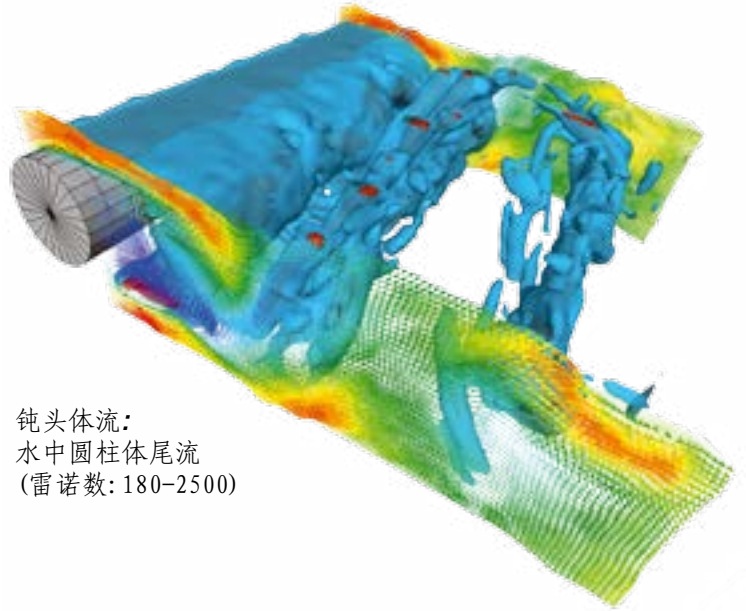
转换和湍动射流

用时间分辨层析PIV测试系统，以1kHz帧频记录了转换水射流流动的三维图样。展示了三维测量空间中，采用Q-判据生成的等涡面和轴向平面的速度场[2，荷兰代尔夫特工业大学]。



圆柱体尾流的涡动力学研究。

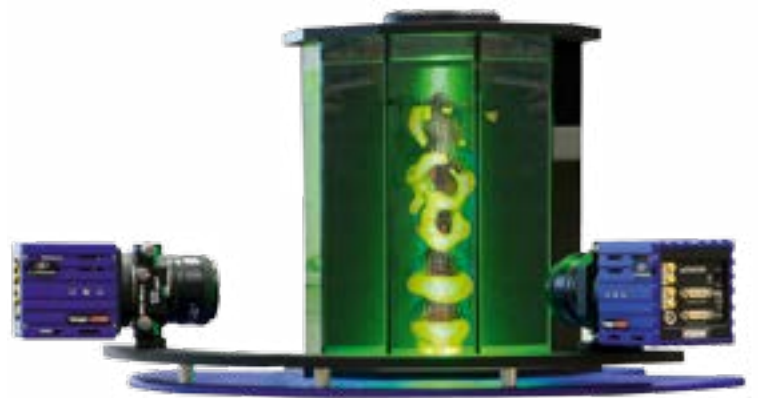
层析PIV揭示了圆柱体湍动尾流相干结构的细节。应用时间分辨测量还能够描述速度和涡量场的起伏[1，TU-Delft]。



钝头体流：
水中圆柱体尾流
(雷诺数: 180-2500)

2相机层析PIV

对于时间分辨记录，应用新的运动增强（MTE）重构算法，仅采用减少到两台相机的装置就可以进行层析PIV测量。这一方法使得能够直接从立体PIV（2D3C）升级到全体视测量的层析PIV（3D3C）。

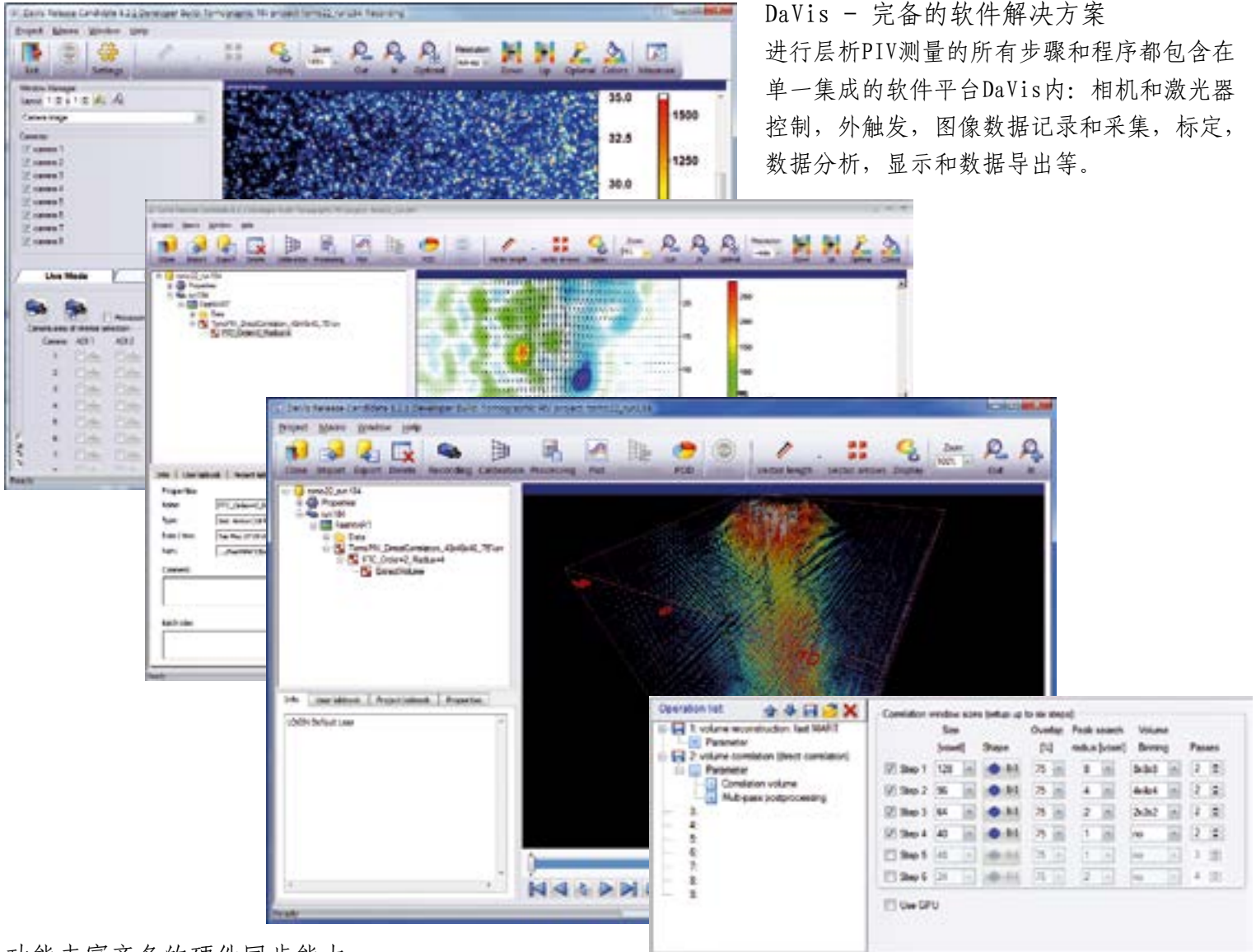


2相机层析PIV实验装置

参考文献：

[1] Scarano et al., Exp. Fluids 47, 69-83, 2009

[2] Scarano et al., 15th Int. Symp. Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 2010



DaVis - 完备的软件解决方案

进行层析PIV测量的所有步骤和程序都包含在单一集成的软件平台DaVis内：相机和激光器控制，外触发，图像数据记录和采集，标定，数据分析，显示和数据导出等。

功能丰富齐备的硬件同步能力

DaVis软件平台可以完全同步控制多达8台PIV相机和4台激光器。从简单的基于时间域的触发机制到相位锁定测量和时间分辨记录。

图像和三维矢量的后处理

采用真正的64位架构，DaVis软件平台可以高效地利用多核CPU处理大体积的数据。采用GPU则可更加显著地加速处理速度。您可以利用系统提供的丰富，齐全，完备的矢量统计，导出量和标量操作库自行建立专属于您自己的个性化处理进程列表和操作步骤组合。

开放的数据存取

DaVis提供和Matlab®（包括MacOS®和Linux®平台），Tecplot®数据接口。还提供C++ 库，用于您的个性化编程和二次开发。

数据管理和溯源能力

系统内置处理历史记录功能。您能够重现记录参数和更早的处理步骤并据此追踪回溯数据的“历史”。项目管理器把所有相机拍摄的图像，标定和处理结果按照逻辑结构组织，便于操作者清晰高效地管理数据。

层析PIV
专利生效

首篇
文章

MART
FFT 相关

体积自标定

运动追踪
增强

快速MART
快速直接相关

2003

2006

2007

2008

2009

2011



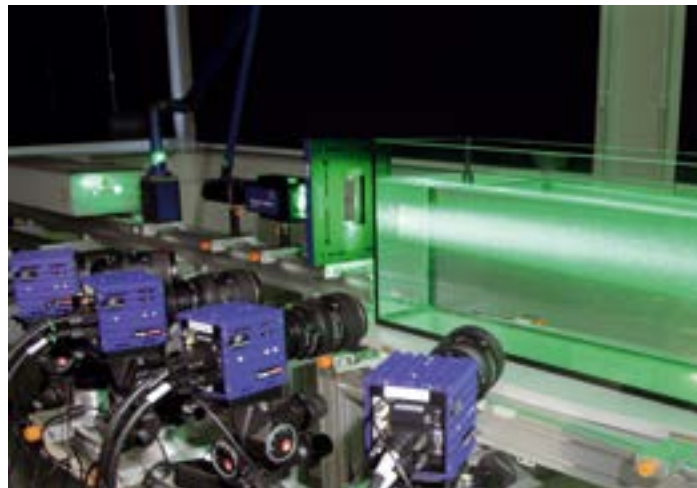
DaVis 层析PIV:

孜孜以求创新不辍的历程

2006年关于层析PIV的首篇文献的发表引发了一场科学界真正的淘金热。

篇数持续增长的文献，涉及层析PIV的最新进展和越来越多的应用，把这一热潮真实地记录在PIV的发展历史中。LaVision积极参与并推动这一不断创新的过程。我们的宗旨--在简便易用的DaVis软件环境中及时体现和提供最新的技术创新和发展，让用户及时受益。

DaVis软件所提供的那些具有创新里程碑意义的标志性事件，包括：



- ▶ 自动化体积重构算法：MART（乘法代数重构技术）
- ▶ 多重迭代相关处理，可变形问询体（3D空间的快速傅里叶变换FFT相关算法）
- ▶ 体积标定的有效性判定和修正（体积自标定）
- ▶ 减少幽灵粒子，改善重构质量。可以用两台相机搭建层析PIV系统（运动追踪增强算法MTE）
- ▶ 通过采用稀疏重构和直接相关运算显著减少计算时间耗费
- ▶ 应用现代图形处理单元的强大运算能力（在GPU上运行层析PIV）
- ▶ 在存在遮挡和反射对象的空间区域自动化地运行层析PIV（先进的体积掩膜定义和运算）
- ▶ 利用时间分辨测量数据显著降低噪声并提供计算加速度场的能力（流体轨迹相关，类似于平滑移动求和相关）
- ▶ 将层析PIV方法应用于苛刻困难的成像条件，如存在象散，颗粒图像模糊等。（光学传递函数, OTF [1, 德国宇航中心, DLR] *）
- ▶ 极高示踪粒子密度环境下应用拉格朗日粒子追踪，省略体像素重构和相关处理（迭代粒子重构, IPR [2, LaVision]** 和“抖盒子”算法 [3, 德国宇航中心, DLR] ***）

参考文献:

[1] Schanz et al. (2013) Meas. Sci. Technol. 24 024009
 [2] Wieneke B (2013) Meas. Sci. Technol. 24 024008
 [3] Schanz et al. 10th Int. Symp. on PIV, 2013, Delft, The Netherlands

*专利 EP 2494522A1, US 20120274746
 **专利 EP 2344894A1, US 20110299738
 ***专利 DE 10 2013 105 648

用GPU进行层析PIV运算

先进的体积掩膜定义

流体轨迹相关

光学传递函数

抖盒子

2012

2013

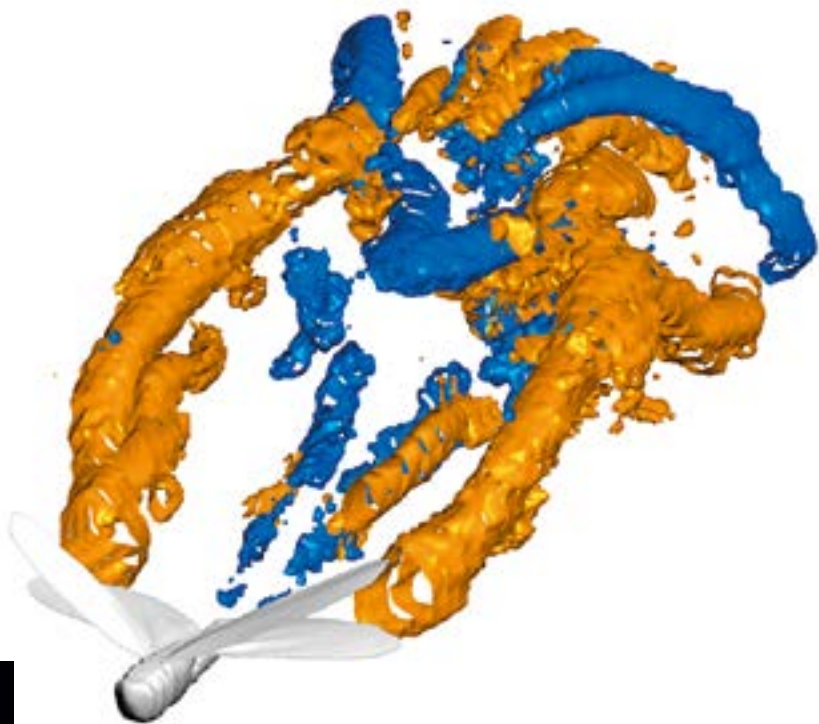
2014



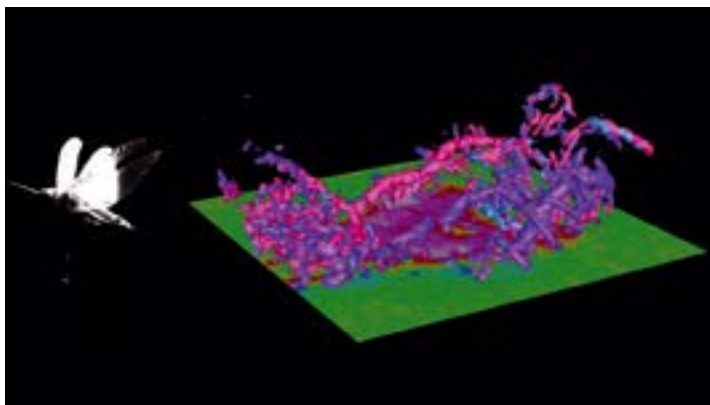
飞行蝗虫尾流的空气动力学研究

体视流动成像是向着理解飞行动物产生的湍流特征进而探究其运动的力学规律前进的重要一步。动物的飞行运动无法进行时间平均记录。用同步控制的高速相机进行时间分辨记录是揭示完整的空间-时间相关信息的基本要求。

在风速为3.3米/秒的风洞中对粘住的蝗虫飞行产生的尾流进行了时间分辨的层析PIV测量。层析PIV成像系统由4台高速相机（型号**HighSpeedStar 3G**）和同步的1kHz高速激光器组成[1, 牛津大学]。



相机选用最为灵敏的**Imager sCMOS**型。完整地测量了飞行的沙漠蝗虫瞬态尾流的漩涡结构。结果显示了顺时针和逆时针旋转涡量的等涡面和下洗运动。



参考文献:

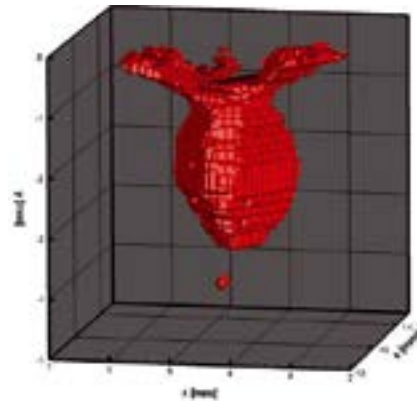
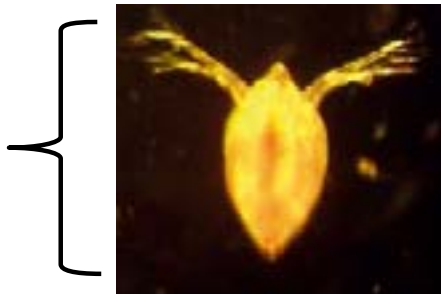
[1] Bomphrey et al., J. R. Soc. Interface 9, 3378-3386, 2012



游动水蚤的水动力学足迹

游动的微小原核生物，例如浮游水蚤的水动力学足迹，尽管尺度很小，但却可以通过饲养策略，局域水输运，等影响生态系统[1, LaVision]。

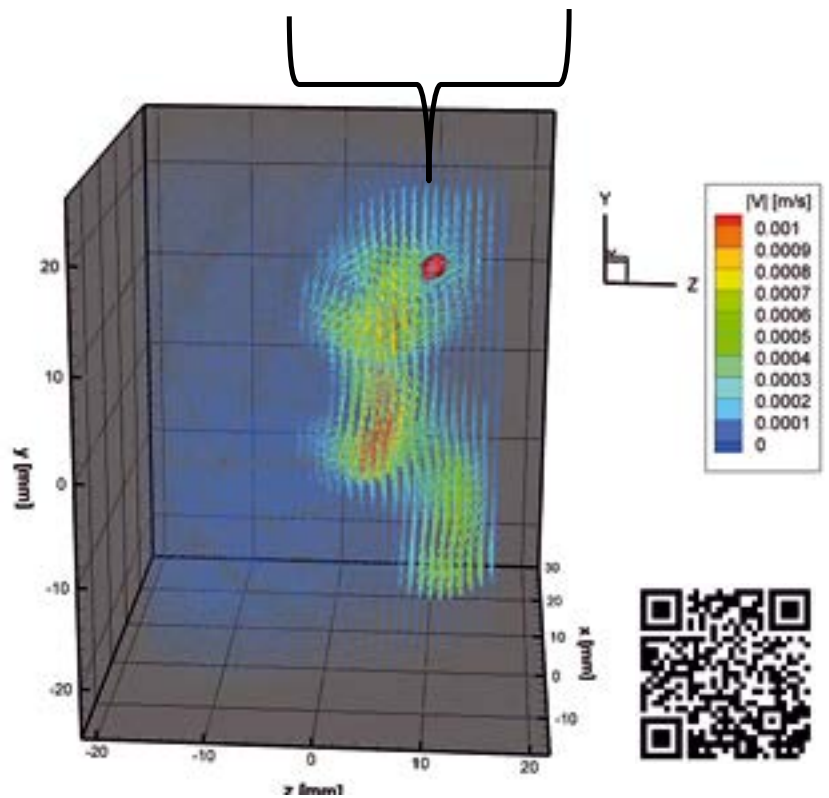
2毫米大的水蚤



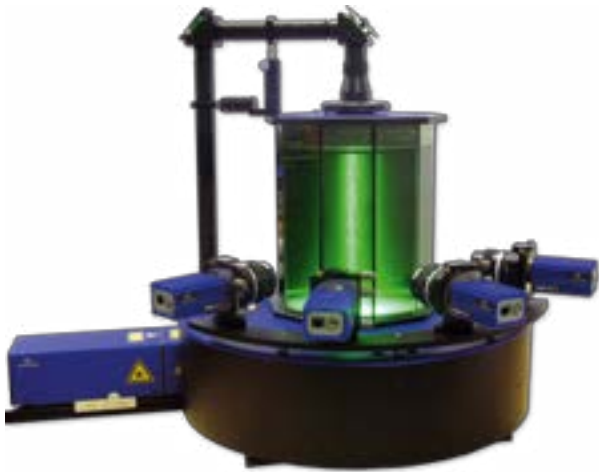
游动水蚤产生流场的3D重构

用4台5M像素Imager SX 5M型相机记录了试验水族缸中向上游动水蚤产生的湍动和时间分辨流场。显然，游动水蚤的水动力学轨迹的尺度可以比原核生物本身的尺寸大很多（参看封底）。

这一工作是和科布伦茨-郎道大学合作完成的。



参考文献：
[1] Michaelis, 16th Int. Symp. on Flow Visualization, Okinawa, Japan, 2014



模块化可升级层析PIV测试方案

LaVision针对客户多种应用需求提供一系列完整灵活的模块化层析PIV系统和组件以建立一套完全集成的“易用”好用的最先进的立体全场粒子成像测速系统。

层析PIV测量系统已经可以在只用两机构成的立体PIV系统上通过升级来实现。在此基础上，系统中每增加一台相机，就可以使所能达到的空间分辨率提高一个水平，从而揭示关于3D流动结构的更详尽的信息。



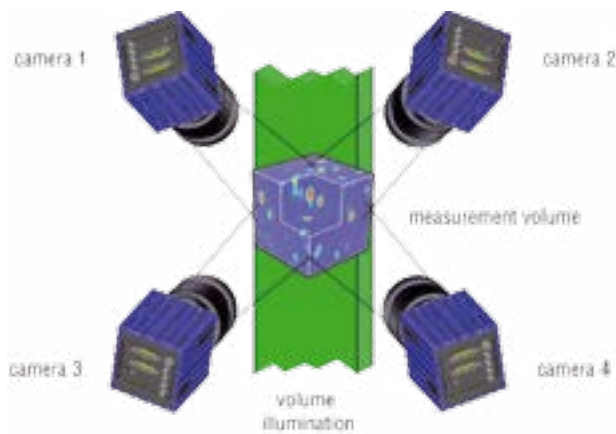
从流动对象照明到3D3C流场数据

激光器

- ▶ 和传统PIV系统中所用的标准激光器相同
- ▶ 低重复频率：可实现大的测量体积，使用更小的示踪粒子（从而有更佳的粒子跟随性）
- ▶ 高重复频率：时间分辨4D流场成像

相机

- ▶ 支持全部LaVisin相机库中的型号
- ▶ 用于需要高分辨率高灵敏度场合的**Imager sCMOS**型相机
- ▶ 可以用一台中心控制器构建2-8台相机测试系统
- ▶ 直接从2台相机系统升级到最多8台相机构成的系统



体照明光学元件

- ▶ 准直照明系统，最大截面可达50 x 100 mm²
- ▶ 对于更大的测试体积，可以采用可调的发散光学照明系统。
- ▶ 采用多程往返照明系统进一步提高照明强度





FlowMaster层析PIV主要性能特色:

- ▶ 基于先进的MART重构算法和体视自标定技术，成像系统可以得到最高的空间分辨率
- ▶ 适用于低速和高速测量。可以进行高速时间分辨测量用于对流动的4D分析
- ▶ 可升级，多功能，多相机成像构架

用于倾斜视角拍摄的Scheimpflug适配器

- ▶ 光轴和Scheimpflug角独立调节
- ▶ 电机驱动软件控制型号
- ▶ 坚固刚性结构支持无抖动的亚像素成像



3D标定靶盘

- ▶ 高精度双面标定靶
- ▶ 单幅标定，无需定位扫描靶盘位置
- ▶ 双面同时生效标定
- ▶ 一个标定位置实现全体积标定



同步和时间控制单元

- ▶ 多通道可编程时间控制单元（型号PTU X）
- ▶ 多功能，组合了对高低重复频率激光器和多台相机的控制能力
- ▶ 即便对变化的外触发信号也能实现精确同步
- ▶ 为应对具有复杂触发机制的实验需求而设计
- ▶ 完全集成由DaVis控制产生触发信号
- ▶ 软件控制的PIV-dt和相位扫描功能



DaVis层析PIV软件包

- ▶ 最前沿最先进的层析重构算法组合了先进的体像元相关处理策略
- ▶ 采用专利的体自标定技术获得最高的重构质量
- ▶ 大规模并行处理：支持图形处理单元和多核处理器
- ▶ 功能强大的后处理算法和3D显示功能，支持包括avi格式视频。
- ▶ 快速预览模式
- ▶ 可以从通用的DaVis **FlowMaster** PIV软件模块升级
- ▶ TecPlot®附件用于3D显示



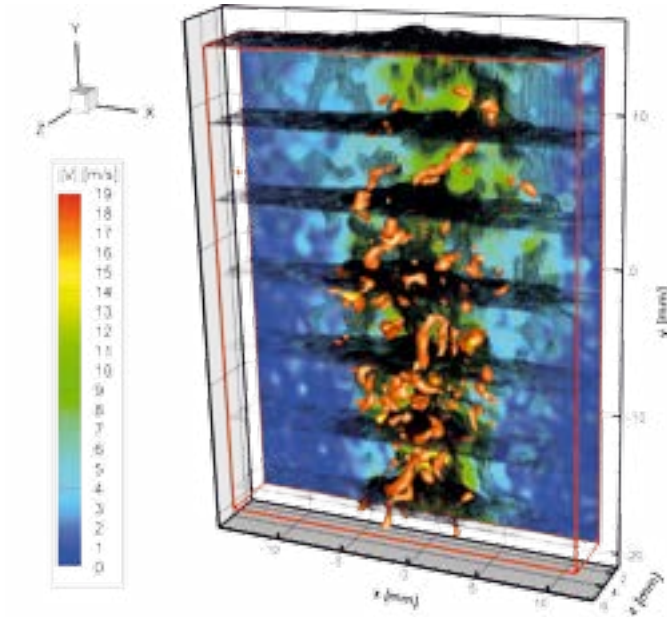
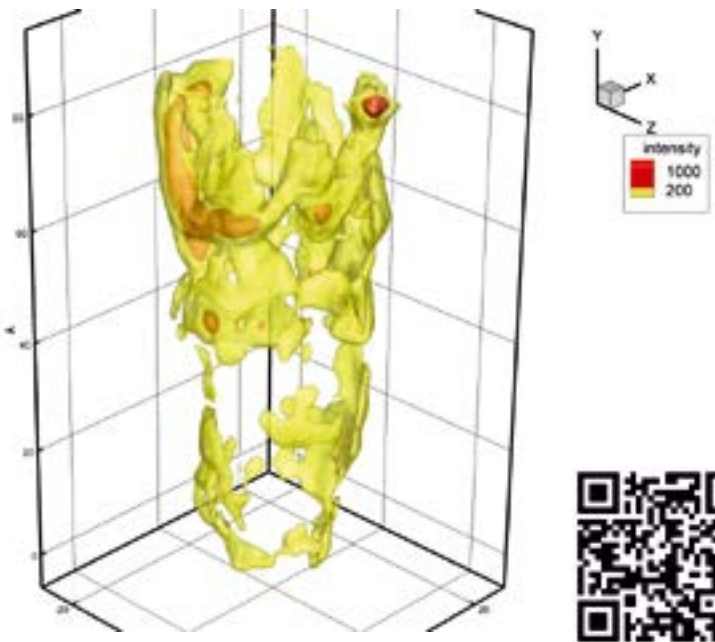


3D火焰结构和湍动火焰相互作用

火焰的3D（激光）成像增进了我们对燃烧过程的理解并因此开发了更加高效和清洁的燃烧装置。采用多相机多视角拍摄和3D重构方法对主要集中在反应区的火焰自由基3D分布进行成像测量。同时采用层析PIV测量方法研究了湍动和火焰的相互作用 [1, 2, 达姆施塔特工业大学]。

右图显示了采用了8台5.5Mpixel, **Imager sCMOS**相机并行拍照来重构瞬态火焰结构的实验结果。还可以仅用单台相机，围绕火焰，顺序采集多个视角的火焰发射图像，获得时间平均的3D火焰成像。

下图显示的火焰的3D流场是用4台相机构成的层析PIV系统获得的。实验中采用了二氧化钛 TiO_2 颗粒作为示踪粒。

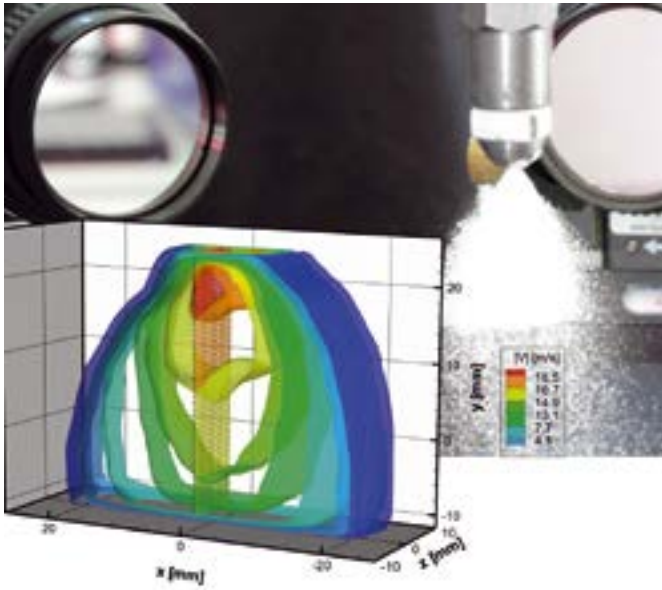


参考文献:

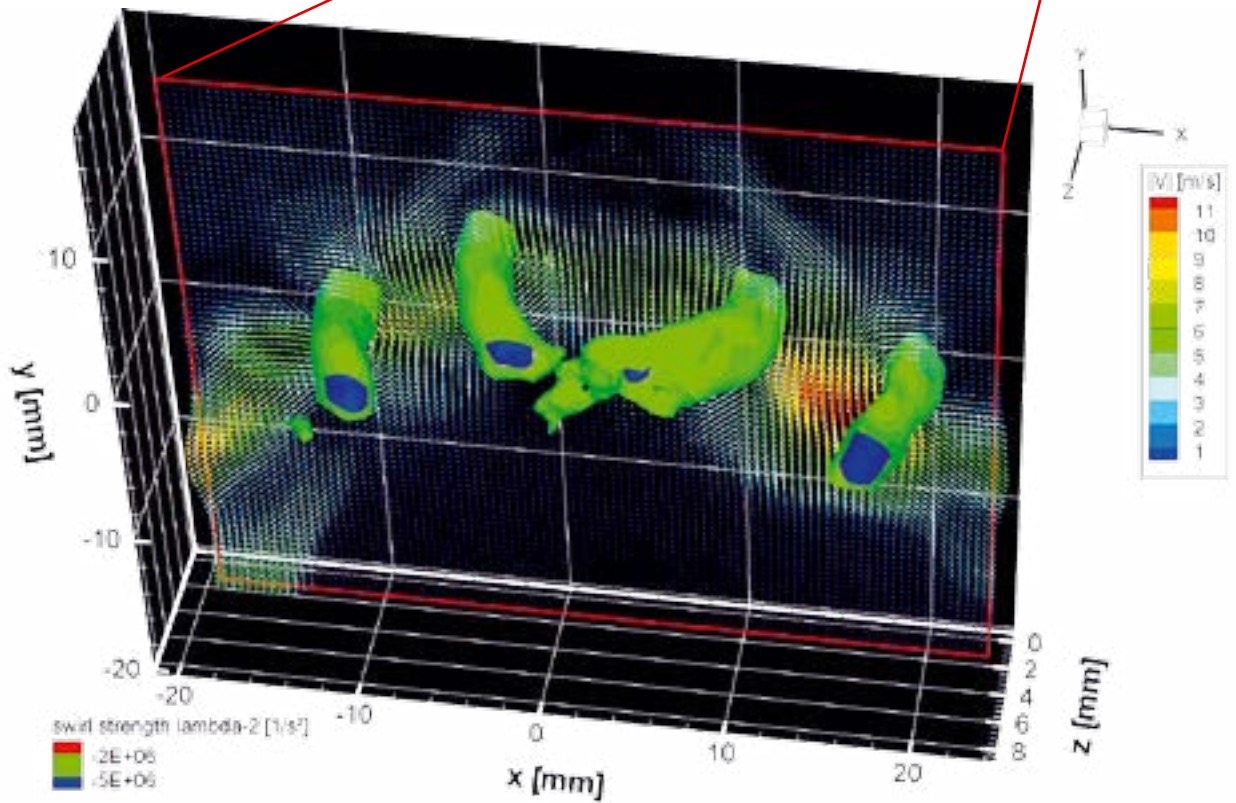
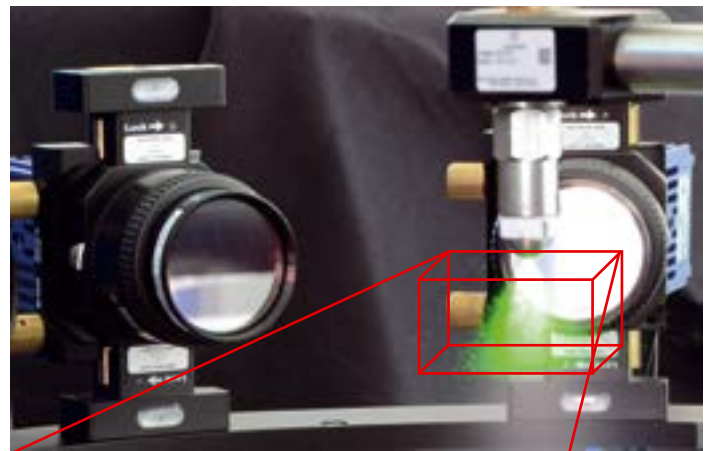
- [1] Weinkauff et al., 17th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, 2014
- [2] Weinkauff et al., Exp. Fluids 54, 2013

体视喷雾测速

对许多喷雾过程，关于多相流中液滴速度空间分布的知识是极为重要的尤其是非稳定高动态喷雾。对于这一类喷雾对象的研究，只有针对液滴采用层析PIV方法才能测量得到喷雾运动的瞬态3D结构。



采用多相机多视角拍摄，可以在3D空间重构出液滴的位置。基于这种时间相关的3D喷雾图像，可以获得瞬态体视液滴流场包括3D漩涡结构，从而获得关于喷雾特征细节最全面的信息。

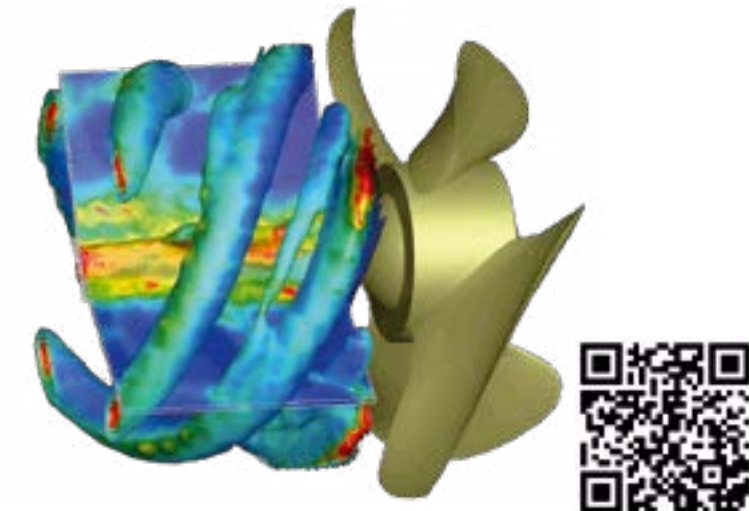
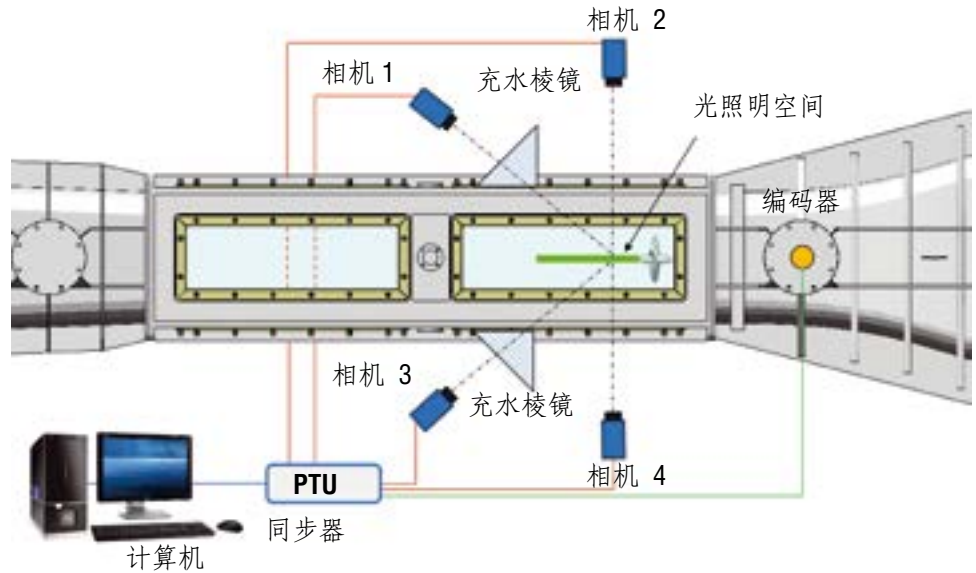




推进器尾流分析

关于转子系统，例如推进器，风洞或直升机旋翼尾流不稳定性机理的知识，因为其和设备性能，振动，噪声和结构问题直接相关，故在很多工程应用中扮演了重要角色。层析PIV显示了其可以成为一种非常有效的工具用于基于瞬态流动的分析，例如，推进器端部转换和远场漩涡的3维和湍流动力学研究。

层析PIV实验在CNR-INSEAN的空化水槽中进行。水槽中放置了用于研究其尾流的直径220毫米的推进器模型。采用双腔Nd:YAG激光器做照明激光。用四台Imager sCMOS相机（5.5Mpixel）做图像采集和记录。



推进器产生的3D流场

推进器尾流的3D漩涡结构

左图显示了在推进器尾流近场，速度场的代表性切面和用伪彩色编码显示的涡量场的方位角分量的等涡面。采用 $\lambda=2$ 判据定义的等涡面，突出显示了端部漩涡附近二次细丝的盘绕机制。

M. Felli & M. Falchi, CNR-INSEAN
友情提供

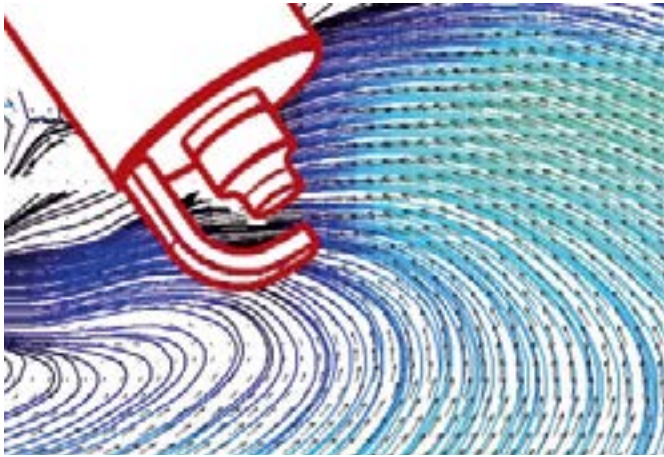
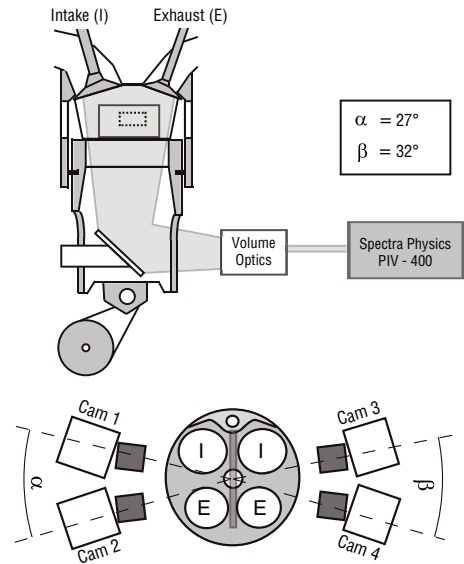
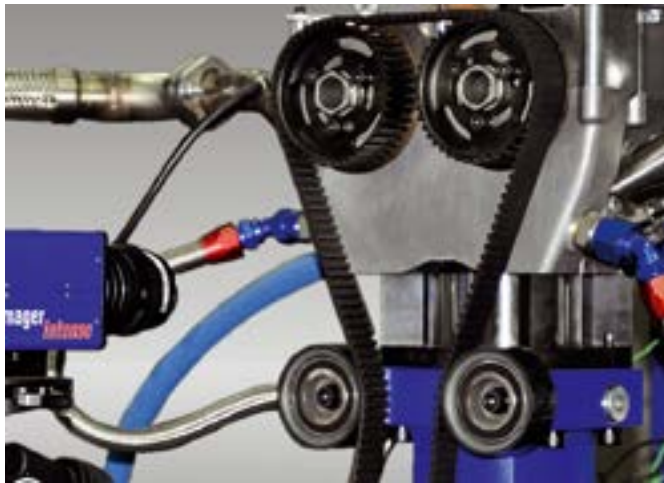


Image courtesy of KIT (IFKM)

缸内3D流场

了解缸内流动状况对于现代内燃机引擎研发设计是至关重要的，它有助于实现提高效率降低排放的目标。

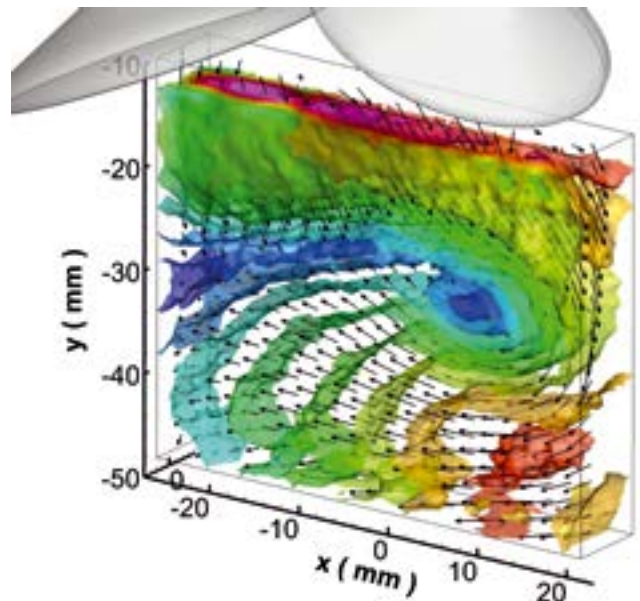
四台1.4Mpixel **Imager intense** 型相机以时间相关双曝光模式测量添加到缸内空气中的油滴颗粒的运动。测量空间用一台双脉冲Nd: YAG激光照明，从而实现层析PIV测量



缸内3D滚流

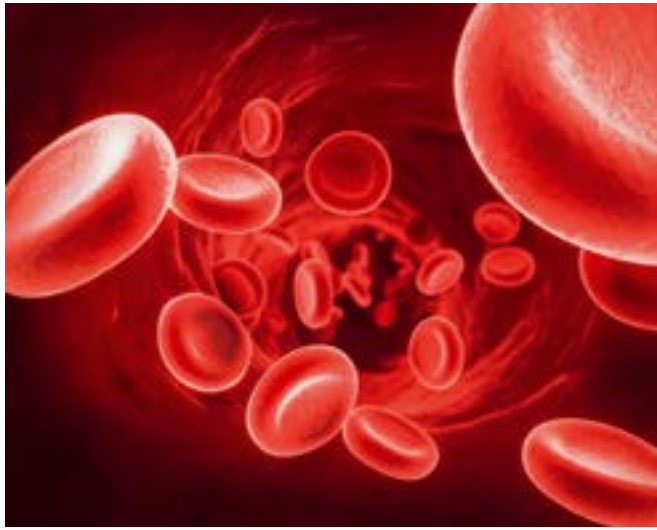
采用自标定方法修正由于发动机振动对标定造成的所有影响保证了高精度水平的重构质量（相机失调 < 0.3 像素）

所示为在滚流平面，曲轴角分辨 (270° bTDC) 周期平均 3D流场的速度幅值的等高线。滚流漩涡的3D结构清晰可见。[1, 达姆施塔特工业大学].



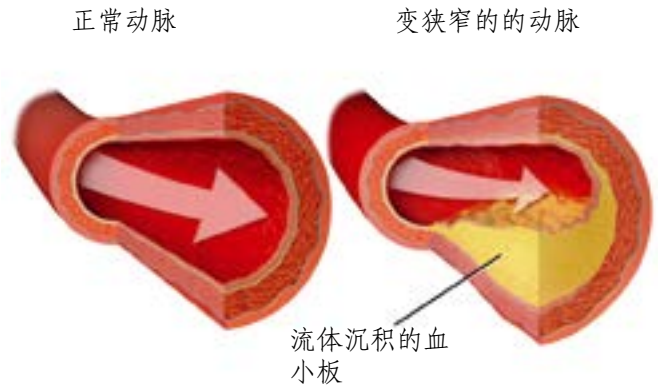
参考文献:

[1] Baum et al., Flow Turbulence Combustion 92, 269-297, 2014



3D血液流动成像

冠状动脉疾病是发达国家头号致死病因。这种疾病和血管中3D血液流动和剪切壁应力相关。层析PIV成功地用于在线研究仿真冠状动脉模型中流动和血管壁剪切应力。



应用折射率匹配实现无畸变成像

用模拟人的动脉血管硅树脂模型作为测试对象，进行在线血液流动层析PIV测量。选用和人血粘性密度相近的硅树脂和水的混合物作为工作液体。

这种工作液体同时充满换药硅树脂模型测试段的周围空间以消除因不同通光介质折射率变化所带来的图像畸变效应。

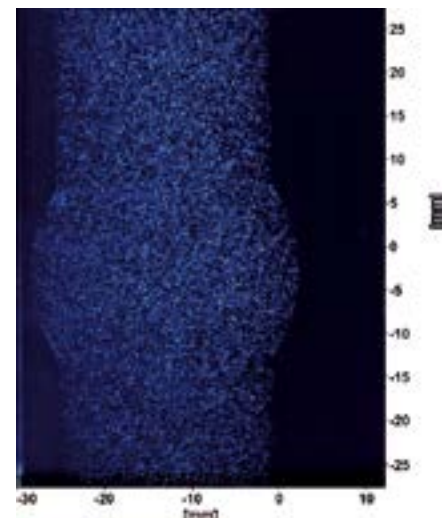
无折射率匹配



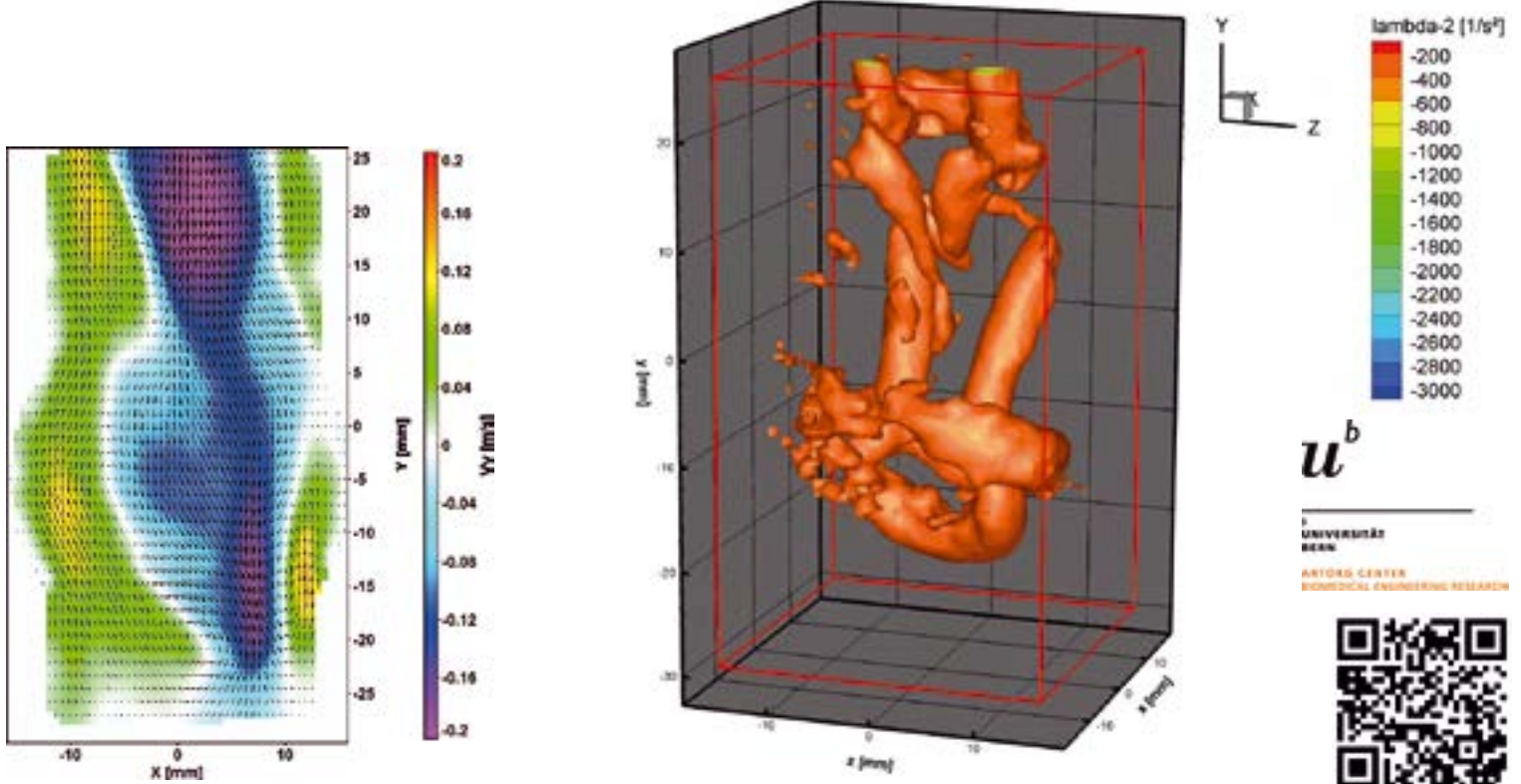
带有折射率匹配



荧光示踪粒子图像



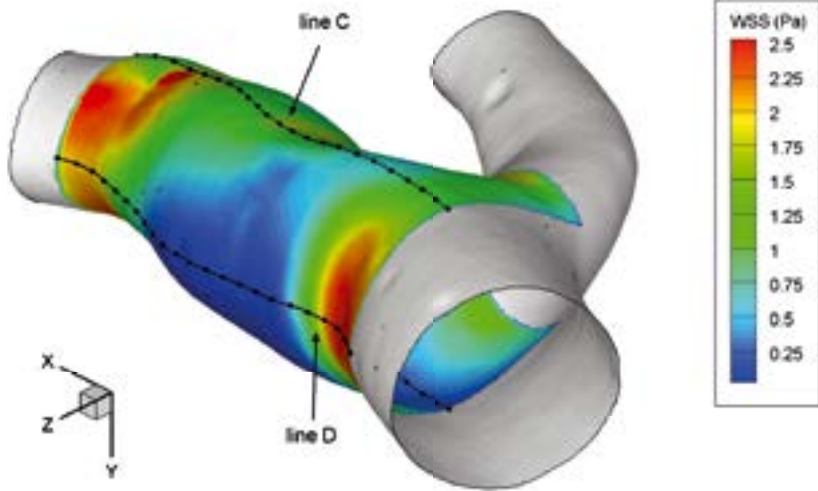
人颈动脉3D流动结构



轴向平面上的血流速度场。Y分量用彩色编码显示。

显示了血液流涡核的等涡面

伯尔尼大学 D. Obrist 友情提供



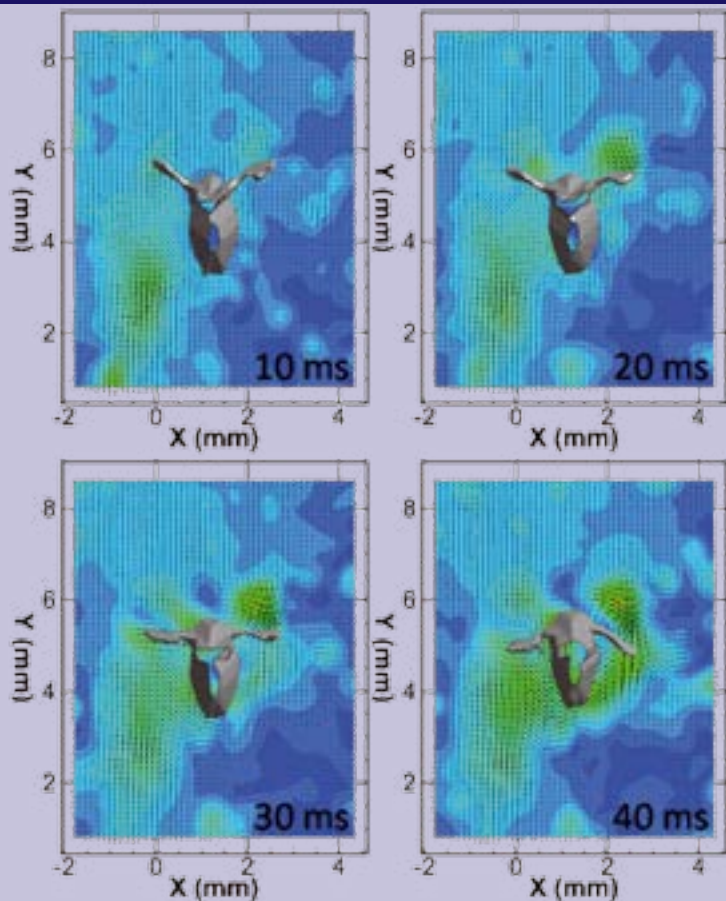
动脉血管的壁面剪切应力

所示为通过4相机层析PIV系统所测得的3D速度场计算出来的仿真人颈动脉分叉壁面剪切应力。流体中注入了20微米直径的空心玻璃微球[1, 新西兰坎特伯雷大学]。

参考文献:

[1] Buchmann et al., 8th Int. Symp. PIV Melbourne, Australia, 2009

微尺度下游动的动力学



在微小尺度下，对于2毫米的小水蚤而言，周围水介质的粘滞力在尾部产生复杂漩涡结构主导了其游动的动力学过程。在所有三维尺度上，即使在相对于其自身尺寸较远的距离内，环绕这一小动物周围的流场也会受其运动影响。

LaVision的层析PIV算法能够以0.2毫米的空间分辨率重构流场包括水蚤本身：图中显示的水蚤身体表面也是层析重构的直接结果。

亚特兰大乔治亚理工学院2012博士论文，D. W. Murphy 友情提供

层析PIV测量空间尺度

	脉冲能量 (mJ)	体积(mm ³)	示踪粒子
低重复频率, 空气	800	200 x 200 x 50	1 μm 油滴
低重复频率, 水	200	120 x 120 x 60	50 μm 聚酰胺小球
高速(5 kHz), 空气	20	34 x 30 x 19	1 μm 油滴
高速 (2 kHz), 空气	20	220 x 220 x 100	氦气泡
高速 (1 kHz), 水	22.5	170 x 100 x 80	100 μm 镀银空心玻璃微珠

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, 邮编100085

邮箱: OPLAN@263.NET

WWW.DPIV.CN

电话: +86-(10)-6262-3871

传真: +86-(10)-5971-3638

LA VISION GMBH

ANNA-VANDENHOECK-RING 19

D-37081 GOETTINGEN / GERMANY

E-MAIL: SALES@LAVISION.COM

WWW.LAVISION.COM

TEL.: +49-(0)5 51-9004-0

FAX: +49-(0)551-9004-100

LA VISION INC.

211 W. MICHIGAN AVE., SUITE 100,

YPSILANTI, MI 48197 / USA

E-MAIL: SALES@LAVISIONINC.COM

WWW.LAVISIONINC.COM

PHONE: (734) 485-0913

FAX: (248) 465-4306