
“双目式”光声显微实现超大视场高速功能成像

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41052.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

“双目式”光声显微实现超大视场高速功能成像。摘要

杜克大学姚俊杰团队提出了一种双通道高速功能光声显微成像系统，通过在同一扫描结构中并行引导两路光学激发与声学探测，在不牺牲分辨率与灵敏度的前提下，实现了超大视场的高速功能成像。该技术可在整器官乃至整动物尺度上同步获取血流与血氧等生理信息。研究团队在小鼠、斑马鱼及玻璃蛙模型中验证了其性能，首次实现了对整只玻璃蛙在不同行为状态下血液重新分布过程的动态可视化，为整体生命活动的成像研究提供了全新工具。

该研究成果近日发表于国际顶级学术期刊《Light: Science Applications》，题为 Dual-channel high-speed functional photoacoustic microscopy with ultra-wide field of view，杜克大学的姚俊杰为论文的通讯作者。

研究背景

在生命科学研究中，理解生物体如何在整体尺度上协调血流、氧供与功能活动，是揭示生理调控机制的关键。然而，高分辨率成像技术长期面临一个核心矛盾：视场越大，速度越慢；速度越快，覆盖范围越小。这一限制使得许多发生在整器官乃至整只动物层面的动态生命过程，难以被完整、连续地观测。

光声显微成像（Photoacoustic Microscopy, PAM）是一种将光学对比与超声探测相结合的成像技术，能够在微米分辨率下获取血流、血氧等重要功能信息，在神经血管偶合、生物发育和代谢研究中展现出独特优势。然而，传统 PAM 系统在扩大成像范围时，往往需要牺牲成像速度或探测灵敏度，难以胜任大尺度、高动态的生命活动成像任务。

高速成像的瓶颈：单通道难以兼顾全局与实时

近年来，研究人员引入了多种高速扫描机制来提升 PAM 的成像速度，其中多边形扫描器因其扫描范围不随速度降低而备受关注。然而，在现有设计中，单通道光学激发与声学探测结构逐渐成为系统性能的关键限制因素。一方面，单个超声换能器的有效探测范围有限；另一方面，在不显著提高激光负荷的前提下，单通道系统很难进一步提升成像通量。这使得 PAM 在面对整器官、整动物甚至多动物同时成像等需求时，始终存在技术瓶颈。

从单眼到双眼：双通道光声显微的新思路

针对上述挑战，杜克大学姚俊杰团队提出了一种全新的系统架构——双通道高速功能光声显微成像系统（Dual-Channel PAM, DC-PAM）。该系统可被视为一种双目式（Binocular）光声成像模式：在同一套扫描结构中，研究人员同时启用两个彼此独立、但高度协同的成像通道。通过巧妙利用同一个水浸多边形扫描器上的两个镜面，系统能够在同一扫描周期内并行引导两束激光激发及其对应的光声信号探测。这一设计无需降低成像速度、分辨率或灵敏度，便可显著扩展成像视场，使光声显微首次具备了在整体生命尺度上同步观察生理活动的能力。

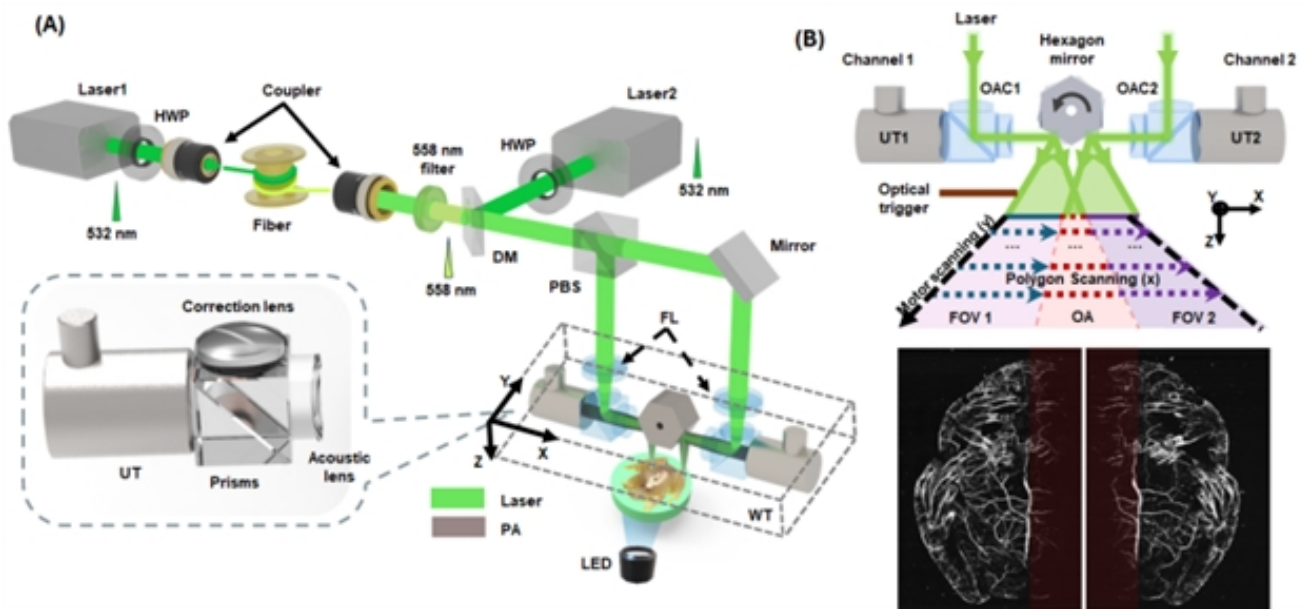


图1：双通道高速功能光声显微成像系统原理（Dual-Channel PAM, DC-PAM）。(A) DC-PAM 的系统示意图，包括双波长激光系统，多边形扫描镜，和双通道光学激发和超声接收系统。（B）DC-PAM 的高速扫描和数据采集示意图，展示双通道扫描和信号探测系统显著扩大了成像视场。

研究创新与技术亮点

双通道并行扫描，实现超大视场高速成像：DC-PAM

在单次扫描中同时覆盖两个成像区域，使有效视场显著扩展，最终实现了 $22.5 \times 24 \text{ mm}^2$ 的超大成像范围。在此条件下，完整的功能成像仅需约 15 秒，为动态生命过程的实时观测提供了可能。

稳定可靠的功能成像能力：系统结合双波长光学激发策略，并通过精确的时间调控避免信号混叠，使得在大视场、高速扫描条件下仍可稳定获取血氧等功能信息，为定量分析提供可靠基础。

深度学习辅助重建，兼顾速度与质量：针对高速扫描中可能出现的数据稀疏与几何畸变问题，研究团队结合几何配准算法与深度学习超分辨率重建方法，在不增加激光负担的前提下显著提升了图像质量，使系统在看得快的同时也看得清。

从对照实验到整只生命：多模型应用验证

为了验证 DC-PAM 在真实生物场景中的适用性，研究团队在多种动物模型中开展了系统实验。在小鼠实验中，研究人员利用系统的超大视场优势，在同一成像区域内同时监测两只小鼠的血氧

变化，其中一只作为缺氧刺激模型，另一只作为正常对照。这种同步成像设计有效降低了实验条件差异带来的影响，为功能成像中的定量比较提供了新的实验范式。在斑马鱼实验中，DC-PAM 被用于对自由游动的斑马鱼幼体进行成像。系统无需对动物进行固定，即可在开放环境中持续追踪多条斑马鱼的血管结构与运动轨迹，展示了其在自然行为状态下捕捉快速生理变化的能力。

神奇的玻璃蛙：在全身尺度上看见血液消失的过程

最具代表性的应用示范来自玻璃蛙。玻璃蛙以其在睡眠状态下呈现出高度透明的身体而闻名，其关键机制在于红细胞会被暂时性地储存在肝脏中，从而减少体表血液对光的吸收。然而，这一过程涉及整只动物尺度的血流重分布，长期以来缺乏能够在高速条件下整体观测的成像工具。借助 DC-PAM 的超大视场与高速功能成像能力，研究团队首次实现了对整只玻璃蛙在清醒、运动恢复及睡眠状态下的血流与血氧动态成像。结果显示，随着玻璃蛙从活动状态逐渐进入睡眠，其全身血流与血氧水平同步下降，而肝脏区域的信号显著增强，直接可视化了红细胞在体内重新分布的过程。进一步实验表明，通过蓝光刺激诱导血管舒张，红细胞可从肝脏重新释放回全身循环，且这一过程具有良好的可逆性。这些结果不仅加深了人们对玻璃蛙透明睡眠生理机制的理解，也展示了 DC-PAM 在整体生命尺度上解析复杂生理调控过程的独特优势。

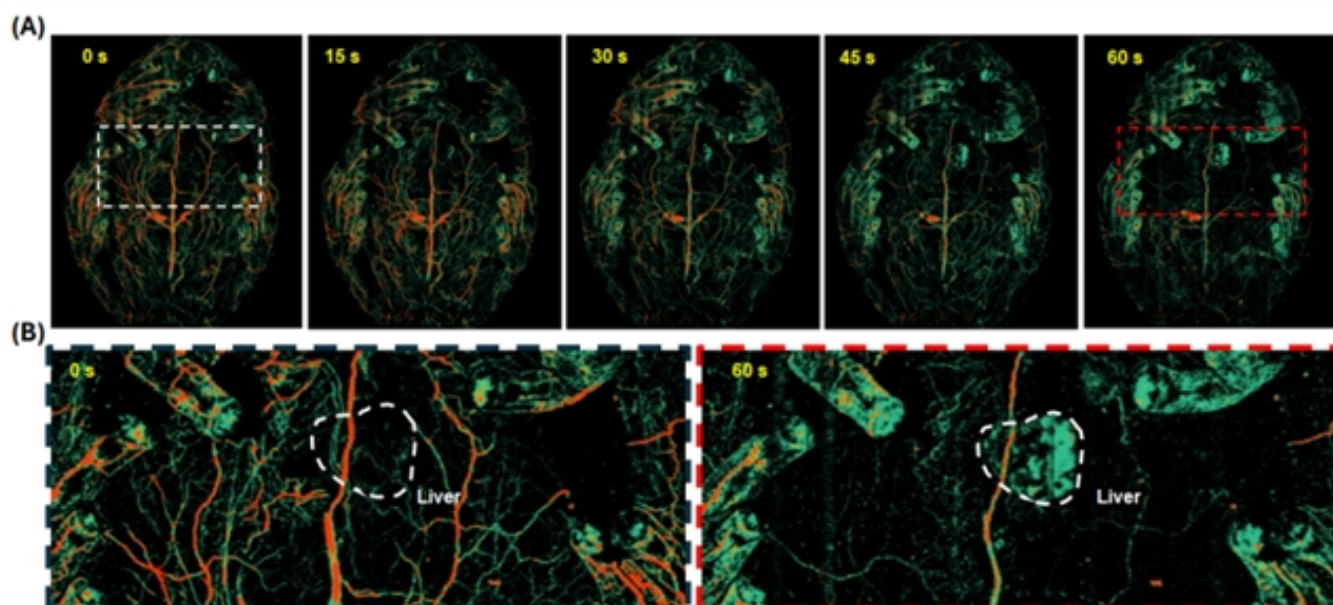


图2：DC-PAM 探索玻璃蛙的透明之谜。（A）DC-PAM 可以对玻璃蛙在入睡过程中的连续无损观察，展示了其血流和血氧状态的快速变化。（B）玻璃蛙的局部放大图，显示红细胞在其肝脏区域富集的过程。

展望：为整体生命活动研究打开新窗口

通过将超大视场、高速扫描与功能成像能力有机结合，DC-PAM 为多种生物医学研究方向提供了新的技术平台，包括神经血管调控、生物发育、氧代谢研究以及药物筛选等。更重要的是，该研究表明，成像技术不仅可以看清局部，也可以看全整体。在整体生命体尺度上理解生理活动的协调与调控，正成为可能。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-02114-3>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。

作者：姚俊杰等 来源：《光：科学与应用》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发