# 采用神经形态相机的高速高分辨率三维速度映射成像系统

Sulaiman Abubakar、Blessed Oguh、Akaninyene Udoikono、Hackim Musah、Suk Kyoung Lee 和 Wen Li*

韦恩州立大学化学系，美国密歇根州底特律

wli@chem.wayne.edu

## 摘要

我们展示了一种采用神经形态相机改进的基于相机的三维速度映射成像（速度成像）系统。我们证明，机器视觉事件驱动相机在使用微通道板成像探测器检测单个离子/电子时，可实现前所未有的2微秒延迟，使动量成像系统的速度提升至100千赫以上；相比之下，采用传统帧相机的系统速度仅为数千赫。相机的高空间分辨率进一步提升了系统性能，同时保持出色的多击中能力和高时间分辨率。

## 引言

基于相机的三维（3D）速度成像（VMI）检测系统[1-7]采用高速帧相机，检测离子/电子击中微通道板（MCP）/荧光屏成像探测器的位置，这与传统二维 VMI 系统[8]相同。此外，为实现三维检测，系统使用高速数字化仪等计时设备，对由击中产生的微通道板拾取信号进行采样，从而表征同一离子/电子击中的飞行时间（TOF）。与延迟线探测器[9]，、交叉线探测器[10] 和楔形条探测器[11, 12]等传统时间和位置灵敏探测器相比，该系统提供了一种高性能替代方案。该系统已成功应用于多种研究，例如符合电子-离子成像[13-15]、阿秒光谱学[16-18] 以及表面的光发射和光解吸[19-21]。

虽然三维速度映射成像系统非常适合与重复频率为几千赫兹的激光系统配合使用，但由于受到高速帧式相机帧率的限制，近年来对更高速度的需求逐渐增加，这是因为运行于100千赫的高重复频率激光器已经变得

相当容易获得，这得益于高功率光纤激光器和脉冲压缩技术的发展。一款能够达到这一帧率的高速相机确实存在，但由于数据率很高导致采集时间较短，加之分辨率有限且灵敏度较低，使其无法有效应用于三维速度映射成像系统。基于帧的相机会输出包含所有像素的完整帧，而不论这些像素的数值如何，即使大多数像素为零、不携带有用信息。然而，事件驱动相机采用完全不同的成像模式：它只测量像素上光强的变化，然后输出经历了此类变化的像素流，并附带时间戳 (x, y, t)。通过这种方式，数据率可显著降低。根据像素时间戳的分辨率/延迟，有效帧率可以非常高（几百千赫或更高）。需要指出的是，事件驱动相机中的延迟定义为实际事件时间与事件时间戳之间的时间差。近期，一套采用TPX3CAM的三维速度映射成像系统凭借优异的1.56 ns时间戳分辨率，实现了接近1 Mhits/s的事件率[22]。然而，TPX3CAM的空间分辨率有限（256×256 像素），这限制了其应用于三维速度映射成像装置时最终的动量分辨率。目前正在开发一种高分辨率版本，该版本采用四个Timepix3芯片，可达到 512×512 像素。另一种潜在的高分辨率替代方案是机器视觉神经形态相机，其采用Sony/Prophesee IMX636传感器时，分辨率已经达到 1280×720 像素。此类相机的时间戳分辨率为1 μs。然而，已有研究表明，这样的分辨率并不能转化为1 MHz的有效帧率。原因在于两种不同的时间戳记录方法：在TPX3Cam中，时间戳记录发生在像素上；而在机器视觉神经形态相机中，事件是在外围逻辑电路中脱离像素进行处理的。这会导致显著的延迟，可能达到几百μs。更为棘手的问题是，这种延迟并非固定值：它会根据光量和像素电子带宽的大小而显著变化。因此，延迟的抖动可能与延迟本身一样大。这使得1 μs的时间戳分辨率变得无关紧要[23]。近期一项研究在二维VMI装置中使用机器视觉神经形态相机，并报告了200–300 μs的实测像素延迟（iniVation，DAVIS346），对应的有效帧率为2 kHz[24]。与现有帧相机相比，其在帧率方面的提升极小。

在本研究中，我们展示了通过调节像素性能参数（偏置），并选取代表单个离子/电子击中的一簇激活像素中的最早时间戳，

低成本神经形态相机能够实现前所未有的2微秒延迟。这使基于相机的三维速度成像系统的速度提升至100千赫以上，同时提高了其空间分辨率。我们还展示了商用事件相机的检测灵敏度可媲美低噪声CMOS相机，因此，机器视觉事件相机可以成为基于相机的三维速度成像系统中帧相机的理想替代品。

**实验装置**

本研究使用了两套装置。一套是气相三维速度映射成像装置[13]，由三个主要部分组成：激光系统、超高真空（UHV）腔室和三维速度映射成像探测系统。简而言之，双级钛蓝宝石放大激光系统（KM Labs，Red Dragon，800 nm，单脉冲能量1 mJ）产生了~30 fs的激光脉冲。随后，脉冲在空芯光纤压缩器中进一步压缩。采用色散扫描（D-scan）技术[25, 26]测得最终脉冲持续时间约为5 fs。压缩后的脉冲随后被聚焦到超高真空腔室中，该腔室的基底压力约为$10^{-9}$ torr，目标分子在其中发生强场光电离。样品气体通过超声速膨胀进入真空腔室，形成冷分子束；在进入主相互作用腔室之前，分子束经过了置于源腔室与主相互作用腔室之间的撇取器。在相互作用区域，分子束与聚焦的少周期脉冲交叉，产生光电子和光离子。非均匀电场中的VMI静电透镜将这些带电粒子加速至各自的探测器。每个探测器均由一对微通道板（MCP）和一块P47荧光屏耦合而成。探测器上的离子/电子击中产生的电信号由交流耦合电路取出，并分别使用National Instrument PXIE 5114（用于离子）和PXIE5183高速数字化仪进行数字化。在原始三维速度映射成像系统中，荧光屏发出的光由Basler CMOS帧相机（Aca720-520um）记录，该相机在每秒1000帧的速率下具有260×260像素的空间分辨率。在本研究中，我们加入了一台基于IMX 636（Sony/Prophesee）事件传感器的事件相机。该相机由IDS制造（UE-39B0XCP-E）。为进行基准比较，我们将两台相机并排放置在离子探测器荧光屏后方（图1a）。IDS相机的原生分辨率为1280×720像素，比帧相机高出十倍以上。在两种情况下，相机均由延迟发生器（Stanford Research Systems DG535）触发，而延迟发生器又由监测激光脉冲的快速光电二极管触发。需要注意的是，对于事件相机，触发信号

仅用于同步，并不像在帧相机中那样启动/停止帧曝光。

钛蓝宝石激光器以 1千赫 运行，无法达到更高的重复频率。为了测试事件相机和检测系统的高速运行能力，采用了第二台 VMI设备/激光器。该装置用于研究表面的光发射，并配备了一台可在 100千赫[19, 21, 27] 下运行的皮秒激光器（Photonic Industries，RX3-MWB）。激光束（355nm，1 μJ）聚焦于钙钛矿纳米片薄膜上，产生的电子经加速后聚焦动量至成像探测器（Photonis，APD）。使用同一台事件相机记录荧光屏上的击中位置，同时使用数字化仪（National Instrument，PXIe5160）测量电子的飞行时间。

**命中检测算法**

由于事件相机的输出与帧相机不同，因此需要一种新算法/程序来处理相机数据并识别电子/离子命中，每次命中可能包含数十至数百个激活像素。我们开发了一种新程序，用于解码相机输出的原始字节流、将像素事件归组为离子命中，并通过硬件触发信号将每次命中与一个激光脉冲关联起来。相机以 Prophesee EVT3格式输出连续的二进制流。EVT3 是 Prophesee 的 16 位矢量化事件数据编码格式，旨在高效表示像素事件并减少数据冗余。借助 Prophesee 提供的库，我们对数据进行解码，提取出 ON像素事件（亮度增加）和激光触发时间戳；二者共用同一硬件时钟。活动噪声滤波器会移除孤立的背景噪声事件，只保留在符合时间窗 τ 内至少有一个空间相邻像素触发的像素。随后，使用成员锚定广度优先搜索算法，在相同时间窗内将保留下来的像素归为连通分量。该时间窗经过设定，既能捕获单次离子闪光中像素到达时间的完整分布（包括因 IMX636 传感器中的亮度相关阈值穿越时间（时间游走）而比明亮核心最多晚 ~100 μs 到达的暗淡外围像素），又能避免合并 100千赫下的连续激光脉冲。然后，通过突发分割将每个连通分量进一步划分为单独的命中：当在 3 μs 内检测到密集的 ≥10 个像素事件突发、局部事件率相对于前一时间窗跃升 ≥2 倍，且突发起始时间落在激光门控范围内时，即判定出现一次新命中。这样便可解决 100千赫下的同一位置堆积。每个命中对应的簇确定后

便将所有像素的质心作为该电子/离子命中的击中位置。至于时间戳，我们采用簇中最早的时间戳作为该离子/电子事件的时间戳。最后，将每次符合条件的命中的最早时间戳与最近的先前触发时间戳匹配，从而将其分配给一个激光脉冲。这样便可将击中位置与数字化仪采集的高分辨率飞行时间同步，从而获得每次命中的三维动量信息。每次命中记录的量包括质心位置（x，y）、簇大小（$n_{pixels}$）、首个像素时间戳（$t_{first}$）、延迟（$t_{first}$–$t_{trigger}$）等。可选的逐像素输出会记录每次命中中每个像素的坐标、时间戳和相对于触发的时间，以便进行逐像素时间游走分析。该程序使用 C++ 编写；得益于事件相机较低的数据吞吐量，即使在 100千赫重复频率下也实现了实时采集。

## 结果与讨论

图 1b 显示了与检测到的离子事件相关的原始像素延迟分布。延迟计算为像素时间戳与其之前最近的触发时间戳之差。该分布并不对称：上升迅速，但衰减缓慢。这与延迟高度依赖闪光亮度这一事实相一致。令人惊讶的是，延迟分布在 ~10 μs 量级上相当窄，远优于制造商规格（100 μs@1000 lux）。这可以通过以下因素解释：1000 勒克斯的光照水平来自恒定的环境照明。在此光照水平下，亮度变化 20%（激活事件像素的典型对比度变化值）

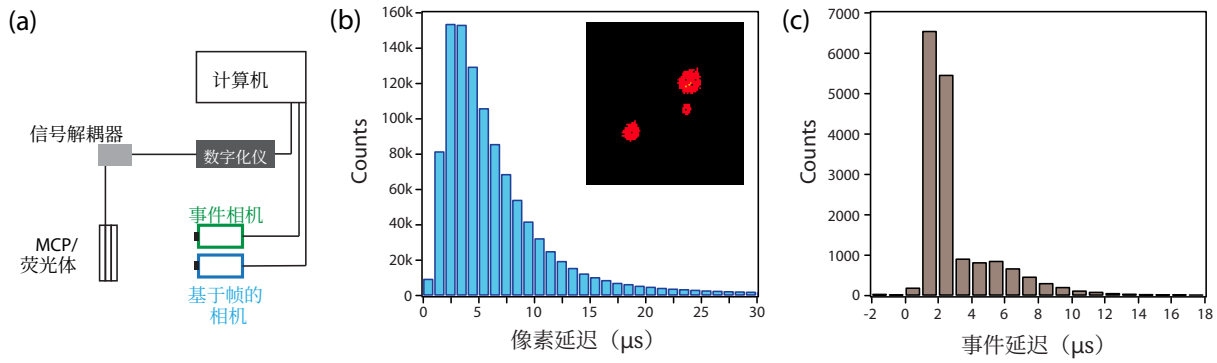



图1：实验装置和延迟表征示意图 (a) 三维速度映射成像探测系统的简化测试装置。(b) 所有激活像素的延迟分布。插图显示了三个离子事件的激活像素簇。(c) 所有事件的延迟分布，通过选取一个事件内像素中的最早像素延迟获得。

需要经过相当长的时间才能累积形成，而这也成为规定延迟的最大贡献因素。然而，在 VMI 中使用的成像探测器里，来自荧光屏的闪光会在极短的时间内到达（P47 荧光粉为 <100 ns）。相对于几乎为零的光背景，20% 的亮度变化可以非常迅速地发生，从而显著降低延迟。因此，只要像素电子学具有足够高的带宽来响应快速变化，VMI 的使用场景就会明显有利于降低延迟。对于 IMX636 传感器，事实正是如此。该传感器可通过低通滤波器（bias_fo）调节速度，该滤波器控制高频的带宽截止频率。在本研究中，我们采用了 40 的数值，以在保持低噪声的同时实现良好的速度和较低的延迟。需要注意的是，IMX636 中的事件像素在对数尺度上测量亮度。

通过选择与单个电子/离子事件相关的簇内最早时间戳，可进一步降低延迟。图 1(c) 显示了结果。分布显著收窄，主峰宽度仅为两个区间（2 μs），且仅有少量信号延伸至 8 μs。这一结果十分出色，表明系统速度有望提升至 100千赫以上。需要指出的是，该延迟分布来自离子探测器对单个质量离子（$H_2^+$）的检测。为进一步验证延迟性能，我们使用事件相机和数字化仪检测了多种质量离子（$H_2^+$、$Ar^+$、$CO_2^+$ 等）。此时，延迟分布变成了飞行时间谱。现在可以对比这两种谱（图 2a）。尽管分辨率较低，事件相机飞行时间仍明显与真实飞行时间相似。这表明，所实现的低延迟使机器视觉事件相机能够成为低分辨率质谱相机，这一成果十分显著，而且其本身可能就具有实用价值。

需要考虑相机性能的两个重要要求。第一是灵敏度，第二是测量事件亮度的能力。要使相机适用于基于相机的三维速度成像，其灵敏度必须足够高，能够探测到微弱的荧光体闪光，至少要达到数字化仪探测微通道板电信号的水平；在这种情况下，信号通常会由前置放大器放大十倍至数百倍。这对相机的灵敏度提出了严格要求，也使大多数机器视觉相机因读出噪声过高而无法胜任。为评估事件相机的探测效率，我们将其与 Basler 帧相机并排对比。已知该帧相机的读出噪声极低（2–3 个电子），且 Li研究组已广泛将其用于基于相机的三维

速度成像。图2b展示了连续1000个激光脉冲的对比结果。请注意，三种设备（Basler 帧相机、IDS事件相机和数字化仪）均与相同的激光脉冲同步，并探测相同的事件。结果表明，事件相机的探测效率与高灵敏度帧相机及微通道板拾取信号方案非常接近。帧相机与事件相机的总体探测效率相差1–2%，这表明事件相机符合要求。

对亮度进行测量的能力之所以是第二项要求，是因为在基于相机的三维速度成像中，相机记录的多击中事件与数字化仪记录的多击中事件，是根据相机事件的亮度和数字化仪波形的峰值高度进行关联的。帧相机原生提供亮度（像素值），但事件相机不会直接输出亮度。每个像素输出（x、y、t 和 p，其中 p 表示极性，即开启或关闭）都不包含任何亮度信息。

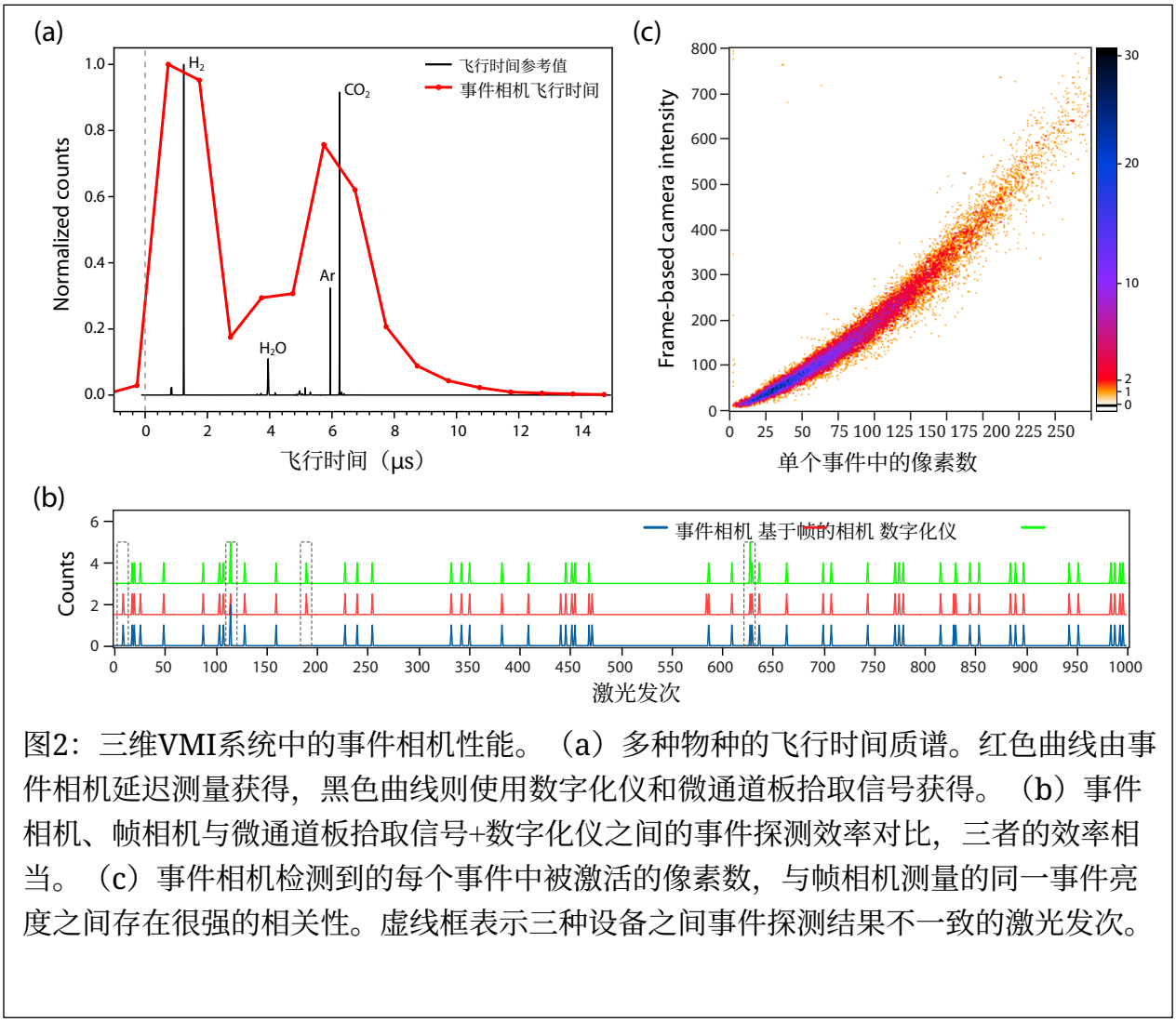



图2：三维VMI系统中的事件相机性能。（a）多种物种的飞行时间质谱。红色曲线由事件相机延迟测量获得，黑色曲线则使用数字化仪和微通道板拾取信号获得。（b）事件相机、帧相机与微通道板拾取信号+数字化仪之间的事件探测效率对比，三者的效率相当。（c）事件相机检测到的每个事件中被激活的像素数，与帧相机测量的同一事件亮度之间存在很强的相关性。虚线框表示三种设备之间事件探测结果不一致的激光发次。

事件相机缺少这项能力，会使其在三维速度成像中失去多击中能力。在 TPX3CAM 中，强度是用阈值以上时间（ToT）值估算的，而机器视觉事件相机并不具备这一指标。在本研究中，我们找到了像素亮度的一种替代指标：每个离子/电子事件所包含的像素数。这是因为较亮的闪光总是与更大的空间扩展范围相关。双相机装置已证实这一点。我们绘制了每个事件中的激活像素数与帧相机测得的亮度之间的关系。图2b显示这两个数值具有很强的相关性，验证了这一方法。

图3展示了三维速度映射成像装置使用帧相机和事件相机时的三维动量测量性能。该实验以1千赫运行，检测了钙钛矿纳米片光发射产生的电子[21]。图3a展示了帧相机拍摄的XY图像，4× 通过质心定位提高分辨率[28]；图3b则是使用事件相机原生分辨率获得的空间图像。得益于更高的像素数量，事件相机具有更好的空间分辨率。图3c展示了Xt分布，其中飞行时间（t）测量由数字化仪和微通道板拾取信号提供。事件相机的整体性能非常出色。

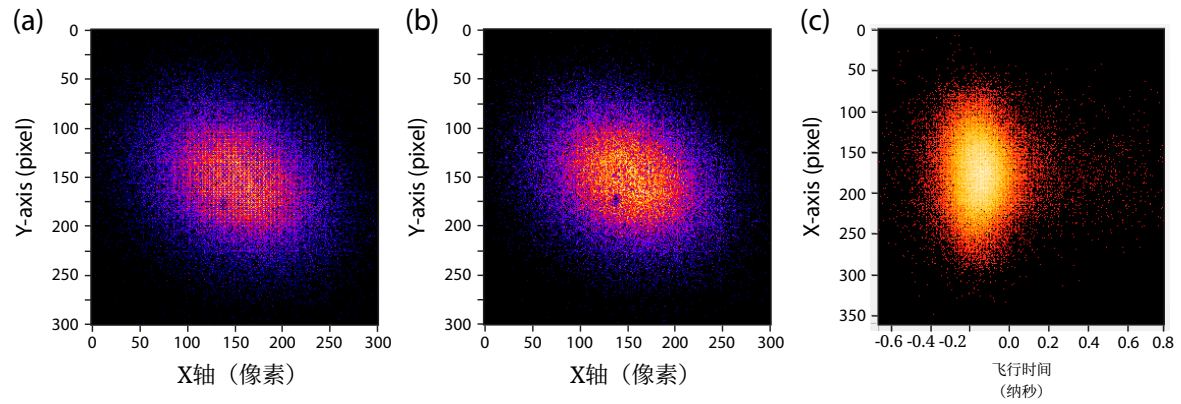



图3：光电子三维动量测量性能。(a) 使用帧相机获得的XY空间分布。(b) 使用事件相机获得的XY空间分布。(c) Xt图像。

最后，我们证明该系统可以与重复频率为100千赫的激光器配合工作。图4a显示了电子事件的延迟分布。由于表面光发射装置中使用的微通道板成像探测器已明显老化，其可实现的亮度有所降低，导致延迟增加。即便如此，延迟仍低于10微秒，

这使相机事件与数字化仪事件成功实现了同步。图4b和c展示了XY和Xt三维动量分布。有趣的是，延迟发射

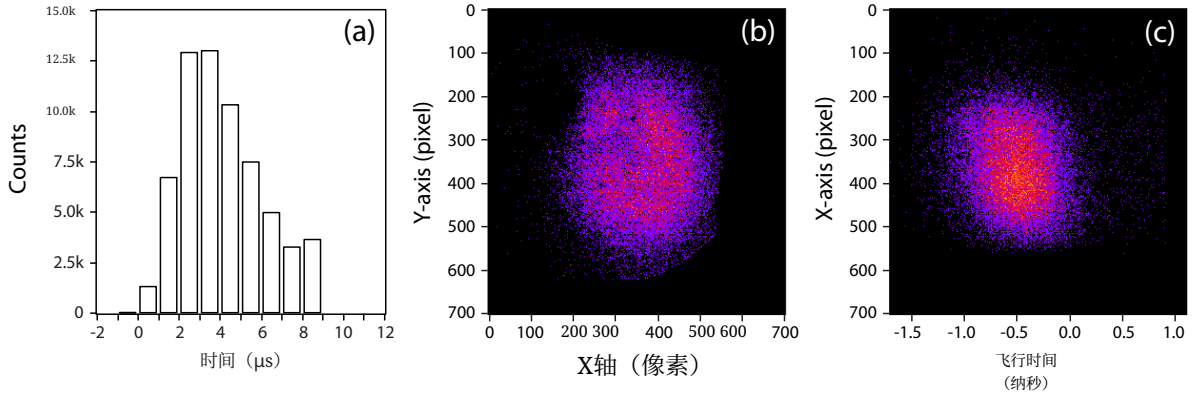



图4：100千赫下的三维速度映射成像。(a) 事件延迟分布。(b) XY分布。(c) Xt分布。

在较低重复频率下观察到的现象已基本消失，这可能是由于样品的热负荷增加所致。这很好地说明，装置的新能力能够让我们观察到新的现象。其具体动力学过程有待未来研究。

## 结论

总之，我们展示了一种改进的三维速度映射成像装置，该装置采用机器视觉事件相机。前所未有的低延迟使三维VMI系统能够以100千赫的频率运行，比采用帧式相机所展示的速度快两个数量级，同时进一步提高了空间分辨率。更高的重复频率对于符合实验尤为重要，因为必须将每个激光脉冲检测到的粒子数控制在足够低的水平，以尽量减少假符合。将光纤激光器等高重复频率激光器与事件相机结合，对于研究强场动力学和阿秒光谱学中的弱反应通道及竞争路径尤其有用；在这些研究中，某些产物的产率可能远低于主导通道。本改进系统将成为研究化学动力学、原子、分子与光学以及凝聚态物理的有力工具，因为这些研究需要检测粒子的三维动量。

**致谢：**

本研究得到美国能源部（DOE）科学办公室基础能源科学（BES）项目资助，资助编号为DE-SC0020994（强场电离研究）；同时得到美国国家科学基金会 CMI计划资助，资助编号为CHE-2107860 （光发射研究）。

**参考文献**

[1]S. K. Lee、F. Cudry、Y. F. Lin、S. Lingenfelter、A. H. Winney、L. Fan 和 W. Li, 《科学仪器评论》85, 123303 (2014).[2]S. K. Lee、Y. F. Lin、S. Lingenfelter、L. Fan、A. H. Winney 和 W. Li, 《化学物理学杂志》141, 221101 (2014).[3]Y. F. Lin、S. K. Lee、P. Adhikari、T. Herath、S. Lingenfelter、A. H. Winney 和 W. Li, 《科学仪器评论》86, 096110 (2015).[4]L. Fan、S. K. Lee、Y.-J. Tu、B. Mignolet、D. Couch、K. Dorney、Q. Nguyen、L. Wooldridge、M. Murnane、F. Remacle、H. B. Schlegel 和 W. Li, 《化学物理学杂志》147, 013920 (2017).[5]G. Basnayake、Y. Ranathunga、S. K. Lee 和 W. Li, 《物理学杂志B：原子、分子与光物理》55, 023001 (2022).[6]E. S. Goudreau、A. E. Boguslavskiy、D. J. Moffatt、V. Makhija、M. Hemsworth、R. Lausten、C. Marceau、I. Wilkinson 和 A. Stolow, 《科学仪器评论》94, 063002 (2023).[7]X. Urbain、D. Bech、J.-P. Van Roy、M. Géléoc、S. J. Weber、A. Huetz 和 Y. J. Picard, 《科学仪器评论》86, 023305 (2015).[8]A. Eppink 和 D. Parker, 《科学仪器评论》68, 3477 (1997).[9]H. Keller、G. Klingelhöfer 和 E. Kankeleit, 《核仪器与物理研究方法A辑》258, 221 (1987). [10]J. Becker、K. Beckord、U. Werner 和 H. O. Lutz, 《核仪器与物理研究方法A辑》337, 409 (1994).[11]O. Jagutzki、J. S. Lapington、L. B. C. Worth、U. Spillman、V. Mergel 和 H. Schmidt-Böcking, 《核仪器与物理研究方法A辑》477, 256 (2002).[12]C. Martin、P. Jelinsky、M. Lampton、R. F. Malina 和 H. O. Anger, 《科学仪器评论》52, 1067 (1981).[13]Q. Liao、A. H. Winney、S. K. Lee、Y. F. Lin、P. Adhikari 和 W. Li, 《物理评论A》96, 023401 (2017).[14]A. H. Winney、G. Basnayake、D. A. Debrah、Y. F. Lin、S. K. Lee、P. Hoerner、Q. Liao、H. B. Schlegel 和 W. Li, 《物理化学快报》9, 2539 (2018).[15]T. A. Olowolafe、G. B. Adusei、D. Mukherjee、A. S. Durden、S. Abubakar、B. Oguh、A. Udoikono、S. K. Lee、H. B. Schlegel 和 W. Li, 《物理化学和化学物理》28, 12756 (2026).[16]A. H. Winney、S. K. Lee、Y. F. Lin、Q. Liao、P. Adhikari、G. Basnayake、H. B. Schlegel 和 W. Li, 《物理评论快报》119, 123201 (2017).[17]E. Orunesajo、S. Abubakar、B. Oguh、Y. Ranathunga、J. Dubois、L. Rico、R. Taïeb、S. K. Lee 和 W. Li, 《物理评论快报》134, 203201 (2025).[18]G. A. Stewart、P. Hoerner、D. A. Debrah、S. K. Lee、H. B. Schlegel 和 W. Li, 《物理评论快报》130, 083202 (2023).[19]L. Fan、S. K. Lee、P.-Y. Chen 和 W. Li, 《物理化学快报》9, 1485 (2018).[20]G. A. Stewart、D. Debrah、Y. Ranathunga、T. A. Olowolafe、H. B. Schlegel、S. K. Lee 和 W. Li, 《物理化学杂志C》126, 17135 ( 2022).[21]H. Musah、T. Gamagedara、E. Pathan、A. Afugu、A. Ghosh、S. K. Lee、Z.-F. Liu、A. S. Rury 和 W. Li, 《纳米快报》26, 10762 (2026).

[22]D. A. Debrah、G. A. Stewart、G. Basnayake、A. Nomerotski、P. Svihra、S. K. Lee 和 W. Li, 《科学仪器评论》**91,** 023316（2020）。[23]iniVation。《神经形态事件视觉传感器的性能理解》。2020 年。https://inivation.com/wp-content/uploads/2020/05/White-Paper-May-2020.pdf。[24]**126,** 2142 2022K. Golibrzuch、S. Schwabe、T. Zhong、K. Papendorf 和 A. M. Wodtke, 《物理化学杂志 A》（）。[25]M. Miranda、C. L. Arnold、T. Fordell、F. Silva、B. Alonso、R. Weigand、A. L'Huillier 和 H. Crespo, 《光学快报》**20,** 18732（2012）。[26]D. A. Debrah、G. A. Stewart、G. Basnayake、J. W. G. Tisch、S. K. Lee 和 W. Li, 《光学快报》**44,** 3582（2019）。[27]Y. Ranathunga、T. Olowolafe、S. K. Lee 和 W. Li, 《科学仪器评论》**94,** 063303（2023）。[28] W. Li、S. D. Chambreau、S. A. Lahankar 和 A. G. Suits, 《科学仪器评论》**76,** 063106（2005）。