



WHITEPAPER

解决高带宽机器视觉系统中的处理瓶颈

Pleora Technologies Inc.
pleora.com

October 2025

引言

机器视觉系统正经历快速演进，以满足现代工业、医疗与国防应用的需求。这类系统日益需要支持更高分辨率、更快帧率及多相机配置，并常在实时连续负载下运行。尽管GigE Vision®标准长期以来为以太网视频传输提供了可靠框架，但行业挑战已从带宽问题转向处理瓶颈。当数据速率突破10 Gbps时，系统瓶颈已不再是相机或网络本身，而在于主机系统能否高效处理与管理海量输入数据。



本白皮书旨在探讨突破此类处理瓶颈的新兴技术与架构策略。重点解析Thunderbolt高速接口、外置图像采集卡以及RoCEv2（融合以太网远程直接内存访问）技术在构建可扩展高性能机器视觉系统中的关键作用。同时，将介绍Pleora®即将推出的25G以太网嵌入式接口，并阐述其在工业检测、医学成像及科学研究等领域的具体应用方案。

瓶颈转移：从带宽到处理能力

近二十年来，GigE Vision始终与机器视觉日益增长的带宽需求保持同步。然而，随着应用迈向4K与8K视频、7×24小时流式传输及实时分析，主机系统承受的压力急剧增加。真正的挑战在于确保从图像采集到分析的处理流水线能够持续跟进，且不引入延迟或数据丢失。

在低于1 Gbps的数据速率下，标准CPU可轻松管理工作负载。当数据速率升至2-5 Gbps时，CPU压力显著增加，设计者常转向GPU或FPGA进行加速。在5-10 Gbps范围内，传统PC架构开始显现不足。此时需要图像采集卡、优化的内存I/O及系统级调优以避免丢帧和延迟问题。超过10 Gbps后，问题进一步升级。仅靠主机CPU已无法应对负载，设计者必须采用边缘处理（在靠近相机处进行计算）或RoCEv2等支持直接内存访问的高级网络协议等策略。

数据速率	处理注意事项
<1 Gbps	标准CPU可处理；带宽几乎无影响
1-2 Gbps	CPU负载适中；标准网络即可满足
2-5 Gbps	CPU压力显著；建议采用GPU/FPGA加速
5-10 Gbps	需10GbE+网络、图像采集卡、更优内存I/O
>10 Gbps	需实时分布式/边缘处理或RoCEv2

表1: 低于1 Gbps时，带宽不成问题，标准CPU可轻松处理工作负载。进入2至5 Gbps范围后，CPU开始承受压力。在5至10 Gbps范围内，传统PC架构逐渐达到极限。

平衡性能、可靠性与成本

随着机器视觉系统规模扩大，设计者必须在性能、可靠性和成本之间取得平衡。目标不仅是更快地传输数据，更要确保系统中从相机到处理器再到显示的每个组件都能在不影响稳定性或可用性的前提下，应对增加的吞吐量。

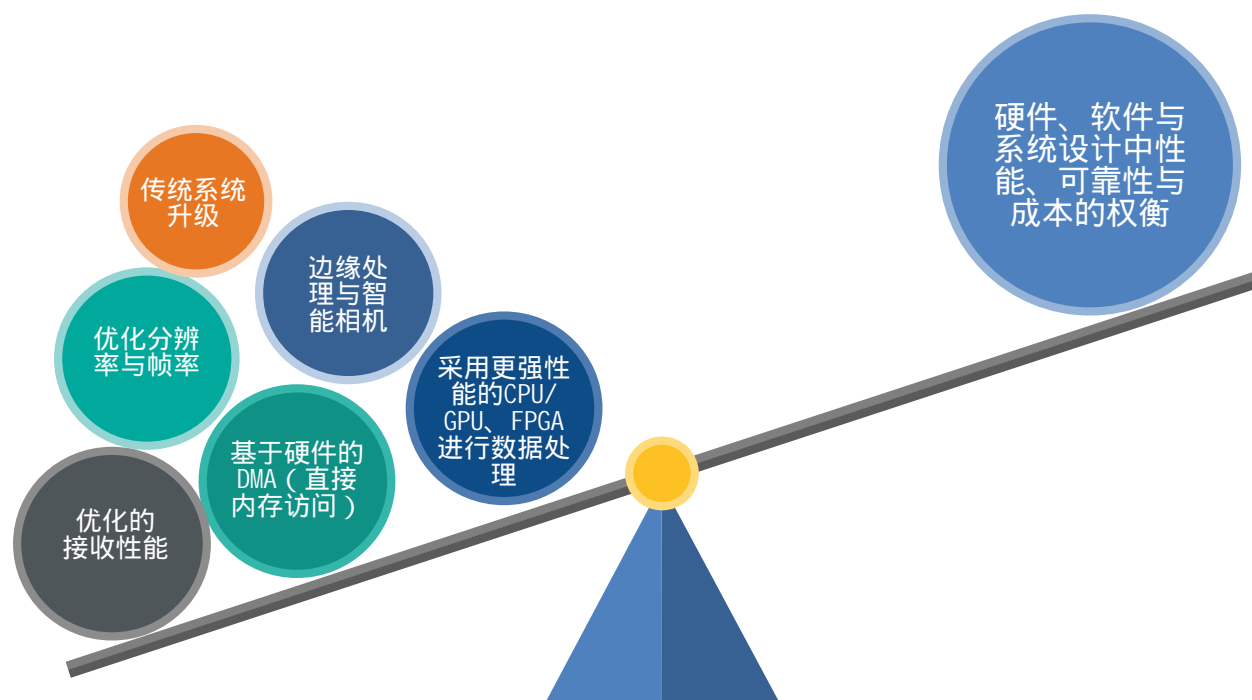


图1: 对设备设计者和系统集成商而言，随着机器视觉应用进入10千兆及更高带宽领域，主要挑战从单纯传输图像转向管理系统性能、成本与可靠性。

在10 Gbps速率下首先面临的挑战之一是接收性能下降。CPU难以管理输入数据流，导致丢帧和延迟增加。为解决此问题，设计者需考虑采用基于硬件的DMA引擎，将数据传输任务从CPU卸载。GPU、FPGA和数据处理单元（DPU）可处理图像预处理工作负载，而优化的以太网交换机和网卡则确保确定性低延迟性能。

边缘处理与智能相机也起着关键作用。通过在本地执行部分计算，这些设备减轻了中央系统的负担并提升了响应速度。然而，这些解决方案必须谨慎集成，以保持同步并避免丢包。

Thunderbolt：高带宽视觉的新选择

Thunderbolt技术已成为10 Gbps范围内机器视觉应用的一项引人注目的解决方案。Thunderbolt 3和4每根电缆支持高达40 Gbps，而Thunderbolt 5正推向80 Gbps。这相对于通常为1至10 Gbps的标准GigE Vision接口是一次重大飞跃。

 高带宽支持	 低延迟特性	 单线缆集成
单线缆最高传输速率达40 Gbps——显著超越标准GigE Vision（1-10 Gbps）带宽范围	相机与主机系统间采用直连PCI Express（PCIe）隧道传输技术	与GigE Vision标准类似，通过单根线缆同步传输数据、电力及控制信号（无源线缆传输距离：2米；采用有源光缆时传输距离可达50米以上）

表 2：Thunderbolt在带宽、延迟和布线方面的优势。

Thunderbolt支持直接的PCIe隧道传输，允许相机数据以最小开销直接传输到主机系统内存。这显著降低了延迟，对机器视觉系统中的实时决策至关重要。与GigE Vision类似，Thunderbolt可通过单根电缆传输数据、电力与控制信号，从而简化系统设计并减少线缆杂乱。

Pleora的GigE Vision转Thunderbolt外置图像采集卡结合了GigE Vision、PCIe和Thunderbolt的优势。它通过标准以太网和USB-C接口，以低且可预测的延迟传输高达22.5 Gbps的高带宽数据。内置DMA引擎采集完整图像数据并复制到主机PC内存中，释放CPU以专注于应用级处理。此解决方案使得能够使用经济高效的平台，如笔记本电脑、嵌入式系统和单板计算机，无需昂贵的内部图像采集卡或专用工业PC。

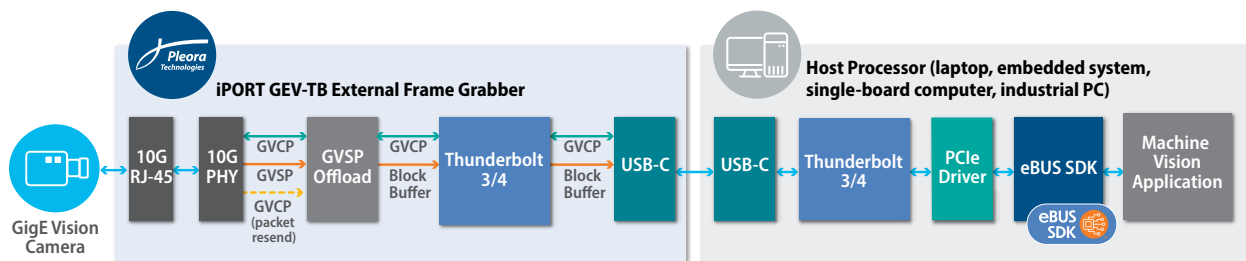


图2： Pleora的外置图像采集卡将GigE Vision相机转换为PCIe相机，并将高达22.5 Gbps的成像与视频数据，以低且可预测的延迟直接传输至Thunderbolt/USB 4端口或Thunderbolt 3/4 USB-C端口。通过免除传统图像采集卡，设计者可使用更小尺寸的笔记本电脑、嵌入式计算机和单板计算机，从而降低系统体积、成本和功耗。

RoCEv2与GigE Vision 3.0：设备设计的未来

为解决传统数据传输方法在极高数据速率下的局限性，GigE Vision标准正在演进。GigE Vision 3.0将集成RoCEv2，这是一种源自InfiniBand™规范的协议，支持通过以太网进行直接内存访问。RoCEv2允许成像数据直接从相机或传感器传输到主机处理器内存，而无需经过CPU、操作系统或缓存。

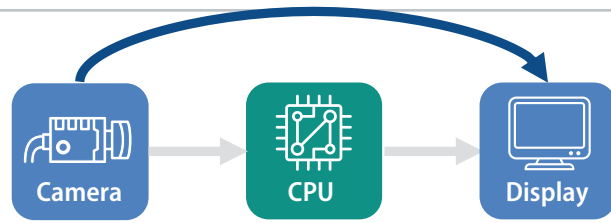


图3：零拷贝传输指的是将图像数据直接从相机传输到显示或处理内存，而不通过CPU路由的方法。这种方法通过减少延迟和降低功耗，显著提升了系统性能。

这种零拷贝传输显著降低了从传感器到显示的端到端延迟，并释放CPU资源用于图像分析和AI推理等增值任务。RoCEv2运行于第3层以太网之上，使其可在IP网络中路由，并适用于分布式系统。它支持25 Gbps及以上的高吞吐量链路，能够在极低CPU占用下实现多个高分辨率、高帧率流。

步骤	GigE Vision (no RDMA)	RoCEv2 RDMA
网格线	操作系统处理每个数据包	完全绕过
内存拷贝	1 – 2次额外拷贝	零拷贝
CPU 使用率	高	极低
传输延迟	50 – 300 μ s	2 – 10 μ s
处理启动	整帧到达后开始	传输过程中即可开始

表3：本表对比了传统GigE Vision系统与RoCEv2 RDMA实现的性能特点，并突出了低延迟在成像应用中的优势。

Pleora正在开发一款利用RoCEv2解决高带宽成像设备关键接收挑战的25G以太网嵌入式视频接口。这款现成解决方案减少了设计时间、成本和风险，使研发团队能专注于差异化性能特性。该接口支持串行LVDS通道、大图像缓冲区，并符合GigE Vision 3.0标准，是下一代成像系统的理想选择。

实际应用

医学成像

机器视觉在医疗领域增长最快的市场之一是床旁诊断和移动诊断系统。这包括用于急诊室或ICU无需移动患者的快速诊断床旁成像系统、用于诊所或现场环境的兽医诊断便携系统，以及为偏远或医疗服务不足地区部署的可移动医疗单元成像系统。

便携诊断系统，如床旁X光和兽医成像平台，受益于Thunderbolt的高速数据传输和紧凑外形。GigE Vision相机将数据传输到外置图像采集卡，后者将信号转换为Thunderbolt传输格式并发送给嵌入式处理器。这种架构支持实时显示和分析，同时降低了硬件成本并提高了移动性。

。

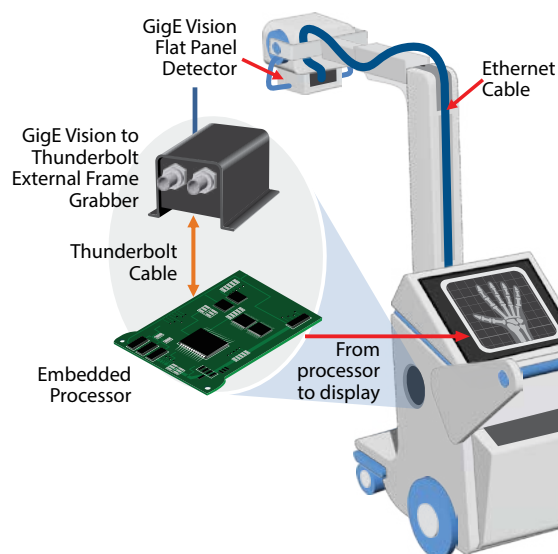


图4：机器视觉增长最快的市场之一是医疗床旁与移动诊断系统。设计者的重点是将高带宽图像采集与紧凑的嵌入式处理平台相结合，以确保便携性，同时为技术人员或医疗保健提供者提供易于使用的解决方案。

显微成像

在生命科学、眼科和质量控制领域，采用GigE Vision相机和Thunderbolt图像采集卡的紧凑型系统实现了基于笔记本电脑处理的高分辨率成像。这些系统非常适合移动部署和空间受限的环境。

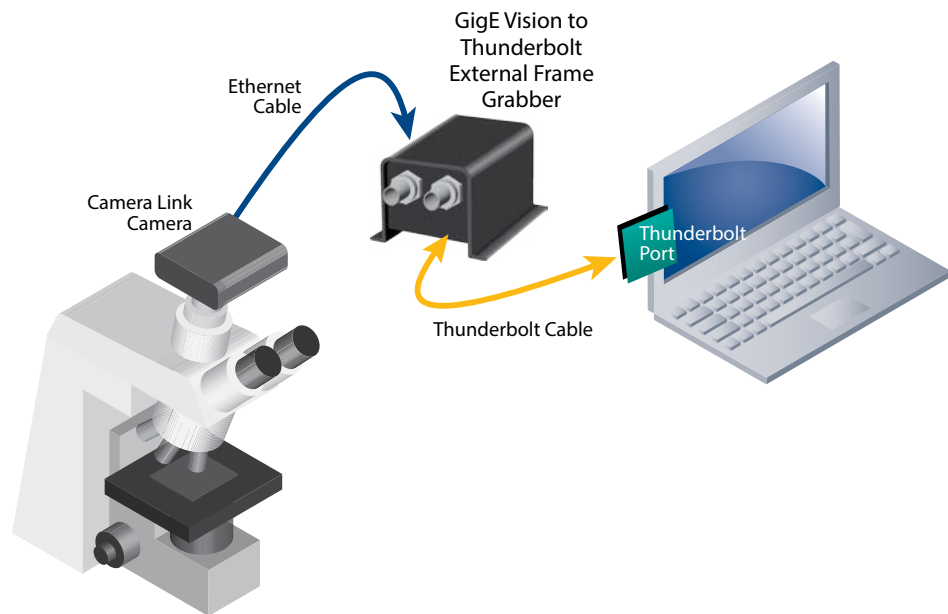


图5：基于Thunderbolt的GigE Vision解决方案使得在生命科学、眼科和质量控制等领域能够使用笔记本电脑进行更高带宽的成像应用。重点是在不牺牲图像质量或速度的前提下，实现便携性和处理灵活性。

工业检测

电子和半导体检测中的多相机设置需要同步、低延迟的数据传输。RoCEv2通过绕开传统瓶颈并允许并行处理，实现了实时缺陷检测与分析。

国防与监控

广域监控系统受益于RoCEv2的可扩展性和低延迟。分布式架构可支持多个传感器和显示器，从而提升态势感知和威胁检测能力。

结论

随着机器视觉系统在复杂性与性能方面持续升级，设计者必须采用新的策略来应对处理瓶颈。Thunderbolt 与 RoCEv2 提供了强大工具以降低延迟、优化 CPU 利用率，并赋能跨广泛应用的实时成像。Pleora 的解决方案——包括外置图像采集卡与嵌入式接口——为下一代视觉系统提供了灵活、可扩展的基础架构。

通过覆盖从图像采集到分析的全处理链路，这些技术确保了机器视觉系统能够在满足现代工业需求的同时，兼顾可靠性与成本效益。

访问 pleora.com 或与我们联系