

面向低功耗嵌入式视觉的实时图像处理系统设计研究

张 健

陕西国际商贸学院 陕西 咸阳 712046

【摘要】：随着智能设备、小型化便携设备和物联网系统的快速发展，嵌入式视觉技术在智能监控、自动驾驶、工业检测、智能交互等领域得到广泛应用。然而，嵌入式平台计算资源有限、电池容量受限，如何在低功耗条件下实现实时图像处理成为亟待研究的关键问题。传统图像处理算法计算复杂度较高，对硬件性能要求较大，与嵌入式设备在能耗与体积上的限制存在矛盾。因此，研究面向低功耗的实时图像处理系统设计方法具有重要意义。本文从嵌入式视觉系统的体系架构、低功耗关键技术、实时算法优化及软硬件协同设计等方面展开研究，分析现有系统的技术特点与局限性，并探索适用于资源受限平台的高效解决方案。研究表明，通过轻量化模型设计、算法优化、硬件加速以及功耗管理策略的综合应用，可显著提升系统计算效率，实现实时性与低功耗的统一。本文旨在为低功耗嵌入式视觉系统的开发提供理论参考与实践指导，推动智能视觉技术在更多场景下的落地应用。

【关键词】：低功耗；嵌入式视觉；实时图像处理；轻量化算法；系统设计

DOI:10.12417/3083-5526.25.06.027

引言

伴随人工智能的发展与嵌入式硬件性能的提升，视觉处理模块逐渐成为智能设备的重要组成部分。与传统高性能计算平台相比，嵌入式设备具有小型化、便携性强、部署灵活等优势，但也受制于能耗预算低、计算能力有限等条件。尤其在电池供电的便携式终端及物联网节点中，功耗控制成为核心指标，而视觉算法通常计算复杂、存储占用高，使得其在嵌入式设备上的部署面临严峻挑战。另一方面，实时性是嵌入式视觉应用的基本需求，系统需要在有限时间内完成图像采集、预处理、特征提取与任务决策等流程，才能在自动化控制、智能监测与人机交互中发挥作用。因此，实现低功耗与实时性能的平衡，成为嵌入式视觉系统研究的重要方向。当前，国内外已有大量关于嵌入式视觉硬件平台、轻量化神经网络、图像处理算法优化等方面的研究成果，但在面向实际应用的系统设计中仍存在算法与硬件协同不足、功耗优化策略不完整、处理流程复杂等问题。基于此，本文对嵌入式视觉实时图像处理系统的关键技术与优化策略进行深入分析，从体系结构、算法模型、硬件加速与功耗管理等多个维度探讨低功耗实现机制，以期构建高性能、低功耗的嵌入式视觉系统提供系统性的研究框架。

1 嵌入式视觉系统的结构特征与设计需求

1.1 嵌入式视觉系统的架构组成与功能特征

嵌入式视觉系统通常由图像传感器、图像处理模块、数据存储单元、通信模块以及电源管理模块共同构成，在体积、功耗及运算能力方面均具有严格限制，其设计需满足处理流程完整性、实时响应能力与持久运行能力等要求。图像传感器负责采集外界光学信息，其性能直接影响系统的信噪比、分辨率和动态范围；图像处理模块承担预处理、特征提取、分类识别等任务，是系统性能的核心所在；数据存储与通信部分则用于存储中间结果与传输处理后的图像信息，因此需具备稳定性与低延迟。系统架构应支持任务调度、内存管理、异常监测等功能，

使设备在资源受限环境下仍能保持可靠运行。嵌入式视觉系统整体设计应着重考虑软硬件模块之间的协同关系，使系统在有限算力平台上仍具备良好的处理速度与能耗控制能力。

1.2 嵌入式设备的功耗约束与实时性要求

功耗限制是嵌入式视觉系统设计的关键因素之一，系统在电池供电的条件下需要长时间运行，因此必须严格控制处理模块的能耗。此外，由于实时图像处理应用具有连续性和即时性，系统必须在极短时间内处理大量数据。例如在自动驾驶和无人机视觉导航中，延迟过高将直接影响决策安全；在工业检测应用中，处理延时会降低生产节奏甚至导致错检漏检。因此，系统设计需通过减少算法复杂度、优化存储访问、提升处理并行度等方式降低延迟。同时，应建立完善的功耗管理策略，在保证实时性的前提下降低系统整体能耗，使得嵌入式视觉设备能够长期、高效、稳定运行。

1.3 资源受限环境下的图像处理算法优化需求

在嵌入式设备中，图像处理算法需要面对算力有限、存储空间不足、功耗约束严格等多重限制，因此必须进行深度优化。传统视觉算法包含大量浮点运算和矩阵处理，直接部署通常会造造成处理速度下降与能耗增加，因此需采用算法简化、数据压缩、计算裁剪、模型剪枝等方法提高效率。同时，算法需减少存储访问量，优化内存布局结构，降低外存读写频率，以进一步减少能耗。另外，嵌入式平台普遍使用定点计算替代浮点计算，以提升运算效率并降低功耗，这也要求算法具有良好的鲁棒性与精度保持能力。因此，图像处理算法需在保证识别性能的前提下向轻量化、并行化和模块化方向发展，使其更适应资源受限的处理平台。

2 低功耗实时图像处理系统的关键技术

2.1 轻量化图像处理算法设计方法

在嵌入式视觉系统中，轻量化算法是实现低功耗与实时性

的关键技术之一。传统算法的运算复杂度高、参数量大，难以满足嵌入式设备的算力要求，因此需进行算法结构简化与计算量压缩。例如在卷积神经网络中，可利用深度可分离卷积、分组卷积、稀疏化卷积等方式减少计算量；在特征提取中，通过使用压缩特征描述子、多尺度融合与低秩分解等方式提升算法效率。此外，轻量化网络结构缩小模型规模，可显著提升推理速度，减少内存占用，加快数据传输速度，从而进一步降低能耗。轻量化算法不仅包括网络结构层面的优化，还包括数据维度的压缩、运算流程的减少与冗余模块的剔除，使得系统在资源受限条件下仍可实现较高的识别精度与鲁棒性。

2.2 计算量优化与算法加速技术

实时图像处理系统需具备高效计算能力，因此算法加速是重要环节。常见的优化策略包括算法的并行化设计、计算冗余消除、数据流水线构建以及内存访问优化。例如通过使用定点化策略将计算过程转化为整数运算，可显著提升处理速度；利用循环展开、矢量化运算、指令级并行等技术可提高内核处理效率；通过缓存访问优化可以减少内存瓶颈，提高整体吞吐量。此外，可采用近似计算、裁剪计算路径等方式减少不必要的运算，使得系统能够在保证处理精度的前提下显著降低计算能耗。算法加速不仅依赖软件优化，还需结合硬件结构特点，使得底层计算资源得到最大化利用。

2.3 面向低功耗的模型压缩与量化策略

模型压缩与量化技术能够在显著降低模型规模的同时保持较高的识别性能，是嵌入式部署的核心方法。模型压缩可通过剪枝、权重共享、低秩分解等方式减少网络中的冗余参数，使得模型体积显著减小；模型量化则通过将浮点权重与激活值转换为低比特格式，从而降低存储开销，提高运算速度。常用的量化方法包括8比特量化、混合精度量化和量化感知训练等。此外，二值化和三值化网络可进一步降低计算复杂度，使得卷积与全连接运算转化为简单的位运算，大幅降低能耗。压缩与量化技术的协同应用能够在保持系统精度的前提下降低硬件执行成本，使嵌入式视觉设备更加高效节能。

3 嵌入式硬件平台在实时图像处理中的作用

3.1 嵌入式处理器与专用硬件加速模块的设计特点

嵌入式视觉系统常采用低功耗 ARM 处理器、DSP 芯片、FPGA 以及定制 ASIC 等硬件平台，不同硬件具有不同的能耗与运算性能特征。ARM 处理器结构紧凑、功耗低，适合通用处理；DSP 在数字信号运算方面具有优势；FPGA 支持高度并行运算，是实现实时性的关键；ASIC 则具有能耗最低、速度最快的优势。通过将复杂运算任务映射至专用硬件加速模块，如卷积加速器、矩阵乘法引擎等，可显著提升系统效率。硬件加速模块的设计需关注面积、功耗与数据吞吐能力，并采用流水线设计与存储优化策略，实现高效执行。

3.2 存储结构与数据传输优化机制

在图像处理过程中，数据访问往往比计算本身占用更多能耗，因此优化存储结构具有重要意义。通过采用多级缓存结构、减少外存访问频率、提高数据局部性等方法，可有效降低能耗和延迟。同时，利用 DMA 传输、缓存预取、环形缓冲区等机制可减少数据搬运带来的瓶颈。嵌入式系统还需通过片上 SRAM 与高速缓存协同工作，提高数据吞吐效率，使得算法在执行过程中能够顺畅流动，提高整体性能。

3.3 软硬件协同优化与系统集成策略

单纯依赖算法优化或单纯依赖硬件加速难以达到最佳低功耗效果，因此软硬件协同优化是系统设计的重要方向。系统需根据算法特点定制硬件支持，同时利用软件层面的任务调度、能耗管理和资源控制实现整体性能提升。协同优化包括：算法结构与硬件架构匹配、异构计算平台的任务划分、指令集优化等。系统集成方面需合理配置模块接口，优化数据路径，减少能耗热点，使系统整体达到低功耗、高效率的运行状态。

4 实时图像处理系统中低功耗策略的实现

4.1 动态功耗管理机制设计

系统应采用动态电压调节、时钟频率调控、模块休眠等策略，使不同计算阶段匹配不同的能耗模式。例如在图像未更新时降低处理频率，在高负载状态下提高计算能力，动态平衡性能与能耗。同时可基于任务优先级和工作负载预测建立功耗调度模型，避免不必要的资源浪费，提高整体能效比。

4.2 处理流程裁剪与任务分级执行策略

通过分析图像处理任务的实际需求，可对流程中低贡献度的计算模块进行裁剪，提高整体执行效率。例如减少冗余的特征提取步骤、降低图像分辨率、控制模型复杂度等方式均可显著降低能耗。任务分级执行策略则通过对图像处理任务进行轻重分类，使系统根据处理场景选择不同复杂度的算法路径，提高运行效率，同时降低不必要的能耗消耗。

4.3 边缘计算模式下的低功耗协同处理方式

在物联网场景中，边缘设备通常承担大量视觉任务，通过与云端协同可降低设备端能耗。例如将轻量级任务部署在端侧，将高复杂度任务迁移至云端或网关设备处理，以实现整体负载均衡。边缘计算模式还可结合数据压缩技术与分布式处理模型，使实时系统在减少数据传输能耗的同时提高处理速度，使系统能够在更广场景下高效工作。

5 面向低功耗嵌入式视觉的系统设计策略

5.1 系统级架构规划与模块化设计原则

系统设计应遵循模块化结构，将采集、预处理、识别、通信、功耗管理等模块独立组织，并确保模块间数据流简单高效，减少中间冗余处理。此外，系统架构规划需兼顾多任务调度能

力，使其在复杂应用中能够保持稳定和响应迅速。

5.2 多算法融合与自适应处理策略构建

嵌入式视觉系统可融合传统图像算法与轻量级深度学习模型，通过自适应选择不同算法路径以满足实时性要求。例如在光照较好、场景结构清晰时选择计算量较小的算法，在复杂环境下选择模型精度更高的算法。多算法融合可提升系统鲁棒性，使其在各类应用中均能保持处理效率。

5.3 系统优化验证与性能评估方法

系统设计完成后，需要开展多维度性能测试，以验证其在低功耗与实时性方面是否达到预期目标。功耗测试能够反映系统在不同负载条件下的能量消耗情况，实时性评估用于检验数据处理与响应速度是否满足应用需求，资源占用分析则关注内存与计算资源使用效率。精度验证通过对比标准数据与输出结果，确保算法与功能模块运行准确可靠。性能评估指标涵盖处

理帧率、平均功耗、峰值功耗、内存占用比例以及系统延迟等参数，测试数据为优化提供量化依据。

结论

面向低功耗嵌入式视觉的实时图像处理系统设计是一项多学科交叉的复杂工程，需要软硬件协同优化、轻量化算法设计、硬件加速策略以及完善的功耗管理机制共同作用。本文从嵌入式视觉系统的结构需求、关键技术、硬件平台优化、低功耗实现策略以及系统设计方法等方面进行了系统分析。研究表明，通过轻量化算法、模型剪枝与量化、硬件加速、数据传输优化及功耗调度等技术的综合应用，可以在资源受限的平台上实现高效、稳定、低能耗的实时图像处理能力。未来系统可进一步结合神经网络压缩、异构计算框架设计、新型低功耗芯片等技术，加速嵌入式视觉在智能设备、工业自动化、移动终端与无人系统中的应用，实现更高效、更智能的视觉计算能力。

参考文献:

- [1] 王磊. 嵌入式视觉处理系统结构与优化研究[J]. 计算机工程与应用, 2021.
- [2] 李明. 低功耗图像处理技术在智能终端中的应用[J]. 电子技术应用, 2022.
- [3] 陈晓峰. 基于轻量化网络的嵌入式视觉算法优化研究[J]. 计算机科学, 2023.
- [4] 刘强. 嵌入式硬件平台在实时图像处理中的应用分析[J]. 现代电子技术, 2020.
- [5] 张伟. 低功耗处理器架构在视觉系统中的实现策略[J]. 微电子学与计算机, 2021.