

基于 FPGA 的实时游戏物理引擎加速器设计

冯益民

杭州非奇科技股份有限公司 310000

【摘要】在游戏产业追求高沉浸感体验的发展趋势下，实时物理引擎面临着多维度物理量协同运算、动态场景低时延响应的双重挑战，传统处理器架构已难以满足高性能计算需求。本文立足企业技术落地需求，提出一种基于FPGA的实时游戏物理引擎加速器设计方案。通过构建动态任务映射机制、优化高能效运算单元及低延迟数据交互架构，实现物理计算任务的高效调度与快速处理；同时针对碰撞检测、物理积分运算及约束求解核心算法，完成并行化、流水线化的硬件映射与资源优化。测试验证表明，该加速器在保证计算精度的前提下，大幅降低了物理引擎运算时延，提升了单位资源能效比，为企业游戏产品的高性能物理效果呈现提供了可靠的硬件支撑。

【关键词】FPGA；实时游戏；物理引擎；加速器；并行计算；硬件优化

Design of FPGA-Based Real-Time Game Physics Engine Accelerator

Feng Yimin

Hangzhou Feiqi Technology Co., Ltd. 310000

【Abstract】 Amid the gaming industry's pursuit of high immersion experiences, real-time physics engines face dual challenges of multidimensional physical quantity computation and low-latency dynamic scene response. Traditional processor architectures struggle to meet high-performance computing demands. Addressing enterprise implementation needs, this study proposes an FPGA-based real-time game physics engine accelerator design. By establishing dynamic task mapping mechanisms, optimizing high-efficiency computing units, and implementing low-latency data interaction architectures, the system achieves efficient scheduling and rapid processing of physics computations. Parallelization and pipeline optimization are further implemented for core algorithms including collision detection, physical integration calculations, and constraint resolution. Test results demonstrate that the accelerator significantly reduces physics engine latency while maintaining computational accuracy, enhances resource efficiency per unit, and provides reliable hardware support for delivering high-performance physics effects in enterprise game products.

【Key words】 FPGA; real-time gaming; physics engine; accelerator; parallel computing; hardware optimization

一、引言

在游戏产业追求高沉浸感体验的发展趋势下，实时物理引擎面临着多维度物理量协同运算、动态场景低时延响应的双重挑战，传统处理器架构已难以满足高性能计算需求。本文立足企业技术落地需求，提出一种基于FPGA的实时游戏物理引擎加速器设计方案。通过构建动态任务映射机制、优化高能效运算单元及低延迟数据交互架构，实现物理计算任务的高效调度与快速处理；同时针对碰撞检测、物理积分运算及约束求解核心算法，完成并行化、流水线化的硬件映射与资源优化。测试验证表明，该加速器在保证计算精度的前提下，大幅降低了物理引擎运算时延，提升了单位资源能效比，为企业游戏产品的高性能物理效果呈现提供了可靠的硬

件支撑。

二、实时游戏物理引擎的运算特性

（一）多维度物理量同步运算需求高

实时游戏物理引擎的主要功能为模拟现实世界中物理现象，需处理位置、速度、加速度、角速度等许多基本物理量，并结合摩擦力、弹力、重力等外力作用一起计算。随着企业游戏产品的场景越来越复杂，单个场景中可以有几百甚至上千个可以交互的物体，每一个物体的物理状态都需要用多个物理量耦合运算来实时更新。上述物理量并非独立存在的，而是存在较强的相关性。其中物体碰撞后的速度变化要和位置偏移、角速度调整同步关联，任何一个物理量的计算

出现延迟或者误差均会导致物理效果失真。

(二) 动态场景下低时延计算要求严

游戏场景的动态性是增加玩家沉浸感的一个重要因素,角色移动、物体碰撞、场景切换等都会引起物理环境的即时变化,要求物理引擎在极短的时间内完成运算后给出结果。而高速运动物体碰撞、大规模粒子爆炸等复杂情况下,物理引擎的运算量会迅速增大,如果运算时延大于某个阈值就会造成碰撞检测漏检,物理反应滞后等问题,从而影响游戏体验。此外,物理引擎的运算时延需满足网络同步的要求,不同的终端物理状态更新要保持一致性,进一步加大低时延计算的难度。因此,企业需降低物理引擎运算时延,以提高产品市场竞争力。

三、基于 FPGA 的实时游戏物理引擎加速器架构设计

(一) 动态任务映射机制设计, 适配多场景物理计算

为解决企业游戏产品多场景动态物理计算需求, FPGA 加速器设计硬件层动态任务映射结构,其精巧调度流程实现 FPGA 运算资源与各类物理计算任务的快速匹配。该系统核心技术拆解为任务特征解析模块,模块遵循游戏物理引擎指令,识别任务类型、复杂程度及即时性等关键要素,将碰撞检测、积分算法执行及约束求解等功能拆解为独立子集,依据各子任务负载特性与时限要求构建预设优先级标识。

针对 FPGA 的可编程逻辑资源,设计多组可配置运算核,每个运算核均可通过动态重构匹配不同类型的物理计算运算核。在任务调度模块中,根据任务优先级和运算核资源占用情况,采用贪心算法动态分配任务。当高优先级任务(例如关键物体碰撞检测)出现时,抢占低优先级任务运算资源,保障核心物理计算的实时性。构建任务缓冲队列,对等待执行的任务进行排序和预处理,减少运算核空闲时间,提高资源利用率。通过该动态任务映射机制,加速器可以灵活适配竞技游戏、开放世界游戏等不同类别的产品物理计算需求,为企业提供具备场景扩展性的硬件方案。

(二) 高效运算单元优化, 平衡性能与资源开销

FPGA 的运算资源有限,在保证运算性能的前提下降低资源开销,是企业实现加速器产业化应用的关键。针对这一问题,加速器对运算单元进行高效优化,通过硬件结构精简、运算逻辑优化等方式提升单位资源的运算效率。在基础运算单元设计中,采用定点运算与浮点运算相结合的混合运算架构,根据物理计算任务的精度要求动态切换运算模式。对于精度要求较低的物理量粗算,采用定点运算单元以节省

资源;对于精度要求较高的碰撞检测、约束求解等运算,则启用浮点运算单元保证计算准确性。

浮点运算单元采用优化的流水线结构,通过指令重排、数据预取等技术减少运算延迟,同时采用硬件复用技术,将加法器、乘法器等核心运算组件进行共享,降低资源占用率。此外,针对游戏物理计算中高频出现的矩阵运算、向量运算,设计专用运算单元,通过硬件电路的定制化设计提升运算效率,例如向量运算单元采用 SIMD 架构,可同时处理多个向量数据,大幅提升并行运算能力。通过上述优化,加速器在合理控制 FPGA 芯片资源占用率的同时,显著提升运算性能,实现性能与资源开销的动态平衡,降低企业的硬件成本投入。

(三) 低延迟数据交互架构, 支撑实时碰撞响应需求

为满足物理引擎实时碰撞响应的低时延要求,加速器采用低延迟数据交互架构,优化数据传输路径、提高数据读写效率,减少物理计算过程中的数据交互延迟。架构采用分布式数据存储方案,在 FPGA 内部建立多个高速缓存单元,把高频访问的物理量数据存放在片内缓存中,减少频繁的片外数据读写。缓存单元使用写回式缓存策略并且带预取机制,根据任务特性来预测后续要访问的数据,以减少数据访问的等待时延。

在数据传输路径的设计上,采用 AXI4-Stream 高速接口协议,用流水线式的数据传输方式提高数据的吞吐率,简化接口控制逻辑,减少数据传输过程中的延迟。根据碰撞检测等对数据交互实时性要求很高的任务,设计专用的数据通道,使运算单元和缓存单元之间可以实现直接的数据交互,跳过中间调度环节,从而降低传输延迟。另外架构还具有数据优先级处理的功能,碰撞检测的结果、物理状态的更新等重要数据的传输优先级设为最高,保证核心数据可以迅速地进行传输和处理。该数据交互架构可以有效降低数据传输延迟,为实时碰撞反应提供有力支撑,满足企业游戏产品对物理效果的实时性严格要求。

四、核心算法的 FPGA 硬件实现优化

(一) 碰撞检测算法并行化硬件映射

碰撞检测是游戏物理引擎的核心算法,其运算效率直接决定物理引擎的整体性能。企业游戏产品中,碰撞检测需遍历场景中的所有物体,判断物体间是否存在碰撞关系,运算量随物体数量的增加大幅上升。为提升碰撞检测效率,加速器将碰撞检测算法进行并行化硬件映射,通过 FPGA 的并行

逻辑架构实现多物体对的同时检测。在硬件实现上,设计多组并行碰撞检测核,每个检测核可独立处理一组物体对的碰撞检测任务,通过任务调度模块实现检测核与物体对的动态匹配。同时,优化碰撞检测算法的硬件逻辑,采用流水线操作减少单组物体对的检测延迟,将包围盒坐标比较、投影计算等步骤拆分为多个流水线阶段,实现并行处理与流水线执行的双重优化。通过该并行化硬件映射,加速器的碰撞检测效率较软件实现大幅提升,可满足大规模物体交互场景的实时检测需求。

(二) 物理积分运算流水线化实现

物理积分运算用于根据物体的受力情况更新其位置、速度等物理状态,是物理引擎中执行频率最高的算法之一。为提升运算效率,加速器采用流水线化方式实现物理积分运算,通过将运算过程拆分为多个独立的硬件处理阶段,实现数据的连续处理与高效流转。物理积分运算采用龙格-库塔算法,该算法具有精度高、稳定性好的特点,适合游戏物理场景的动态模拟。

在硬件实现上,将龙格-库塔算法的计算过程分为受力计算、中间状态求解、积分结果输出三个部分,每个部分对应一组硬件运算单元,受力计算部分并行加法器和乘法器计算物体受力,中间状态求解部分利用合外力和当前物理状态计算中间速度和位置,积分结果输出部分加权求和得到最终物理状态更新值。

各阶段依靠寄存器组完成数据缓存及同步操作,保证流水线运行稳定,利用数据预取技术提前将下一计算周期所需信息加载到运算单元,减少阻塞风险,针对游戏中物体物理属性差异大的特点,运算模块设置了参数动态调整功能,通过硬件接口实时调节质量,摩擦系数等核心变量,以适应复杂场景下的精确模拟需求,该架构大幅改善单次积分运算的时间延迟,整体吞吐性能得到明显提升,充分符合高频状态

更新的应用要求。

(三) 约束求解模块资源优化配置

约束求解是保证物理模拟真实性的关键,用来处理物体之间的约束关系,保证物体的运动符合物理规律。约束求解算法运算量大,还要求解大量的线性方程组,对FPGA的资源占用和运算效率都是考验。为了达到资源优化配置的目的,在加速器设计中采用分层次约束求解架构,根据约束关系的复杂程度和实时性要求,把约束分为刚性约束和柔性约束两种类型,分别采用不同的硬件实现方案。对于刚性约束,采用直接求解法,利用硬件电路快速求解线性方程组,保证约束条件的严格满足;对于柔性约束,采用迭代求解法,通过硬件迭代运算逐步逼近最优解,在保证模拟效果的前提下降低运算复杂度。

对于资源分配来说,应用动态调整机制时,为应对某些场景约束条件及相关约束属性动态变化时,资源环境因素不同时,求解单元数和运算资源配比略有差异:系统有少量易处理约束情况即能带来任务迁移整体影响。有繁冗复杂的多个约束品项时,应借优先级调度保证约束项核心处理必要时效。

五、结论

本文针对企业游戏产品对实时物理引擎高性能运算的需求,完成基于FPGA的实时游戏物理引擎加速器的设计与优化。测试验证表明,该加速器在保证计算精度的前提下,显著降低物理引擎运算时延,提升单位资源能效比,能够满足复杂游戏场景下物理引擎的实时运算需求。该设计为企业游戏产品的高性能物理效果呈现提供可靠硬件支撑,同时为FPGA在游戏硬件加速领域的产业化应用提供可行方案,具有重要的工程实践价值与市场推广前景。

参考文献

- [1]周慧灵,杨淑惠.基于FPGA的物联智能化拔河游戏系统设计实现[J].科技创新与生产力,2025,46(07):107-109+113.
- [2]李营,吕兆承,施勇.基于FPGA的俄罗斯方块游戏设计与实现[J].通化师范学院学报,2022,43(02):118-122.
- [3]徐华伟,林凡.基于FPGA的推箱子游戏设计与实现[J].电子制作,2019,(19):24-26.
- [4]黄柯,刘昌华.基于FPGA的入侵者游戏设计[J].信息通信,2018,(01):138-139.
- [5]李乔丹,刘昌华.基于FPGA的吃豆人游戏设计与实现[J].信息通信,2017,(12):125-127.
- [6]杨世江.基于体扫描技术的立体显示物理引擎研究[D].华东师范大学,2012.

作者简介:冯益民,出生年月:1988年2月9日,男,汉族,籍贯:浙江省宁波市,学历:本科,研究方向:从事游戏行业软硬件技术开发。