从SSE到OpenCL：多核CPU上骨骼动画并行算法对比研究

刘寿生, 陈戈, 马纯永, 韩勇

（中国海洋大学信息科学与工程学院，青岛 266100）

**摘 要**：对于拥有高精度蒙皮和复杂骨骼绑定关系的骨骼动画，顶点更新局部子模块占用绝大部分的全局渲染时间，是动画渲染的性能瓶颈。顶点更新模块采用矩阵调色板算法，算法拥有指令级和线程级的潜在可并行性。为了改进算法在多核CPU上的执行性能，*提出了基于OpenCL的针对线程和指令的新兴集成并行方案，并与基于SSE结合OpenMP针对指令和线程的传统独立并行方案展开对比。*实验结果表明，在多数CPU和多种复杂度的数据上，基于OpenCL的新兴并行方案的性能明显高于基于SSE的传统并行方案，并且性能优势随着数据复杂度的提升而提升。

**关键词**：骨骼动画；并行计算；OpenCL；SSE

中图分类号：TP391.9 文献标识码：A 文章编号：1004-731X (2014) xx-xxxx-x

From SSE to OpenCL: Comparison of Parallel Algorithms for Skeletal Animation on Multi-core CPUs

LIU Shou-sheng，CHEN Ge，MA Chun-yong，HAN Yong

(College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract**：While skeletal animations consist of high fidelity mesh and complex vertex binding, local module for updating the vertex consumes most of the total rendering time. The matrix palette skinning algorithm is used to update the vertex, while the algorithm has parallelizability both at the level of thread and instruction. In order to improve the performance for multi-core CPUs*, the latest parallel scheme based on OpenCL which integrated the former two levels of parallelization is proposed, comparing to the traditional parallel scheme formed by SSE and OpenMP oriented to instruction parallelization and thread* *parallelization separately.* The experimental results show that on most CPU with different complex data the performance of the parallel scheme based on OpenCL is better than SSE. And the more complex the data is, the greater the performance advantage grows.

**Key words**: skeletal animation; parallel computing; opencl; sse

引言[[1]](#footnote-2)

骨骼动画是一种形变模型，在学术上也被称为网格蒙皮、骨骼子空间形变、矩阵调色板蒙皮[1]。骨骼动画用于模拟虚拟人物或动物，广泛用于医学、影视和游戏等领域[2]。早期计算机动画基于关键帧顶点混合，每个关键帧需要一个独立的模型，所以一段动画需要多个模型，占用很大的内存和外存。为了压缩动画数据量，Burtnyk[3]于1976年首次提出骨骼动画的概念，骨骼动画只需一个模型，运动效果由骨骼的运动驱动。相比顶点混合动画，骨骼动画是一种以时间换空间的方法，节省空间的代价是大幅增添计算负担，造成性能瓶颈问题。

为了解决骨骼动画的性能问题，国内外学者普遍把研究焦点放在并行加速方法上面。世界上一些著名研究机构和大学建立了专门的并行计算研究小组：1）斯坦福大学的普适并行实验室(The Pervasive Parallelism Laboratory, http://ppl.stanford.edu/, Stanford University)。该实验室采用应用驱动的方法使并行计算研究范围从编程模型拓展到硬件体系，核心的技术概念是特定域语言，该语言能够提升编程效率，并集成了一个可以给并发和局部化管理提供动态或静态方案的通用并行执行环境。该实验室已经为多个领域提供了特定域的并行抽象语言，包括人工智能和机器人、商业数据分析、虚拟世界和游戏娱乐。2）佐治亚理工学院的Cell 宽带引擎(Cell Broadband Engine, http://sti.cc.gatech.edu/, Georgia Institute of Technology)。该引擎的研究得到索尼、东芝、IBM三家厂商的支持，并用于驱动它们的工作站服务器等大型并行计算设备。它们主要的研究目标是1台附带了8台协处理器的多核处理器，应用领域涉及图像压缩和金融模型构建。

并行技术在软硬件两方面的发展都非常迅速，特别在GPU并行方面，并行技术先后经历了Program汇编、Shader着色语言、CUDA三代更迭。Lindholm[7]于2001年提出基于汇编语言的骨骼动画GPU并行加速算法。季卓尔于2008年提出基于Shader的GPU骨骼动画[8]。胡前亮于2011年提出基于CUDA的骨骼动画实时阴影仿真方法[9]。GPU并行技术突破了骨骼动画的性能瓶颈以后，衍生出骨骼自动生成[10]、骨骼与皮肤自动绑定[11]、皮肤切割变换[12]等研究热点。相比骨骼动画的GPU并行研究渐渐成熟，反观骨骼动画的CPU并行，国内外缺少学术上的研究。研究CPU上的并行方法，一方面可以作为GPU并行方法在软硬件无法支持时的备用方法，另一方面有助于探寻CPU最高性能从而为GPU加速提供评价基准[13]。工程应用上著名开源引擎Ogre于2006年提出了的面向CPU的流式单指令多数据扩展(Streaming SIMD Extensions, SSE)指令并行方法。

SSE系列指令集是Intel设计的支持128位操作数的指令集。SSE指令并行技术的出现，主要是因为现代CPU拥有多个长度为128位的寄存器单元，支持一个指令周期同时操作128位数据，即8个float或4个double，1条加指令可以同时作用于8对float加数和被加数。CPU指令集提供相应的数据类型和指令，支持同时操作多个操作数，可以成倍提升浮点运算的执行效率[14]。

开放多线程处理(Open Multi-Processing, OpenMP)是一个开放的多线程方法库[15]，每个CPU常常含有4个甚至更多的核心处理器单元，开发多线程并行程序理论上将获得跟核心数目一样多的加速比。在不同的CPU硬件厂商型号之间，以及不同的编译器软件之间，不同的操作系统之间，都具有良好的代码可移植性和性能可移植性。OpenMP已内置到最常用的几种编译器如Windows的VC和Linux的GCC以及Mac。OpenMP可以快速地在多线程和单线程两种状态之间进行切换，而程序员只需要编写很少的代码。对于算法结构不是很复杂而算法运算量巨大的情形，特别适合选用OpenMP。此外还可以使用其它多线程库，如Intel TBB(Threading Building Block)，以满足更为复杂多样的多线程编程需求。

随着开放并行计算语言(Open Computing Language, OpenCL)的提出，主流CPU厂商AMD和Intel先后于2009年和2010年在多核CPU上支持OpenCL技术[16]，从而为CPU并行技术的研究开辟了新的领域。OpenCL是一个标准的规范框架[17]，根据该规范编写的并行程序，可以在多种异构处理器设备端上执行，包括CPU、GPU、DSP、FPGA和其它处理器[16]。各种主流处理器发布了各自的软件编程工具和硬件可编程能力，例如Intel的Intel SDK for OpenCL Application、AMD的APP SDK、NVIDIA的CUDA，使得基于OpenCL规范编写的并行程序可以在Intel、AMD、NVIDIA的CPU和GPU上通用。OpenCL基于C语言设计了独特的编程语言，相比其它并行方案所用特有语言具有明显优势[18]。OpenCL还包含一套规范API供主机端host调用，用于配置OpenCL运行环境并为设备端传递数据。

在并行性能评价理论方面，Amdahl提出固定问题规模的并行加速比定律即阿姆达尔定律（Amdahl’s Law）[19]，该定律定义加速比*A*的上限为1/(1-*P*)，其中*P*为可并行模块的百分比，*S*为并行模块的局部加速比，*A*为全局加速比。阿姆达尔定律对应的加速比计算公式如下：

(1)

假设局部加速比*S*趋向∞，理论峰值加速比公式如下：

(2)

根据阿姆达尔定律公式，可以初步估算骨骼动画并行优化之后的理论峰值加速比。CPU计算顶点这一性能瓶颈占全部时间的比例约为*P*=80%，剩余部分只占1-*P*=20%。根据公式2得出理论峰值加速比为5。

本文研究基于OpenCL的骨骼动画CPU并行方法，并与SSE叠加OpenMP的传统并行方法展开对比，从中选取较优方案。

1. 骨骼动画串行算法
   1. 算法描述

骨骼动画渲染过程可以划分为以下四个环节，每个环节作为一个独立的子模块，四个环节分别是：1)从文件解析动画数据主要包括骨骼关节矩阵和顶点坐标；2)更新关节矩阵；3）更新顶点坐标；4）以三维面片的方式输出顶点坐标最终形成三维动画。

第三环节更新顶点坐标，占用大部分的完整渲染时间。该环节是骨骼动画的性能瓶颈，本文重点关注这个环节。本文采用矩阵调色板这一顶点更新算法，骨骼动画顶点更新算法如下：

1）动画模型具有*T*个三角面片，每个三角面片以3个索引值代表，索引值指向某个顶点；

2）获取1个三角面片；

3）获取1个顶点索引，通过该索引获取顶点信息，包括1个坐标(*x,y,z*)和*B*个骨骼索引及对应的权重索引；

4）对每个顶点调用矩阵调色板算法；



5）返回步骤3，重复步骤3~4，直到遍历完一个面片的3个顶点；

6）返回步骤2，重复步骤2~5，直到遍历完所有面片。

矩阵调色板算法描述如下：

1）读入1个顶点(*x,y,z*)，读入*M*个骨骼关节构成变换矩阵列表mL，每个顶点绑定*B*个关节，索引和权重分别是*d(i)*，*w(i)*，*i*=1,2…*B*。

2）为每个顶点求取融合矩阵*m*，*m*是4\*4的矩阵，其中包含对顶点的旋转平移缩放信息。*m*由顶点绑定多个骨骼的多个矩阵加权求和得到，计算公式如下：

*m* = (3)

3）按照以下坐标变换公式为每个顶点进行坐标变换。

= \*

= (4)

* 1. 串行实现与瓶颈定位

骨骼动画顶点更新模块以及内嵌的矩阵调色板算法的串行版本流程图如图1所示。

问题规模相关的数据复杂度不一样时，各个子模块的时间分布会有所不同，瓶颈的位置和大小也会不一样。本文采用骨骼动画数据的顶点数目为0.1M，即百万级别；单个顶点绑定骨骼的数目设定为2；采用的CPU是Intel i7 3770k。

通过测量算法各个模块的时间分布可以看到，耗时最大的模块是CPU计算顶点这一模块，比例是84%，说明它是整个算法的性能瓶颈。另外CPU计算骨骼虽然算法比较复杂但是所占时间比例极小，没有优化的必要。在进行瓶颈定位和并行优化之前，还需要对算法进行串行优化，使它更加符合并行运算的特点。并行运算特别适用于以下类型的算法：结构方面，适于顺序语句不适于循环嵌套以及分支；索引方面，适于相邻索引是连续地址的情形，不适于随机地址索引；函数调用方面，适于少量或没有函数调用，不适于频繁或嵌套调用函数。根据以上原则，从矩阵变换模块算法可以看到，算法中存在多重嵌套循环和多处随机索引，其中多重循环嵌套是面片循环和顶点循环以及更深层的骨骼循环，随机索引包括顶点随机索引和骨骼随机索引。对算法进行初步改进，使得串行代码本身获取最优性能，在此基础上进行后文的并行优化。串行优化后，CPU计算顶点所占时间比例是81%，仍然是整个算法的性能瓶颈。

图1 骨骼动画顶点更新和矩阵调色板算法流程图

1. 传统SSE并行
   1. SSE指令并行

SSE指令早在1999年的Pentium 3与2000年的Pentium 4处理器中已经被采用，所以说现在的绝大多数处理器都支持SSE指令集。为了支持SSE操作并发挥最优性能，SSE所访问的内存必须是按照16字节对齐，骨骼动画的顶点及矩阵对应的指针通过\_aligned\_malloc/\_aligned\_free 进行堆内存的动态分配和释放，对于静态数组，需要用到指示符" \_\_declspec(align(16))"将数组显示声明16字节对齐。16字节对齐并不是强制的，SSE提供另一套支持非对齐的内存读写指令，只是性能不如对齐方式（下降10%）。

本文采用SSE指令并行技术，改造矩阵调色板算法，主要做以下2方面的修改：

第一处修改，矩阵按权重累加：

for (int j=0;j<16;j++)

{// pMatOne代表单个矩阵

pMatLast[j] += pMatOne[j] \* weight;

}

改为：

for (int j=0;j<4;j++)

{// pMatOne代表单个矩阵

pMatLast[j] = \_mm\_add\_ps(pMatLast[j], \_mm\_mul\_ps( pMatOne[j], weight) );

}

第二处修改，坐标矩阵变换：

void dotMultiplyMatrix43( float\* pMatLast, float\* pIn , float\* pOut)

{

pOut[0] =pMatLast [0\*4+0] \* pIn[0] +pMatLast [1\*4+0] \* pIn[1] + pMatLast [2\*4+0] \* pIn[2] +pMatLast [3\*4+0];

pOut[1] = … ; pOut[2] = … ;

}

改为：

\_\_m128 dotMultiplyMatrix43( \_\_m128\* pMatLast, \_\_m128& pIn )

{

// 构造 (x, x, x, x) (y, y, y, y) (z, z, z, z)

\_\_m128 xxxx =\_mm\_shuffle\_ps( pIn, pIn, \_MM\_SHUFFLE(0,0,0,0) ); //y, z同理

// 计算 m0 \* xxxx + m1 \* yyyy + m2 \* zzzz \* m3

// 因为SSE不支持多项式连续相加，所以拆成多步

\_\_m128 tmp0 = \_mm\_mul\_ps( pMatLast[0], xxxx ); //y, z同理

\_\_m128 result = \_mm\_add\_ps(tmp0, tmp1); //再加tmp2 m[3] return result;

}

* 1. OpenMP线程并行

若要发挥OpenMP多线程的并行加速能力，算法应符合以下特征。首先，线程之间很少通信或没有通信，避免线程依赖，一个线程等待另一线程的运行结果；其次，线程之间数据共享很少或没有共享，避免因资源竞争导致线程处于等待状态耗费时间，尽量通过private子句将多线程外部引入的全局变量私有化；第三，相邻线程的数据访问地址最好连续或相近，充分发挥cache缓存数据的预读和重用效率。本文研究的骨骼动画矩阵调色板算法，相邻面片和顶点之间没有通信和数据共享，而且数据存储结构紧凑，数据结构和算法都符合OpenMP的并行要求。在Windows 7操作系统下通过VC语言调用OpenMP实现算法的多线程转化，转化后的多线程算法可以很方便地移植和重用。调用OpenMP无需额外的库，只需在编译时添加编译选项"/openmp"，或在VC工程属性中开启"OpenMP Support"设置，该设置位于C/C++语言Language页面，将"OpenMP Support"由默认的"No"改为"Yes"。接着在需要执行多线程的文件头引入”omp.h”，接着就可以调用OpenMP提供的API方法和#pragma omp系列宏指令，这些方法包括修改线程数目、获取线程id等等，#pragma omp指令控制多线程的启停。OpenMP最常用的一个场合是并行执行循环，将循环体拆分到多个线程同步并行执行，实现这种多线程，只需要调用一条#pragma omp指令，即在for语句前一行调用"#pragma omp parallel for "。

本文对骨骼动画矩阵调色板执行多线程算法改进，开启OpenMP设置，在for循环调用omp parallel宏，关键改动在于：在遍历每个顶点的循环体前面，使用宏指令”#pragma omp parallel for”。OpenMP可以单独使用作为线程并行方案，也可以叠加之前的SSE指令并行形成组合方案。

1. 新兴OpenCL并行

面向CPU的OpenCL并行方案，具体底层的实现隐式调用传统的多线程并行及多指令并行，但编程人员只需按OpenCL规范编写程序，无需手动调用之前的多线程（例如OpenMP）以及多指令（例如SSE）。OpenCL跟之前用到的OpenMP和SSE并行技术在性能上普遍存在差异，另外之前技术不用另外安装第三方库，编译环境内置支持，只要开启编译选项并包含头文件，在代码中就可以调用OpenMP和SSE的功能API。而OpenCL必须安装设备驱动和软件开发包SDK，本文选用Intel(R) SDK for OpenCL Applications 2013。因为OpenCL是开放标准，同一台系统里面可以安装多套OpenCL驱动和SDK，比如Intel OpenCL、AMD OpenCL、NVIDIA OpenCL。clGetPlatformIDs可以获取已经安装OpenCL的数目以及详细信息，当数目为0时，说明未安装OpenCL；当数目不为0时，按照需要选用特定的某套OpenCL，比如本文选用"Intel(R) OpenCL"。

调用OpenCL之前，需要初始化OpenCL运行环境。初始化对于不同工程差别不大，主要选定OpenCL驱动类型、选定CPU或是GPU、指定cl文件及kernel函数名。初始化完成后，接下来设计kernel函数，设计过程可以参照SSE算法版本。

* 1. 常规OpenCL并行

先实现单骨骼情况，即每一个顶点只关联1块骨骼，坐标变换时只有一次矩阵变换。OpenCL的kernel函数实现如下：

\_\_kernel void

transformVectorByMatrix4(\_\_global float4 \*pIn, \_\_global int \*pIndex,\_\_constant float4 \*pMatrix,\_\_global float4 \*pOut)

{

// 顶点索引

size\_t index = get\_global\_id(0) + get\_global\_id(1) \*get\_global\_size(0);

// 矩阵索引，每个矩阵由4个flaot4组成

int offset = pIndex[index]\*4;

// (x,y,z,1) 拆分为(x,x,x,x) 、 (y,y,y,y) 、(z,z,z,z)

float4 pIn = pIn [index];

float4 xxxx = (float4)(pIn.x, pIn.x, pIn.x, pIn.x);//y, z同理

// 矩阵变换，多项式相乘累加

pOut [index] = xxxx \* pMatrix[offset+0] + yyyy \* pMatrix[offset+1] + zzzz \* pMatrix[offset+2] + pMatrix[offset+3];

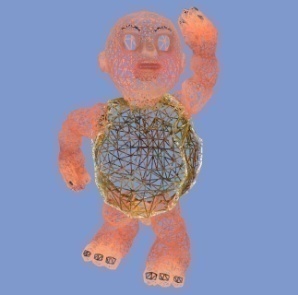
}

以上算法跟之前的SSE算法非常相似，对比算法不同之处主要有如下两点：

1）SSE的128字节数据类型\_\_m128，在OpenCL对应float4；SSE给\_\_m128赋值时采用\_mm\_load\_ps指令，OpenCL给float4赋值时采用(float4)(x,y,z,w)；

2）SSE因为不支持多项式相加所以需要通过宏模拟，而OpenCL直接支持多项式相乘累加，OpenCL算法非常简洁，拥有很高的可读性和可维护性。

对于每个顶点关联多个骨骼的情况，在获取变换矩阵时，需要索引多个矩阵，按照权重累加。所以在kernel参数列表中需要添加矩阵索引和权重，在kernel函数体中仿照SSE按权重累加矩阵即可。

OpenCL执行之前，除了指定供OpenCL设备调用的指令代码以外，还需指定工作线程结构workgroup/workitem，包括全局Global WorkSize和局部Local WorkSize。它们都支持2到3维，一般只设置GlobalWorkSize，设置时每个维度支持最大数目不同，通过clGetKernelWorkGroupInfo可以动态检测到这个值，各个维度乘积大于线程总需求量即可，本文采用二维线程结构，第一维设置为最大值，第二维用总顶点数除于最大值；而Local WorkSize采用系统默认设置。kernel并行指令、数据参数以及并行参数设好后，在主机端host调用clEnqueueNDRangeKernel将kernel编排的指令任务发布到OpenCL并行设备端。该指令调用属于异步调用，即调用后主机端所在CPU线程不等待设备处理结果，CPU接着执行下一句指令。在测量时间或者需要把处理结果返回内存时，需要等到设备端的指令彻底执行完成，可以调用clWaitForEvents阻塞主机端线程使之进入空闲等待状态。

* 1. 与OpenGL互操作

为了优化骨骼动画渲染和数据传输的效率，本文采用OpenCL与OpenGL的互操作特性(Interoperability)，共享顶点缓存对象(Vertex Buffer Object, VBO)等存储对象(Memory Object)。先检测当前环境是否支持CL-GL互操作，检测步骤如下：1）因为互操作性属于OpenCL 1.2扩展，并不是OpenCL核心功能，所以需要动态获取clGetGL- ContextInfoKHR功能函数的实际地址，如果获取成功，说明支持CL-GL互操作；2）通过OpenCL扩展接口clGetGLContextInfoKHR获取某个特定的OpenCL设备cl\_device\_id，该设备支持互操作；3）最后通过clCreateContext创建OpenCL上下文cl\_context。

检测并开启OpenCL-OpenGL互操作以后，需要修改常规OpenCL算法以实现互操作。互操作主要体现在内存空间上面，即OpenCL设备内存cl\_mem与OpenGL设备内存Buffer Object。为了支持内存共享以及互操作，在OpenGL和OpenCL两端都需要做相应的调整。在OpenGL端，需要改变OpenGL渲染数据的存储方式。原先是立即存储方式，即存在主机端内存，每次渲染时发送到OpenGL设备；现在要改为Vertex Buffer Object(VBO)方式，数据一直存在OpenGL设备，而且可以通过VBO的Buffer资源ID进行读写访问。本文将骨骼动画顶点数据存储在VBO当中，创建VBO的同时通过clCreateFromGLBuffer映射一块OpenCL内存cl \_mem，VBO和cl \_mem共享顶点数据。当顶点需要通过OpenCL更新时，通过clEnqueueAcquireGL -Objects获取数据，修改完成后通过clEnqueueReleaseGL -Objects返还给VBO。

通过在OpenGL和OpenCL分别进行以上改造，从2个方面对算法性能进行了改进。一方面，使得OpenGL和OpenCL之间可以共享数据，即实现了OpenGL的VBO与OpenCL的cl\_mem之间的双向转化，从而免去主机端参与中转，可以节省数据传输时间；另一方面，因为采用VBO渲染方式，所以提升了渲染性能。

4 动画仿真实验

4.1 并行方案对照

本文实验数据即骨骼动画数据的规格如下：顶点数目为0.1M，即百万级别；骨骼关节点的数目为77；单个顶点绑定骨骼的数目设定为2。实验平台配置如下：CPU——Intel i7 3770K，GPU——NVIDIA Geforce GTX 670。骨骼动画渲染效果如图2。

图2小海龟角色动画渲染效果

本文在骨骼动画矩阵调色板串行算法的基础上，面向CPU设计了5套互为对照的并行版本，其中3套基于传统并行技术，2套基于新兴并行技术。前3套分别是OpenMP多线程并行、SSE多指令并行、SSE与OpenMP叠加并行，后2套分别是常规OpenCL并行、与OpenGL互操作的OpenCL并行。

如图3所示，5套并行算法在选定的数据和平台上运行，统计得到5组并行加速比。从以上实验结果图得知：1）与OpenGL互操作的OpenCL版本(OpenCL GL-inter)，算法性能最优，选定为最终的OpenCL方案；2）SSE叠加OpenMP并行版本在3种传统并行方案中，算法性能较优，选定为传统并行方案；3）新的OpenCL并行方案与传统并行方案相比，加速比从3.3提升到6.2，增幅达88%，同时CPU占用率从99%降到18%。

本文为SSE和OpenCL都做了优化。在SSE多指令并行的基础上进一步叠加OpenMP多线程并行，加速比从2.5提升到3.3，增幅达30%；OpenCL通过与OpenGL互操作得到优化，从3.5提升到6.2，增幅达77%，

4.2 并行可移植性

可移植的空间范围分布于不同品牌不同型号的多核处理器硬件平台之间，包括CPU、GPU和其它并行设备。本文研究的移植空间限于不同品牌不同型号的CPU处理器。 本文选定3组硬件进行对照实验，其中2款同品牌不同型号的Intel CPU，外加1款AMD CPU，体现跨越硬件品牌和型号的可移植性。在每组硬件上，源码无差别地分别运行SSE并行和OpenCL并行这2套骨骼动画并行算法。

如图4实验结果可知，对于不同品牌不同型号CPU，OpenCL版本的骨骼动画渲染算法拥有2.7~6.2倍的加速比。说明OpenCL具有较好的功能和性能可移植性。OpenCL性能在Intel品牌的CPU上高于SSE，提升幅度20%~88%，但在AMD CPU上，OpenCL性能比SSE低40%。

图3 骨骼动画对比5组并行算法的加速比

图4 骨骼动画对比3组CPU的加速比

4.2 数据复杂度对比

数据复杂度由以下2个参数决定，包括单个模型内每个顶点绑定的骨骼数目、单个模型的顶点数目。本文为2个参数分别设定4个数量级，单个顶点绑定的骨骼数为1至4，顶点数范围为25k~1600k，交织在一起组成4乘4矩阵共16组不同复杂度的数据。测量在16组数据下的OpenCL加速比和SSE加速比，并统计OpenCL相对SSE加速比的增幅。

从实验数据表1可以看出，OpenCL并行算法相对串行算法具有绝对性能加速能力。从表2得出结论，OpenCL的性能普遍比 SSE更高。OpenCL的绝对加速比以及相对SSE的加速比增幅一同随着数据复杂度的提升而提升。OpenCL加速比范围在1.9~9.1之间，OpenCL相对SSE的加速比增幅在33%~179%之间。

表1 骨骼动画对比16组数据的OpenCL加速比

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 顶点  骨 数  骼数 | 25k | 100k | 400k | 1600k |
| 1 | 1.9 | 1.9 | 3.4 | 2.7 |
| 2 | 3.4 | 6.2 | 7.9 | 7.6 |
| 3 | 3.9 | 7.2 | 8.0 | 8.3 |
| 4 | 4.5 | 7.7 | 8.7 | 9.1 |

表2 骨骼动画对比16组数据的OpenCL相对SSE加速比增幅

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 顶点  骨 数  骼数 | 25k | 100k | 400k | 1600k |
| 1 | 33% | 56% | 179% | 152% |
| 2 | 41% | 88% | 161% | 143% |
| 3 | 63% | 96% | 136% | 144% |
| 4 | 77% | 82% | 119% | 125% |

5 结论

为了解决骨骼动画的性能问题，国内外学者普遍聚焦GPU并行，缺少骨骼动画CPU并行方法的研究。本文为骨骼动画面向CPU设计了基于SSE的传统并行方案和基于OpenCL的新兴并行方案，并展开对比研究，寻求较优方案。本文发现，在多数CPU和多种复杂度的数据上，新兴并行方案相比传统并行方案，在性能上有大幅度的增长，并且提升幅度随着骨骼和皮肤复杂度的提升而进一步增长。在多品牌多型号的多核CPU上，OpenCL版本的骨骼动画算法在功能和性能两方面都保持良好的可移植性。

研究CPU上的并行方法，一方面可以作为GPU并行方法的备用方法，另一方面有助于探寻CPU最高性能从而为GPU提供基准。本文接下来将对比研究GPU并行技术。

**参考文献：**

[1] Kavan L. Real-time Skeletal Animation[D]. Prague: Czech Technical University, 2007.

[2] 赵维，谢晓方. 虚拟人技术发展现状及其在工程中的应用[J]. 系统仿真学报, 2009(17): 5473-5476.

[3] Burtnyk N, Wein M. Interactive skeleton techniques for enhancing motion dynamics in key frame animation[J]. Communications of the ACM(S0001-0782), 1976, 19(10): 564-569.

[4] Chafi H, Sujeeth A K, Brown K J, et al. A domain-specific approach to heterogeneous parallelism[C]// Proceedings of the 16th ACM symposium on Principles and practice of parallel programming. ACM, 2011.35-46

[5] Brown K J, Sujeeth A K, Lee H J, et al. A heterogeneous parallel framework for domain-specific languages[C]// Parallel Architectures and Compilation Techniques (PACT). 2011.89-100

[6] Ismail L G D. Performance evaluation of convolution on the Cell Broadband Engine processor[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems(S1045-9219), 2011, 22(2): 337-351.

[7] Lindholm E, Kilgard M J, Moreton H. A user-programmable vertex engine[C]// Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. ACM, 2001.149-158

[8] 季卓尔，张景峤. 基于可编程 GPU 的骨骼动画[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(22): 77-80.

[9] 胡前亮，陈炳发. 一种采用CUDA的骨骼动画阴影实时仿真方法[J]. 小型微型计算机系统, 2011, 32(1).

[10] 郝爱民，赵永涛，吴伟和，等. 任意姿态虚拟人网格模型骨骼提取算法[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(6): 1008-1014.

[11] 刘登志. 人体角色的自动绑定与卡通运动[D]. 浙江大学, 2011.

[12] Han-Bing Y, Shi-Min H, Martin R R, et al. Shape Deformation Using a Skeleton to Drive Simplex Transformations[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics(S1077-2626), 2008, 14(3): 693-706.

[13] Lee V W, Kim C, Chhugani J, et al. Debunking the 100X GPU vs. CPU myth: an evaluation of throughput computing on CPU and GPU[C]// ACM SIGARCH Computer Architecture News. ACM, 2010.451-460

[14] Shi G, Li M, Lipasti M. Accelerating search and recognition workloads with SSE 4.2 string and text processing instructions[C]// Performance Analysis of Systems and Software (ISPASS), 2011 IEEE International Symposium on. IEEE, 2011.145-153

[15] Jie S, Jianbin F, Sips H, et al. Performance Gaps between OpenMP and OpenCL for Multi-core CPUs[C]// Parallel Processing Workshops (ICPPW), 2012 41st International Conference on. Pittsburgh, PA: 2012.116-125

[16] Pennycook S J, Hammond S D, Wright S A, et al. An investigation of the performance portability of OpenCL[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing(S0743-7315), 2012: 1-12.

[17] Khronos. The OpenCL Specification[EB/OL].(2012)[2012-11-14]. http://www.khronos.org/registry/cl/specs/opencl-1.2.pdf.

[18] Du P, Weber R, Luszczek P, et al. From CUDA to OpenCL: Towards a performance-portable solution for multi-platform GPU programming[J]. Parallel Computing(S0167-8191), 2012, 38(8): 391-407.

[19] Sun X, Chen Y. Reevaluating Amdahl’s law in the multicore era[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing(S0743-7315), 2010, 70(2): 183-188.

1. 收稿日期：xxxx-xx-xx 修回日期：xxxx-xx-xx

   基金项目：国家海洋局数字海洋科学技术重点实验室开放基金（KLDO201303）

   作者简介：刘寿生(1985-), 男, 江西宁都人, 汉族, 博士生, 研究方向为虚拟现实、并行计算、高性能； 陈戈(1965-), 男, 浙江宁波人, 汉族, 博士, 教授, 博导, 研究方向为海洋遥感、地理信息系统、虚拟现实； 马纯永(1984-), 男, 山东潍坊人, 汉族, 博士, 讲师, 研究方向为虚拟现实； 韩勇(1969-), 男, 陕西商南人, 汉族, 博士, 教授, 研究方向为虚拟地理环境、海洋地理信息系统； [↑](#footnote-ref-2)