# 时变三维标量场并行计算与绘制框架研究

于荣欢<sup>1</sup> 邓宝松<sup>3</sup> 吴玲达<sup>1,2</sup> 瞿 师<sup>1</sup>

(国防科技大学信息系统工程重点实验室 长沙 410073)1

(装备指挥技术学院重点实验室 北京 101416)<sup>2</sup> (总后后勤科学研究所 北京 101416)<sup>3</sup>

摘 要 针对时变三维标量的计算与绘制特点,结合 Sort-Last 和 Sort-First 两种并行模式提出了一种基于任务重分 配的三维标量场并行计算与绘制框架。在并行计算阶段采用基于内容的任务分配方式;在并行绘制阶段采用基于图 像空间的任务分配方式。仿真试验结果表明,本并行计算与绘制框架能够有效提高时变三维标量场并行计算与绘制 系统的帧率稳定性和绘制效率。

关键词 三维标量场,并行计算,并行绘制,负载平衡

中图法分类号 TP391 文献标识码 A

#### Parallel Computing and Rendering Framework of Time Variable 3D Scalar Fields

YU Rong-huan<sup>1</sup> DENG Bao-song<sup>3</sup> WU Ling-da<sup>1,2</sup> QU Shi<sup>1</sup>

(Information Systems Engineering Key Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)<sup>1</sup> (The Key Lab, Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 101416, China)<sup>2</sup>

(Institute of Logistics Science, General Logistics Department, Beijing 101416, China)<sup>3</sup>

**Abstract** According to the characters of time variable 3D scalar fields, a parallel computing and parallel rendering framework combining sort-first and sort-last parallel rendering method was proposed. This framework adopts scene task distribution in parallel computing step and adopts screen distribution in parallel rendering step. The experiments show that this framework can effectively improve the stability and capability of the parallel computing and rendering.

Keywords 3D scalar fields, Parallel computing, Parallel rendering, Load balancing

三维标量场是指场中每一个点的属性值都可以以一个标 量来表示的空间场。时变三维标量场是标量场中场值随时间 实时变化的三维标量场(如温度场、电磁场等)。时变三维标 量场的实时计算与可视化是科学计算可视化的重要研究内 容,在医学、物理学和工程学等领域具有广泛的应用背景。

三维标量场的实时变化对其可视化提出了较高要求,且 随着数据采集设备的不断发展和人们对数据精度要求的不断 提高,三维标量场的规模以惊人的速度增长。虽然近年来计 算机的计算与图形处理能力也得到了长足的进展,但是相对 于数据增长速度而言,其处理能力还远不能满足实际应用的 需要。近年来,随着并行绘制技术的发展,将并行绘制引入到 三维标量场计算与可视化中,已经成为了三维标量场可视化 的一个重要研究方向。

传统的较为常用的并行绘制机制有 sort-first 和 sort-last 两种。本文主要工作是在这两种并行绘制机制的基础上,针 对时变三维标量场的特点,提出了一个时变三维标量场并行 计算与绘制框架,并通过实验对本文框架和两种传统并行绘 制机制进行对比分析。

## 1 三维标量场并行计算

1.1 三维标量场

三维标量场是指笛卡尔坐标系中某一区域在 3 个坐标方

向上进行均匀采样得到的标量数据场,如图1所示。



#### 图1 三维标量场

三维标量场中每一个采样点均指定一个标量值,在不同 的场中其值代表的意义不同。一般而言,三维标量场在同一 坐标方向上的采样距离是相同的。在实际生活中,一部分三 维标量场来自实测数据,如医学中的 CT 扫描、核磁共振结 果、气象中的实测风场等;一部分三维标量场来自仿真计算, 如电磁环境仿真计算结果、气象仿真计算结果等。

1.2 三维标量场并行计算技术

所谓并行,是指一个以上的事件在同一时刻或同一时间 段内发生。并行计算就是利用多处理器或多计算机将进程相 对独立地分配于不同的节点上,由各自独立的操作系统调度 享有独立的 CPU 和内存资源(内存可以共享),进程间通过消 息传递信息。

对于并行计算来说,任务分配是算法的基础与先决条件, 任务分配的优劣将直接影响并行计算算法的性能。在三维标

到稿日期:2011-04-02 返修日期:2011-06-03 本文受军队"十二五"装备预先研究项目资助。

于荣欢(1983一),男,博士生,主要研究方向为多媒体与虚拟现实技术,E-mail:yrh1983@163.com;吴玲达(1962一),女,博士,教授,主要研究方 向为多媒体与虚拟现实技术;瞿 师(1982一),男,博士生,主要研究方向为多媒体与虚拟现实技术。 量场中,由于其各采样点的计算复杂度一般会随其位置不同 而有所不同,因此本文采用八叉树分割法对计算任务进行等 块划分,如图 2 所示。



图 2 基于八叉树的标量场分割

在任务分配过程中,负载平衡是判断分配结果优劣的重要因素。负载平衡满足水桶原理,即并行系统的性能由系统 中负载最重的节点决定。为使各节点的计算量尽量达到平衡,需考虑计算量在各计算节点之间的合理分配。基于八叉 树分割的特点,本文拟将八叉树的叶子节点按照先序遍历的 方式依次循环地分配给各计算节点,如图 3 所示。



这样就可以保证无论场景地形的复杂度、气象以及雷达 的分布如何变化,都可以使各计算节点尽量达到负载平衡。 当然,区域剖分越细,负载平衡越好,但同时增加了任务分配 的计算量和网络的通讯量。图 4 为场景分配结果图。



### 图 4 三维标量场分配结果

同一种颜色被分配到相同的计算节点。由图可见,每个 计算节点所包含的分割区域都均匀地分配到了计算区域的各 个部分。所以当分割层次够细时,各计算节点的任务分配都 是相对均匀的。

## 2 并行体绘制技术

#### 2.1 直接体绘制技术

对于三维空间标量场,其可视化方法大致分为两大类:面 绘制和直接体绘制。面绘制适用于绘制表面特征分明的数据 场(如组织和器官),对过渡平缓的体数据绘制效果不佳。而 且,面绘制只能显示物质的轮廓信息,内部信息无法保留。光 线投射直接体绘制算法最先由 Levoy 和 Drebin 等人于 1988 年提出,随着算法的不断改进以及计算机图形技术的发展,该 算法已经成为三维数据场可视化的一种重要方法。它在一定 程度上脱离了传统图形学点、线、面的束缚,对象不再是以点、 线、面等传统图形学表示形体的方法组成的三维实体,而是由 体素作为基本的单元,数据场是由大量的体素组成的。此类 数据场的绘制方法不同于传统的面绘制方法。直接体绘制算 法采用体光照模型直接从三维数据场中绘制出各类物理量的 分布情况,基本原理如图 5 所示。



图 5 直接体绘制

从视点出发通过投影图像平面的每一像素产生一条投射 光线,在投射光线与三维体数据相交的部分采用等间隔采样 方式,利用三线性插值方式计算各采样数据值。根据采样到 的数据值从颜色映射传递函数中获取颜色值,并与之前采样 到的数据颜色值按照从前往后的方式累积颜色。最后将最终 的累积颜色设定为该像素点的颜色,这种方法能产生高质量 的图像。

与面绘制方法相比,直接体绘制免去了面绘制中构造几 何多边形等表面的中间过程。它可以使用来自一个物体的表 面和内部的数据,而不仅仅显示等值面上的数据,也就是无须 进行分割即可直接进行绘制,有利于保留三维体数据的细节 信息,增强整体的绘制效果。典型体绘制算法有光线投射法、 Splatting 体绘制算法、基于错切-变形技术(Shear-Warp)的体 绘制算法和体元投射法等。本文主要针对光线投射算法进行 研究。虽然直接体绘制方法比面绘制方法更能表现三维体数 据的信息,但是直接体绘制方法算法更为复杂,绘制效率很 低,因此需要借助并行绘制技术来提高直接体绘制的效 率<sup>[1,2]</sup>。

### 2.2 并行体绘制技术

针对单---图形硬件绘制能力的不足,并行绘制技术(parallel rendering)提供了一种高性能的图形绘制解决方案。所 谓并行绘制,是相对于串行绘制而言,指利用多个图形硬件或 图形绘制流水线,使用它们累加的绘制能力来完成绘制任务 的技术。从 20 世纪 90 年代开始,并行图形绘制技术经历了 十几年的探索和发展过程,现在已经逐渐走向成熟。

并行绘制技术的基础是绘制流水线内在的可并行性。图 形处理过程通常采用绘制流水线模型进行描述。所谓绘制流 水线与 CPU 流水线的概念相似,它将整个图形处理过程划分 为多个流水阶段,以流水作业的方式分阶段实现图形计算。 理论上,将多条绘制流水线并列运行,就可以实现并行绘制系 统。绘制流水线主要由几何处理(G)和光栅化(R)两个部分 组成。几何处理包括模型场景变换、光照处理等步骤,它的任 务是将几何图元从物理空间的三维坐标转换到屏幕空间的二 维坐标,并计算顶点的颜色、深度等属性。光栅化的任务是由 图元的屏幕坐标和顶点属性计算出屏幕像素值,并存入帧缓 存。

Molnar 等人根据并行图形绘制任务划分的阶段与典型 图形流水线的关系,按照场景数据归属判断(Sorting)的时机, 将并行图形绘制系统划分为 Sort-First、Sort-Middle 和 Sort-Last 3 种<sup>[3]</sup>,如图 6 所示。

其中 Sort-First 并行图形绘制系统是在几何处理器(G) 之前按屏幕划分进行场景数据的归属判断; Sort-Middle 系统 在几何处理器之后、光栅化处理器(R)之前进行; Sort-Last 系 统<sup>[4]</sup>按照场景内容进行划分,在光栅化处理器之后进行合成。



#### 图 6 3 种并行绘制模型

在并行绘制系统中,负载平衡算法是影响并行绘制系统 绘制性能的关键。三维标量场的直接体绘制,由于其根据图 像空间进行投射的特性,可以较好地适用于 Sort-First 并行 绘制系统。在 Sort-First 并行绘制系统中,基于图像空间的 划分容易因为场景在屏幕上分布不均匀而导致负载不平衡, 因此必须较好地设计其绘制负载平衡算法。

按照图像空间划分是否固定或者是否固定地分配给特定 的绘制节,基于图像空间的负载平衡算法可以分为静态、动态 和自适应3种。其中静态负载平衡算法基本原理如图7所 示。



图 7 静态负载平衡算法

静态负载平衡算法将屏幕划分为一些相等的子区域,一 般子区域的数目大于绘制节点的数目。这些子区域间隔地分 配给各绘制节点,这就使得每个绘制节点的绘制区域分散在 屏幕上,最大限度地使得各绘制节点的负载趋向于平衡。屏 幕划分越细,平衡效果越好。图中所示为4个绘制节点下屏 幕划分为8块与64块时的分配情况,同一颜色的子区域分配 到同一绘制节点。

对于三维标量场,其计算区域为一矩形。在绘制过程中, 其在投影屏面的二维投影相对比较集中。基于这一特点,本 文在静态复杂平衡算法的基础上,提出了一种基于三维标量 场包围盒投影的区域静态负载平衡算法,其基本原理如图 8



图 8 基于包围盒投影区域的静态负载平衡算法

通常体数据包围盒只占投影屏幕的一部分,因此只有在 这一区域才进行直接体绘制计算。所以只需要对此区域进行 任务划分,考虑到任务划分的计算量,划分时只需计算包围盒 8个顶点在投影屏幕上的位置并计算这些投影点的二维包围 盒即可。图 8为4个绘制节点情况下 view1和 view2 两个视 点时场景区域的任务划分和分配情况,其中不同的颜色块被 分配给了不同的绘制节点。由上可见,基于包围盒投影区域 的静态负载平衡算法,能够有效地减少图像合成时各绘 制节点间的数据通讯量和图像合成计算量,提高系统的并行 绘制效率。

## 3 三维标量场并行计算与绘制技术

### 3.1 三维标量场并行计算与绘制框架

如何有效地将并行计算与并行绘制结合,以满足系统运 行的实时性,是三维标量场并行计算与绘制框架设计的关键。 在并行计算时,由于各采样点相对独立,因此必须按照场景内 容进行划分,才能够达到有效的负载平衡。然而,在并行绘制 中,如果采用按照场景内容进行划分的并行绘制模式即 Sort-Last 模式,由于各节点分配任务在屏幕上的投影是不确定 的,因此在体绘制时各节点必须对整个屏幕进行光线投射。 同时,在图像合成时必须采用全屏幕深度合成的方式。这不 仅大大增加了各绘制节点的绘制计算量,同时,也大大增加了 各节点间的通信量,因此在并行绘制时不能采用并行计算时 的任务分配结果,必须对并行绘制任务按照图像空间进行重 新分配。其基本架构如图9所示。



图 9 三维标量场并行计算与绘制框架

框架分为并行计算和并行绘制两个主要的阶段。在并行 计算阶段,参照1.2节中八叉树分割法对并行计算进行任务 划分与分配。并行计算完成后,为满足并行绘制阶段基于图 像空间的绘制任务划分,必须对各节点数据结果进行数据交 换,以使得各节点均具有完整的三维标量场数据。在数据交换中,为了尽可能地利用各并行节点,减少通信时间,本文提出了一种 Binary-Swap 数据交换算法。算法原理如图 10 所示。



图 10 Binary-Swap 数据交换算法

图中为 8 个节点时的 Binary-Swap 数据交换算法。每个 节点中的 8 个小格表示三维标量场被分为了 8 个任务区域, 其中有颜色填充的部分表示为此节点所属任务区域。在数据 交换时,如图 10 所示,第一步按照节点顺序进行两两数据交 换。这样经过第一步后,将会形成 4 对相同数据的节点。同 理,按照节点顺序对这 4 对节点进行两两数据交换。这样经 过 3 步数据交换后,数据会被传送至所有的节点。由此可见, Binary-Swap 数据交换算法可以充分利用各节点的数据传送 能力,有效提高数据交换效率。

数据交换完成后,进入并行绘制阶段。在此阶段,首先必须按照图像空间对绘制任务进行重新分配,分配算法参照2.1 节的基于三维标量场包围盒投影的区域静态负载平衡算法。 任务分配完成后,各节点按照所分配任务区域进行直接体绘 制渲染,最后绘制系统采用 Direct-Send 图像合成算法<sup>[5]</sup>对各 节点绘制任务图像进行合成,完成当前绘制。

3.2 算法步骤

参照三维标量场并行计算与绘制框架,其并行计算与绘 制具体算法步骤如下:

1) 各绘制节点加载场景任务与标量场计算所需数据;

2)按照场景内容采用八叉树分割法对场景进行计算任务 划分与分配;

3)各节点对所分配任务进行并行计算;

4)采用 Binary-Swap 算法对各节点计算结果进行数据交换,将计算结果传送至所有的节点;

5)面向图像空间,采用基于三维标量场包围盒投影的区 域静态负载平衡算法对并行绘制任务进行分配;

6)各节点采用直接体绘制算法进行并行绘制;

7)采用 Direct-Send 图像合成算法对绘制任务图像进行 合成;

8)绘制当前帧;

9)更新三维标量场计算所涉各参数;

10)转入第3)步,进入下一帧。

## 4 试验验证

为了验证本文算法的有效性,利用 Equalizer 并行绘制软件开发包<sup>[6]</sup>将算法在计算机集群(cluster)并行环境<sup>[7]</sup>中进行 了实现。实验集群环境共包含4台PC机,其中1台为控制 节点(CPU: Pentium 双核2.4G; GPU: GeForce 8600; 内存: 2G),另外3台为计算绘制子节点(CPU: Pentium 双核2.0G; GPU: GeForce 6600; 内存: 2G)。其中控制节点 PC 除了具有 控制节点全部功能外还兼具有一个计算绘制子节点的功能。 各节点通过千兆高速局域网进行连接。

实验采用某山区地域两个车载全方位天线工作下某频段 电磁场强分布的仿真数据,实验效果如图 11 所示。



图 11 不同时刻下电磁标量场并行计算与绘制结果

图 11 中的 4 幅图为同一场景下随着其中一部车载天线 的移动 t<sub>1</sub>-t<sub>4</sub> 4 个仿真时刻的三维电磁场并行计算与绘制结 果。其中控制节点除了分配计算与绘制任务外还负责地理环 境的绘制以及并行过程控制。

除了本文并行计算与绘制算法外,本文还对直接采用 Sort-Last 和 Sort-First 框架、只进行一次任务分配的并行计 算与绘制算法进行了编码实现。在同一视点漫游路径下,其 运行帧率与本文算法的比较如图 12 所示。



图 12 3 种算法绘制帧率比较

由图 12 可见,采用 Sort-Last 并行模式时,由于其采用基 于场景内容的任务分配模式,虽然能够较好地达到负载平衡, 保持绘制帧率的稳定性,但是由于在绘制时各节点均需对全 屏幕进行直接体绘制,且图像合成时必须采用全屏幕深度合 成的方式,故大大增加了系统的计算量和节点间的通信量,所 以其绘制帧率并不高。采用 Sort-First 并行模式时,由于其 采用基于图像空间的任务分配模式,在并行计算时负载平衡 性能较差,因此在某些特定视点下其负载平衡较好(如三维数 据场某一坐标与投影平面垂直时),能够达到很高的绘制帧 率。但是某些视点情况下其并行效率就很低,所以其帧率稳 定性较差。本文算法采用两次任务分配的方式,虽然增加了 一定的通信量和任务分配计算量,但是相对于全屏幕直接体 绘制和全屏幕深度合成而言,其计算量和通信量都是较少的, 所以具有较高的稳定绘制帧率。

结束语 本文针对三维标量场并行计算与绘制的特点, 在充分研究 Sort-Last 和 Sort-First 并行绘制模式的基础上, 提出了一种基于两次任务分配的三维标量场并行计算与绘制 框架。该框架充分考虑了三维标量场的计算与绘制特点,在 并行计算阶段采用基于内容的任务分配方式,在并行绘制阶 段采用基于图像空间的任务分配方式。并行框架在4节点的 计算机集群系统上进行了编码实验,结果表明本并行计算与 绘制框架能够有效提高三维标量场并行计算与绘制系统的帧 率稳定性和绘制效率。

## 参考文献

- Burger K, Kruger J, Westermann R. Direct Volume Editing[J].
  IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2008,14(6)
- [2] Ament M, Weiskopf D. Direct Interval Volume Visualization [J].
  IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2010, 16(6)

(下转第 205 页)

```
(x) \ge_{\mathcal{V}C} (x)
```

又因为 0 《  $\mu_{A}(x), \mu_{B}(x), \mu_{C}(x), \neg \mu_{B}(x), \nu_{B}(x), \nu_{B}(x),$   $\neg_{\mathcal{W}}(x)$  《 1,得  $\mu_{A}(x)$  《  $\mu_{C}(x)$  》  $\neg \mu_{B}(x) \land \neg_{\mathcal{W}}(x)$  》  $\nu_{B}(x),$  $\nu_{A}(x)$  》  $\nu_{C}(x) \land \mu_{B}(x).$ 

## 而

- $B \Rightarrow_{IFS} C$ 
  - $= \{ \langle x, \mu_{C}(x) \lor \neg \neg \mu_{B}(x) \land \neg \nu_{C}(x) \lor \nu_{B}(x), \mu_{B}(x) \land \\ \nu_{C}(x) \rangle | x \in U \}$
- $\langle \langle x, \mu_A(x), \nu_A(x) \rangle | x \in U \rangle$
- $\subseteq \{\langle x, \mu_{\mathcal{C}}(x) \lor \neg \mu_{\mathcal{B}}(x) \land \neg \nu_{\mathcal{C}}(x) \lor \nu_{\mathcal{B}}(x), \mu_{\mathcal{B}}(x) \land \\ \nu_{\mathcal{C}}(x) \rangle | x \in U \}$
- 所以,A⊆B⇒<sub>IFS</sub>C。

## 充分性

- $B \Rightarrow_{IFS} C$ 
  - $= \{ \langle x, \neg \mu_{B}(x) \land \neg v_{C}(x) \lor v_{B}(x) \lor \mu_{C}(x), \mu_{B}(x) \land v_{C}(x) \rangle x \in U \}$
  - $= \{ \langle x, (\neg \mu_{\mathsf{B}}(x) \lor \mu_{\mathsf{C}}(x)) \land (\neg v_{\mathsf{C}}(x) \lor v_{\mathsf{B}}(x)), \mu_{\mathsf{B}} \\ (x) \land v_{\mathsf{C}}(x) \rangle | x \in U \}$

由 A⊆B⇒<sub>FS</sub>C 得  $\mu_A(x) \leqslant \neg \mu_B(x) \lor \mu_C(x), \mu_A(x) \leqslant$ ¬ $v_C(x) \lor v_B(x), v_A(x) ≥ \mu_B(x) \land v_C(x).$ 

得 $\mu_A(x) \leqslant \mu_C(x), \mu_A(x) \leqslant v_B(x), \mu_B(x) \leqslant v_A(x), v_C(x) \leqslant v_A(x)$ (x)。

## 即

 $\{\langle x,\mu_A(x) \land \mu_B(x), v_A(x) \lor v_B(x) \rangle | x \in U\} \subseteq \{\langle x,\mu_C (x), v_C(x) \rangle | x \in U\}$ 

所以, $A \cap B \subseteq C$ 。

**定理 10** (*IFS*, *n*, 1<sub>*IFS*</sub>)是在 *IFS*上以 1<sub>*IFS*</sub>为单位元的 交换半群。

证明:(1) 单位元

- $A \cap 1_{\text{IFS}} = \{ \langle x, \mu_A(x) \land 1, v_A(x) \lor 0 \rangle | x \in U \} = A$
- $1_{HFS} \cap A = \{\langle x, 1 \land \mu_A(x), 0 \lor v_A(x) \rangle | x \in U\} = A$

- $(A \cap B) \cap C$ = { \langle x, (\mu\_A(x) \langle \mu\_B(x)) \langle \mu\_C(x), (\mu\_A(x) \langle \mu\_B(x)) \langle \mu\_C(x) \rangle | x \in U \rangle
  - $= \{ \langle x, \mu_A(x) \land (\mu_B(x) \land \mu_C(x)), \nu_A(x) \lor (\nu_B(x) \lor \nu_C (x)) \rangle | x \in U \}$ (x)))
  - $=A \cap (B \cap C)$
- (3) 交换律

(上接第 186 页)

- [3] Molnar S, Cox M, Ellsworth D, et al. A Sorting Classification of Parallel Rendering[J]. IEEE Computer Graph and Application, 1994,14(4):23-31
- [4] Cavin X, Mion C. Pipelined sort-last rendering; Scalability, performance and beyond [C] // Proceedings Eurographics Symposiumon Parallel Graphics and Visualization, 2006
- [5] Eilemann S. Direct Send Compositing for Parallel Sort-last Rendering

 $A \cap B = \{ \langle x, \mu_A(x) \land \mu_B(x), \nu_A(x) \lor \nu_B(x) \rangle | x \in U \}$ 

={⟨x,µB(x) ∧µA(x),VB(x) ∨VA(x)⟩|x∈U}=B∩A 根据定义 9 和定理 8-10 可知,(IFS,∩,⇒FS)是直觉模 糊剩余格。

**结束语** 直觉模糊是处理不精确、不确定性问题的重要 工具,在模糊推理、群决策等领域具有广阔的应用前景。本文 对直觉模糊蕴涵进行了研究。首先回顾了直觉模糊集的有关 知识,构造了一种新的广义的直觉模糊蕴涵,证明了其单调 性、边界性等重要性质,最后证明了该蕴涵可构成直觉模糊剩 余格,为直觉模糊逻辑的丰富和完善提供了理论基础。

# 参考文献

- Atanassov K. Intuitionstic fuzzy sets [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1986, 20:87-96
- [2] Zadeh L A, Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965(8): 338-385
- Bubaescu T. Some observations on intuitionistic fuzzy relations
  [M]. Itinerant Seminar on Functional Equations. Cluj- Napoca, 1989;111-118
- [4] Bustince H, Burllo P. Structures on intuitionistic fuzzy relations[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1996, 78(3): 293-303
- [5] Bustince H. Construction of intuitionistic fuzzy relation with predetermined properties[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 109 (3):379-403
- [6] 贺正洪,雷英杰,李景涛. 一种新的直觉模糊相似矩阵构造方法 [J]. 计算机工程与应用,2010,46(18),27-29
- [7] Zhou Lei, Wu Wei-zhi, Zhang Wen-xiu. On characterization of intuitionistic fuzzy rough set based on intuitionistic fuzzy implicators[J]. Information Sciences, 2009(179);883-898
- [8] Zhou Lei, Wu Wei-zhi. On generalized intuitionistic fuzzy rough approximation operators [J]. Information Sciences, 2008, 178: 2448-2465
- [9] 杨勇,朱晓钟,李廉.直觉模糊粗糙集的公理化[J].合肥工业大 学学报:自然科学版,2010,33(4):590-592
- [10] Beliakov G, Bustince H, Goswami D P, et al. On averaging operators for Atanassov's intuitionistic fuzzy sets[J]. Information Sciences, 2011(181):1116-1124
- [11] 徐小来, 雷英杰, 雷阳. 直觉模糊三角模的剩余蕴涵及其性质 [J]. 计算机科学, 2008, 35(11): 154-156
- [12] 李璧镜,王国俊. 广义三角模和广义剩余蕴涵之间的对应关系 [J]. 计算机工程与应用,2010,46(2):22-25
- [13] 王国俊. 非经典数理逻辑与近似推理[M]. 北京:科学出版社, 2000

[C]//Eurographics Symposium on Parallel Graphics and Visualization. 2007

- [6] Eilemann S. Equalizer: A Scalable Parallel Rendering Framework[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2009, 15(3)
- Soares L P, Raffin B, Jorge J A, PC Clusters for Virtual Reality[J].
  The International Journal of Virtual Reality, 2008, 7(1):67-80