

文章编号:1001-9081(2010)12-3284-04

## 基于 NS-2 的网络半实物仿真平台实现

许文强, 张国霞, 王新红, 刘富强

(同济大学电子与信息工程学院, 上海 200092)

(xenoven@gmail.com)

**摘要:** NS-2 是一款广泛使用的网络仿真软件, 但针对它的半实物仿真方法研究较少。针对这一问题, 通过实际实时业务流与虚拟仿真网络的映射, 提出并实现一种新的基于 NS-2 的网络半实物仿真 HIL-NS 平台。在详细描述 HIL-NS 平台构成基础上, 讨论并解决了其实现的关键技术。在车载通信网络(VANET)实例下对 802.11b 无线 MAC 协议性能进行仿真, 结果表明 HIL-NS 平台不但能与 NS-2 纯仿真的结果趋势保持高度一致性, 并且在支持传统数据分析的同时, 能有更直观的仿真性能实时输出。

**关键词:** 半实物仿真; NS-2; 网络仿真; 实时; 性能评估

中图分类号: TP391.9 文献标志码:A

### Implementation of hardware-in-loop network simulation platform based on NS-2

XU Wen-qiang, ZHANG Guo-xia, WANG Xin-hong, LIU Fu-qiang

(School of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** NS-2 is one of the most widely used network simulation softwares. But there are few researches on hardware-in-loop simulation based on NS-2. A new Hardware-In-Loop simulation platform based on NS-2 (HIL-NS) was proposed, by mapping real data flows to the simulation networks. Based on the description of HIL-NS platform's architecture in detail, key technologies to implement this platform were discussed. The simulation results of wireless MAC protocol 802.11b in Vehicle Ad-hoc NETwork (VANET) show that the results of HIL-NS platform highly coincide with those of NS-2. And the proposed platform can get more direct real-time output of the performance while supporting traditional data analysis.

**Key words:** hardware-in-loop simulation; NS-2; network simulation; real-time; performance evaluation

### 0 引言

现在的网络具有规模大、结构复杂以及网络应用多样等特点, 这给研究者综合评估全网网络性能带来了困难。除了纯数学的理论分析外, 对网络性能的评估手段主要有: 软件仿真、实际测试以及半实物仿真。目前的网络仿真工具主要有 OPNET, NS-2, Qualnet 等。它们通过建立虚拟网络场景, 模拟实现各层协议功能, 并加入各种情况网络参数, 完成对不同规模、复杂度的网络性能评估。但这些仿真软件利用各种数学建模和统计分析方法对网络设备和网络协议进行了简化, 由于实际网络系统的复杂性, 使其评估结果难以进一步逼近真实情况, 并且这类仿真软件都无法对网络的运行进行实时检测。实际测试通过硬件设备搭建经过一定简化的网络结构, 可以从现场获得可靠直观的数据。但面对一些大规模网络, 以及各种类型业务应用, 其测试性能受大量节点影响, 并且搭建这些真实网络的成本和复杂度都非常高。而半实物仿真<sup>[1]</sup>则结合了纯软件仿真和实际测试的优势, 成为了研究热点。半实物仿真又称为硬件在回路中仿真, 是一种在仿真系统中介入实物, 以取代相应部分的数学模型的仿真。半实物仿真将一部分硬件设备嵌入软件仿真, 一部分网络节点使用软件模拟一起参与仿真, 可以保证网络仿真的规模和实时性, 并将仿真的成本控制在了可以接受的范围内。

半实物网络仿真已经获得了一定的研究成果, 有不少学者基于 OPNET 和 Qualnet 设计了半实物仿真模型。文献[2]中总结了三种基于 OPNET 的半实物仿真方法: 高层体系结构(High Level Architecture, HLA)、系统在环(System-In-The-Loop, SIL) 和自定义方法。HLA 方法利用 OPNET 提供的 HLA 接口将 OPNET 仿真环境与外部实际设备连接起来, 能实现协同的半实物仿真。SIL 方法将多个物理网络接口映射到虚拟网络中不同的网络地址, 从而使物理设备和 OPNET 仿真进行交互, 协同仿真。自定义方法则通过在 OPNET 环境下进行二次开发, 根据自己研究需要, 开发适合自己需求的接口模块, 然后与硬件系统连接, 完成协同半实物仿真。文献[3]作者所提的半实物仿真模型 HIOP(Hardware-In-Loop with OPNET) 利用了 OPNET ESA 外部仿真控制技术, 通过外部接口完成虚拟仿真包和真实仿真包的转换, 并加入了外部时间同步控制模块, 保证了实时数据仿真。此外, 文献[4]中利用 Qualnet 搭建了 Ad Hoc 网络视频实时仿真平台进行半实物仿真。文献[5]中基于 Qualnet 的半实物仿真方法则利用了其提供的与实物设备进行数据交互的半实物仿真接口(IP Network Emulator, IPNE), 实现实际数据包到虚拟数据包的封装转换。

NS-2<sup>[6]</sup>是一款研究者广泛使用的开源网络仿真软件, 但由于半实物网络仿真研究历史较短, 到现在还没有一个基于

收稿日期: 2010-06-17; 修回日期: 2010-07-16。

基金项目: 国家重大科技专项项目(2008ZX03003-005)。

作者简介: 许文强(1985-), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 主要研究方向: 车辆无线通信; 张国霞(1981-), 女, 山东曹县人, 博士研究生, 主要研究方向: 宽带无线通信、车辆无线通信; 王新红(1974-), 女, 河北保定人, 副教授, 博士, 主要研究方向: 宽带无线通信、车辆无线通信; 刘富强(1965-), 男, 安徽淮北人, 教授, 博士, 主要研究方向: 视频信息处理、多媒体无线通信。

NS-2 实现的半实物仿真平台。文献[7]在 NS-2 基础上做了扩展, 添加了 socket 模块, 全面采集第二到第七层数据, 但仍不能实现对真实数据的实时仿真。文献[8]虽然在 NS-2 的基础上实现了无线网络视频 QoS 平台, 但使用方法只是根据仿真结果 trace 文件对传输后的视频进行解码处理, 并不能实现实时流的仿真, 系统框架也不符合半实物仿真模型要求。

总结半实物仿真系统的已有发展和模型设计思想, 其设计主要面对以下三个难题: 实现虚拟网络与半实物网络的连接融合; 实现实际数据包的收发与虚拟网络包的映射; 实现基于离散事件方法的仿真软件对于实时数据仿真的支持或扩展, 加入实际网络与虚拟网络的时间同步机制。本文借鉴现有半实物仿真系统的研究成果, 在 NS-2 基础上根据需求进行二次开发, 利用了外部时间同步控制的思想和视频实时仿真方法, 克服了 NS-2 的缺少与硬件连接的接口问题, 提出了一种基于 NS-2 的网络半实物仿真(Hardware-In-Loop based on NS-2, HIL-NS)平台设计, 有效地解决了以上三大难点问题。基于该平台, 研究者可以将实际实时视频流用于模拟传输, 通过对网络拓扑、节点数量、节点移动性、协议栈配置等参数设置, 不但支持传统的基于文件方式对网络性能进行定量分析, 还能够以可视化方式直观地对网络性能进行主观评价。

## 1 HIL-NS 平台网络架构

HIL-NS 平台网络架构如图 1 所示(虚拟网络以车载网络为例), 由实际网络(由有线局域网相连的电脑构成, 如图 1 中节点 S 和节点 D)和虚拟网络(运行在 NS-2 仿真软件下的仿真网络)共同组成, 通过映射机制, 实现了虚拟业务流和实际业务流的映射, 并且在实时同步模块的控制下, 保证了半实物仿真的可靠运行。

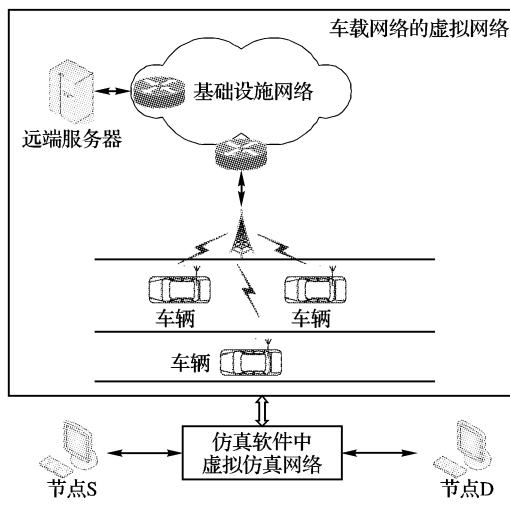


图 1 HIL-NS 网络架构

HIL-NS 平台的模块包括: 实时视频产生处理模块、仿真模块、时间同步模块和数据包捕获与转发模块<sup>[9]</sup>。实时视频产生处理模块通过流媒体播放软件 VLC 向目标电脑发送实时视频流数据, 并同样通过 VLC 接收并播放经过虚拟网络仿真后的实时视频流数据。仿真模块运行在 NS-2 软件下, 负责虚拟网络仿真。时间同步模块保证了实时视频流与虚拟数据包的同步映射。数据包捕获与转发模块在 Linux 系统环境下使用了 libpcap 和 libnet 网络编程开发包<sup>[10]</sup>与 Jthread 开发包, 结合多线程作业方式, 分别实现从网卡抓包的线程与向网卡发送经过虚拟网络仿真后的数据包线程。

## 2 HIL-NS 平台实现

虚拟网络和半实物网络的连接、虚拟包和实际数据包的映射与时间同步机制是 HIL-NS 平台实现的三大关键技术, 下面将详细介绍它们的实现机制。

### 2.1 HIL-NS 平台数据流程

如图 1 所示, 在虚拟网络中, NS-2 搭建了一个车载网络场景: 由远端服务器、后备基础设施网络以及无线接入点与车载终端组成, 其中远端服务器以车载终端为目的节点提供应用服务。NS-2 以 TCP/IP 协议结构模拟整个仿真场景的网络各层次协议, 仿真节点由各层虚拟协议栈搭建而成, 各层协议通过虚拟数据包流连接。数据包由应用层产生, 由上往下依次流经各层结构。当数据包流完成了某层协议相关操作, 即发起下层协议接收响应。最终实现了虚拟业务从服务器到目的节点的传输。而实际网络中, 节点 S 产生实时数据流并向节点 D 发送。在仿真软件中, HIL-NS 完成对实时数据流截获与转发, 并通过后面提到的数据包映射机制, 让真实数据流映射到虚拟服务器业务流。最后通过节点 D 获取经过模拟仿真后的实时视频流信息。

### 2.2 虚拟包和实际数据包的映射

在 NS-2 中, 虚拟数据包不是比特流, 只有数据包头信息, 数据域为空, 它表现为 TCP/IP 协议结构下的一段本地内存存储形式, 不能通过网络端口发送数据。并且, NS-2 不具有与物理网口连接通信的接口模块。因此, 为了做到 NS-2 仿真与实际网络的直接通信, HIL-NS 设计添加了与物理网口连接的 API 接口模块。HIL-NS 对传统 NS-2 节点结构进行了扩展, 加入 HIL-NS API 接口模块分别与 NS-2 应用层和路由层相连, 并同时与实际物理网卡映射关联。当实时业务流数据被网卡接收后, 实际数据包将通过 HIL-NS API 模块映射到 NS-2 节点应用层以产生虚拟数据包。当虚拟数据包经过虚拟网络仿真回路最终被目的节点路由层收到后, 将通过 HIL-NS API 模块控制实际物理网卡把所映射的实际数据包转发出去。

图 2 表示了 HIL-NS API 的运行流程。当实时业务流数据包到来后会先被存入缓存内存中, 然后 HIL-NS API 会从缓存队列中读取一个包大小信息, 告诉 NS-2 应用层产生该大小的虚拟数据包, 进入虚拟网络仿真回路仿真。NS-2 应用层产生数据包加入了前端动态时隙同步机制, 以完成虚拟包与被捕获的实时同步映射。当虚拟网络中目的节点收到该虚拟包后, HIL-NS API 反过来产生控制信号, 控制实际数据包从缓存中发送出去。如果虚拟数据包丢失, 则丢弃缓存队列中对应的实际数据包。缓存队列的发送端口和虚拟包发送端口分别加入时间同步机制, 以完成虚实数据包的同步和实际数据包的时延同步。

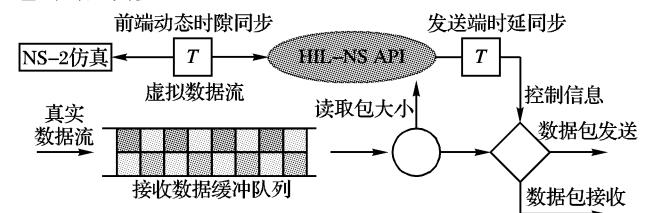


图 2 HIL-NS API 运行流程

### 2.3 时间同步机制

NS-2 是基于离散事件队列驱动的网络仿真软件, 虚拟仿真时间总是直接跳到下一个仿真事件发生的时间, 而在没有事件时仿真时间停止。显然, 虚拟时间与真实时间并不同步,

并且通常在计算复杂度不高、事件发生频率不大的情况下，虚拟时间的推进总是快于真实时间。在 NS-2 下，事件的处理时间受仿真网络复杂度和业务流量大小影响波动很大，难以通过安插固定数量的事件或等待时隙来让整个平台在各种仿真网络场景下都能做到虚拟时间与实际时间同步。并且，由于仿真时间与实际时间的差距，虚拟网络中的端到端时延不能有效地表现在实际数据包传输上。HIL-NS 通过以下规则来解决虚拟网络与实际网络的时间同步问题。

### 2.3.1 前端动态时隙同步

前端动态时隙同步解决实际包捕获和虚拟包发送的同步问题，使实际业务流数据包和虚拟数据包一一对应。为实现这一目的，该机制用到了向仿真系统安插空事件以及添加系统休眠的方法，这样可以让实际业务传输性能情况同步的显示在仿真分析结果中。

设实际时刻  $t$ ，捕获到实际数据包，则 NS-2 在此之前以  $\Delta t$  的虚拟时间间隔发起虚拟包发送事件，并侦听接收数据缓存队列，直到发现有实际数据包后产生对应的虚拟数据包。这里  $\Delta t$  是足够小的微小时间以让虚拟应用层侦听接收数据缓存队列，虚拟包发送事件只会增加响应事件数量，不会产生虚拟数据包。一旦 NS-2 产生虚拟包，则使用侦听到的接收数据包大小，以此确定虚拟包的发送间隔  $\Delta t_{\text{interval}}$ 。此时让计算机 CPU 休眠时间  $\Delta t_{\text{sleep}}$ ，以让系统仿真时间停止并消耗实际时间，从而使仿真时间和实际时间同步。问题是，随着网络规模的不同，以及 HIL-NS 平台实际包转发线程存在的影响，使得仿真时的计算机处理时间不确定。随着网络复杂度的提高和处理时间的增大，会让系统等待  $\Delta t_{\text{interval}}$  后仿真时间滞后于实际时间。本文采用 CPU 休眠时间为动态时隙的方法。CPU 休眠时间  $\Delta t_{\text{sleep}}$  由式(1) 得到：

$$\Delta t_{\text{sleep}} = \alpha \Delta t_{\text{interval}} + \Delta t' \quad (1)$$

这里  $\alpha$  为  $0 \sim 1$  的待定系数（本文取值为 0.8）， $\Delta t_{\text{interval}}$  为包发送间隔， $\Delta t'$  为动态时隙，由式(2) 得到：

$$\Delta t' = \Delta t_{\text{sim}} - \Delta t_{\text{real}} \quad (2)$$

其中： $\Delta t_{\text{sim}}$  为每次虚拟包发送与上一次虚拟包发送的仿真时间增长， $\Delta t_{\text{real}}$  为每次虚拟包发送与上一次虚拟包发送的实际时间增长。如果实际时间增长快于虚拟时间增长，则  $\Delta t'$  为负值，CPU 在下一次虚拟包发送时减小系统休眠时间  $\Delta t_{\text{sleep}}$ ；反之亦然。

### 2.3.2 发送端时延同步

NS-2 一旦产生虚拟数据包，即把仿真时间  $t_s'$  和实际系统时间  $t_s''$  记入包头；当目的节点收到虚拟包后，则在包头记入仿真时间  $t_n'$  和实际系统时间  $t_n''$ 。如图 2 所示，接收数据缓存队列发送端取出对应实际数据包后，等待时延间隔  $t_i$ ，后再从物理网络端口发送出去。 $t_i$  由式(3) 计算得出，表示为仿真计算时延与系统 CPU 运算消耗时延之差。这一规则把仿真中计算出来的时延加到了实际包转发中，确保虚拟时延与实际时延的时间同步。

$$t_i = (t_n' - t_s') - (t_n'' - t_s'') \quad (3)$$

## 3 HIL-NS 的实例分析

本文在 HIL-NS 平台上仿真分析了车载无线通信环境下 802.11b 无线 MAC 协议的性能，来验证 HIL-NS 平台的可行性，以及该平台下仿真结果较传统仿真器更有实时性与直观性。

### 3.1 实验配置

实例仿真环境如图 3 所示，模拟了车载网络下路边单元 RSU 为车载单元 OBU 提供实时视频服务的应用。远方服务器通过 RSU 向 OBU 提供视频服务，不在 RSU 服务范围的 OBU 通过 Ad Hoc 形式连入 RSU。实时视频流服务器节点与 RSU 通过有线网络连接，RSU 与 OBU 以及 OBU 之间通过无线网络连接。

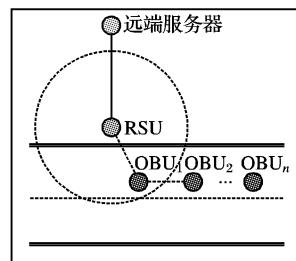


图 3 HIL-NS 仿真场景

为了尽可能减少路由性能对 MAC 性能的影响，该实例中 NS-2 中路由使用了 NOAH 静态路由。实际实时视频流为时间长度为 120 s，文件大小 9.79 MB 的 MPEG TS 编码格式的视频流，平均传输率为 0.637 Mbps，用 UDP 封解包。对于 NS-2 仿真应用层使用速率为 0.637 Mbps 的 CBR 流，传输层使用 UDP 协议。仿真测试实例参数配置如下所示。

虚拟网络配置如下。

应用层：CBR, 0.637 Mbps；传输层：UDP；网络层：NOAH；MAC 层：802.11b；物理层：WirelessPhy；传输带宽：2 Mbps。

实际网络配置如下。

应用层：MPEG TS 编码视频流；传输层：UDP。

### 3.2 实验结果和分析

本应用实例下，本文从时延特性上定量分析了该平台的可信度。图 4 显示了数据包传输的时延随 OBU 到 RSU 跳数变化的情况。由图 4 可知，基于 802.11b MAC 协议下的 HIL-NS 平台仿真与 NS-2 纯仿真的结果趋势保持了高度的一致性。这表明该平台方案成功地把虚拟网络仿真结果引入到了实际传输中，具有可信度。HIL-NS 的时延结果比纯仿真结果略高，并且随着网络规模（传输跳数）的扩大，HIL-NS 比纯仿真时延的增量有增大趋势。这是因为随着网路规模的扩大，计算机运算系统时间开销增加，运行于主线程上的 NS-2 仿真部分占用系统处理时间上升而让实际包发送线程处理效率下降，增加了总体系统开销，加大了对仿真性能的影响。时间同步机制的使用虽然在理论上能解决同步问题，但实际实现中受限于系统环境与具体时钟函数的精确度以及 CPU 的处理能力，使得 HIL-NS 的时延结果难以精确地趋同于纯仿真结果。

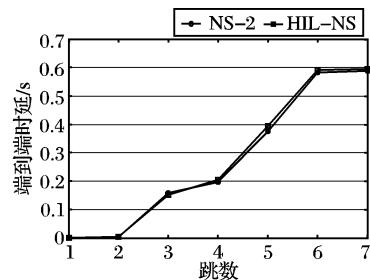


图 4 HIL-NS 时延特性随跳数变化情况

图 5 显示了数据传输成功率随跳数变化的情况。容易看出，数据传输率随跳数增加下降明显。除此之外，HIL-NS 平台更能实时地获得如图 5 统计结果显示的网络性能状况。为

为了达到这一目的,本文实时捕获了仿真的视频流并进行播放显示,对视频质量进行了主观评价,并结合客观数据包传输率的定量分析,评估了无线 MAC 协议在不同跳数下网络性能。主观评价视频序列中同一帧图像在不同跳数下的截图性能,情况如图 6 所示。

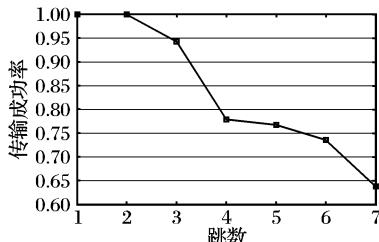


图 5 HIL-NS 实时流传输成功率

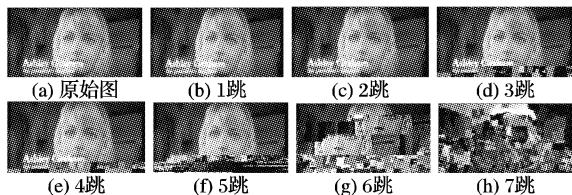


图 6 HIL-NS 实时流性能帧对比

容易看出,在前两跳下视频能正常接收显示。从 3 跳开始,视频质量逐渐下降。到了 7 跳以后,已经难以恢复原来视频样貌。由图 5 的数据包传输率随跳数变化的关系可以发现:802.11b 协议下,前两跳都能无丢包地传输,所以视频在前两跳下能正常显示;而从 3 跳开始,数据传输率逐渐下降,到 6 跳时,数据传输率已经不足 75%。结合主观和客观的评价可以发现,当数据包传输率保持在 75% 以上时,视频质量下降缓慢;一旦不足 75%,视频质量急剧下降,效果如图 6 (g)、(h)所示。

(上接第 3283 页)

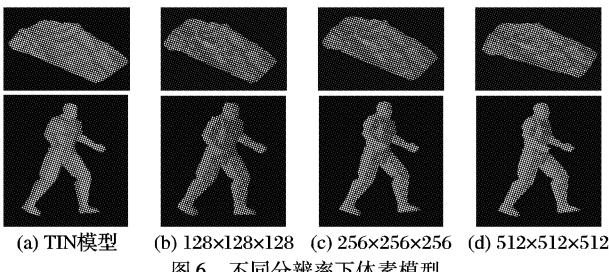


图 6 不同分辨率下体素模型

## 5 结语

本文提出了一种简单高效的体素化算法,整个算法避免了求交运算,提高了体素化的效率,且该算法能够快速处理复杂精细的表面模型,特别是大规模 TIN 模型。本算法的不足之处在于,在处理三角面片大的 TIN 模型时,在相同分辨率的情况下由于三角面片划分系数变大,导致算法时间效率下降,所以笔者将进一步对该类问题进行后续研究。

### 参考文献:

- [1] 管伟光,解林,马颂德. 体图形学[J]. 中国图象图形学报,1999,4(6): 486-490.
- [2] KAUFMAN A, COHEN D, YAGEL R. Volume graphics [J]. IEEE Computer, 1993, 26(7): 51-64.
- [3] 蒋宏伟,王国瑾. 三维带符号的欧氏距离变换及其应用[J]. 计算机学报, 2003, 26(12): 1645-1651.
- [4] OOMES S, SNOEREN P, DIJKSTRA T. 3D shape representation:

## 4 结语

本文探讨了半实物仿真平台设计中的关键问题和解决方案,基于 NS-2 网络仿真器设计并实现了一种半实物仿真平台。该平台能够把实际业务流加入仿真网络进行仿真。通过车载无线网络下 802.11b MAC 协议的仿真实例分析,验证了所提平台的可行性。相比传统仿真软件基于文件形式的结果分析,该平台支持的可视化结果更具直观性。此外,从实验结果可以看出,实时视频流的正确传输和播放对数据成功接收率要求很高。为满足这种业务需求,这也对研究者在研究和设计协议时提出了更高的要求。

### 参考文献:

- [1] 张中伟. 半实物仿真技术在通信系统中的应用研究[C]// 第四届中国软件工程大会. 杭州:[s. n.], 2007: 86-88.
- [2] 段威,任华,柳海峰. 基于 OPNET 的通信网络半实物仿真方法研究[J]. 计算机仿真, 2007, 24(11): 138-143.
- [3] 张筱,林孝康. 一种基于 OPNET 的网络半实物仿真模型[J]. 微计算机信息, 2007, 23(1): 257-258.
- [4] 赵玉亭,戴冠中,徐浩,等. 多跳 Ad Hoc 网络视频实时传输性能评估[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(24): 149-151.
- [5] 赖安琪. 基于 QualNet 的战术数据链半实物仿真[J]. 电讯技术, 2009, 49(5): 74-77.
- [6] 于斌,孙斌,温暖,等. NS2 与网络模拟[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
- [7] 吴堃,戴萌,陆桑璐,等. 基于 NS2 的 P2P 网络模拟平台研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(10): 2152-2157.
- [8] 陈正宇. 基于 NS2 的无线网络视频 QoS 平台的实现[J]. 电子设计工程, 2009, 17(10): 72-76.
- [9] 管天,卢泽新,白建军. 基于半实物网络仿真的包截获关键技术研究[J]. 计算机工程与科学, 2006, 28(12): 99-102.
- [10] 刘文涛. 网络安全开发包详解[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

Transforming polygons into voxels[C]// Proceedings of the First International Conference on Scale-Space Theory in Computer Vision. Berlin: Springer Verlag, 1997: 349-352.

- [5] 吴晓军,刘伟军,王天然,等. 改进的基于欧氏距离测度网格模型体素化算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(4): 1645-1651.
- [6] HSIEH H H, LAI Y Y, TAI W K, et al. A flexible 3D slicer for voxelization using graphics hardware[C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australasia and South East Asia. New Zealand: ACM Press, 2005: 285-288.
- [7] 吴晓军,刘伟军,王天然. 基于八叉树的三维网格模型体素化方法[J]. 工程图学学报, 2005, 26(4): 1-7.
- [8] 聂庆华. 地理信息系统及其在环境科学中的应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 186.
- [9] HUANG J, YAGEL R, FILLIPOV V, et al. An accurate method to voxelize polygonal meshes [C]// Proceedings of the 1998 IEEE symposium on Volume visualization. New York: ACM, 1998: 119-126.
- [10] 柳稼航,方涛,杨建峰. 适用于任意复杂区域的全自动填充方法[J]. 计算机工程, 2008, 34(4): 238-240.
- [11] 薛斌党,薛文芳,姜志国. 三维种子填充算法的改进[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(10): 1553-1556.
- [12] 温佩芝,吴晓军,史泽林,等. 一种三维实体模型的离散表示方法[J]. 计算机工程与应用, 2003, 39(15): 14-15.