DOI：10.13700/j.bh.1001-5965.2006.03.021
2006年 3月 北京航空航天大学学报 March 2006
第32卷 第3期 Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics Vol.32 No.3

基于远程渲染的三维模型发布系统

金 平 张海东

（北京航空航天大学 计算机学院，北京 100083）（攀枝花学院 计算机系，攀枝花 617062）

齐 越 沈旭昆

（北京航空航天大学 计算机学院，北京 100083）

摘 要：当前三维模型在Internet上的应用越来越广，但先下载再显示的传统发布方式也一直受到安全性、网络带宽和客户端机器的图形性能3方面的制约.结合三维模型化简和远程渲染技术提出了一种新的三维模型发布系统.系统把高精度模型保存在渲染服务器上，客户端的三维浏览器只提供大幅精简的粗糙模型.用户可以在客户端对粗糙模型进行缩放、平移和旋转等操作，选择最佳的观察视点.当用户停止操作时，客户端向服务器发送一个渲染请求，该请求中包含用户当前的视点、方向和光照条件等信息.服务器根据客户端请求进行渲染并返回高精度模型的图像.因为敏感的高精度模型保存在服务器端，因此该系统具有先天的安全性优势；因为客户端和服务器之间只在用户停止操作时传输平均大小为30 kByte的图像，因此系统对网络带宽要求很低；此外客户端只需要渲染极为简单的精简版模型，所以不需要很高的图形性能.

关 键 词：三维模型化简；远程渲染；三维数据安全

中图分类号：TP 391

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2006)03-0337-05

Remote-rendering based 3D model publishing system

Jin Ping

(School of Computer Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Zhang Haidong

(Dept. of Computer Science, Panzhihua University, Panzhihua 617062, China)

Qi Yue Shen Xukun

(School of Computer Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: 3D models have been widely used on internet. However, the conventional publishing way which downloads models first and then renders has always been haunted by the limitation of security threat, network bandwidth and low graphic performance of client machines. By combining 3D model simplification and remote rendering technology, a new 3D model publishing system was put forward. The high-resolution models were kept on the rendering server. On the 3D viewer client only low-resolution versions of the 3D models were provided. User can zoom, translate and rotate the low-resolution model on the 3D viewer client. When user stops manipulating, the client sends a rendering request to the rendering server which includes the user's current viewpoint, direction and lighting information. The rendering server then renders and returns images of high-resolution models according to client requests. This system can effectively guarantee the security of the 3D model and significantly lower the requirements for client machine's graphical performance and network bandwidth.

Key words: three dimensional computer graphics; remote sensing; security of data

收稿日期：2005-06-24

基金项目：国家自然科学基金资助项目(60533070)

作者简介：金 平(1979—)，男，安徽休宁人，硕士生，jinping@vrlab.buaa.edu.cn.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

随着三维激光扫描技术的发展，结合三维建模技术的最新研究成果，已能够精确地获取许多文物的外部形状和表面特征信息.如美国斯坦福大学的“数字米开朗基罗”项目[1]成功地对米开朗基罗的10件雕像作品(包括著名的大卫像)进行了数字化，扫描精度达到0.25 mm.但高精度的数字化技术带来的数据量也是惊人的，上述大卫像的三维模型数据达到空前的20亿个三角形.这样的海量数据对于通过网络展示三维模型提出了3个难题：①许多珍贵文物属于国宝，通过现有的方法在网络上发布高精度三维模型难以保证其安全性；②渲染大数据量的三维模型对于计算机的图形性能要求很高，当前的PC机图形硬件虽然发展很快，但仍然无法胜任大数据量复杂模型的三维渲染任务；③高精度的三维模型数据量极其庞大，通过网络传输会给用户造成很长的等待时间.

三维数据安全方面，目前国内外的大部分研究都集中在网格数字水印技术上.近年来有大量论文描述了在三维模型中嵌入隐藏信息的网格数字水印方法，较突出的有参考文献[2]利用多分辨率分析的网格水印算法.参考文献[3]提出的基于扩展频域变换的三维水印算法等.但是，所有的三维水印技术都有一个致命的弱点：它只能在数据失窃之后证明盗版行为，而无法事先防止对三维数据的攻击.

解决客户端机器的图形性能问题的一种做法是对高精度的三维模型进行化简.三维模型化简的研究，首先从1992年Schroeder等人的顶点删除方法[4]开始，Hoppe在1993年提出了能量函数[5]的网格优化方法，参考文献[6]在1996年提出了简化封套的方法，Garland在其博士论文中提出了二次误差[7]的方法.远程渲染是解决客户端机器图形性能问题的另一种途径[8].参考文献[9]的研究提供了在渲染服务器和客户端之间有效地分配渲染负载和数据传输的专用算法.斯坦福大学的研究人员对各种针对图形流水线的攻击手段进行了详细的分析，并提出了一种以三维数据保护为主要目标的远程渲染系统[10].

在三维模型数据网络传输方面，传统的网络传输采取“先下载，再显示”的模式，即将三维模型的所有相关数据都下载到客户端之后再显示.这种方式的不足之处在于用户需要等待太长的时间.而参考文献[11]提出的递进网格传输方法首先传送一个粗糙模型到客户端并立刻显示，然后再逐渐地传输一系列的优化信息，对最初的粗糙模型进行细化.

本文设计并实现了一种基于远程渲染技术的三维模型发布系统.该系统由包含简化模型的客户端和原始高精度模型的渲染服务器组成，渲染服务器根据客户端的请求对高精度模型进行渲染并返回高清晰度的图像.此系统有效地解决了上述的3个问题，并应用于“中国数字博物馆”项目.

1 三维模型化简

本文实现了基于二次误差度量的网格简化算法[5]的三维模型化简工具.该算法使用二次矩阵来保持表面的近似误差，通过递归地对顶点对进行压缩而实现对网格的化简.

算法的基本操作是顶点对压缩，即将2个顶点 $\boldsymbol{v}_1,\boldsymbol{v}_2$ 合成一个顶点 $\bar{\mathrm{v}}$：$(\boldsymbol{v}_1,\boldsymbol{v}_2)\rightarrow\bar{\mathrm{v}}$，与边折叠等网格化简算法不同的是，$\boldsymbol{v}_1,\boldsymbol{v}_2$ 可以是相邻的2个顶点，即($\boldsymbol{v}_1,\boldsymbol{v}_2$)是三角网格的一条边(见图1a)，也可以是不相邻的2个顶点(见图1b).

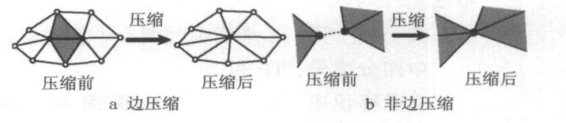


图1 顶点对压缩

算法首先需要选择顶点对($\boldsymbol{v}_1,\boldsymbol{v}_2$)，满足下面规则之一的为有效顶点对：①($\boldsymbol{v}_1,\boldsymbol{v}_2$)是网格的一条边；②$\|\boldsymbol{v}_1-\boldsymbol{v}_2\|<t$，其中 t 是给定的参数阈值.根据误差度量对有效的顶点对进行删除合并，误差的度量方法如下：首先为每个顶点分配一个4×4的矩阵 $\boldsymbol{Q}$，把顶点 $\boldsymbol{V}=[v_x\quad v_y\quad v_z\quad 1]^{\mathrm{T}}$ 的二次误差定义为 $\Delta(\boldsymbol{v})=\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{V}$，在每次顶点对压缩$(v_1,v_2)\rightarrow\bar{\mathrm{v}}$ 之后，给新的顶点 $\bar{\mathrm{v}}$ 分配误差度量矩阵 $\boldsymbol{Q}'=\boldsymbol{Q}_1+\boldsymbol{Q}_2$.这样根据各个顶点对压缩带来的误差选择合适的进行压缩.

$\Delta(\boldsymbol{v})$定义为顶点 $\boldsymbol{v}$ 到与之相连的面的距离平方和，其推导过程如下：

$$\Delta(\boldsymbol{v})=\Delta([v_x\quad v_y\quad v_z\quad 1])=\sum_{\boldsymbol{p}\in p(\boldsymbol{v})}(\boldsymbol{p}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{v})^2=\sum_{\boldsymbol{p}\in p(\boldsymbol{v})}(\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{p})(\boldsymbol{p}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{v})=\sum_{\boldsymbol{p}\in p(\boldsymbol{v})}\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{p}\boldsymbol{p})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}\left(\sum_{\boldsymbol{p}\in p(\boldsymbol{v})}\boldsymbol{K}_p\right)\boldsymbol{v}$$

其中 $$\boldsymbol{K}_p=\boldsymbol{p}\boldsymbol{p}^{\mathrm{T}}=\begin{bmatrix}a^2 & ab & ac & ad\\ ab & b^2 & bc & bd\\ ac & bc & c^2 & cd\\ ad & bd & cd & d^2\end{bmatrix}$$

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

对于初始网格来说,Q 为 0,因为所有的点都在与其相邻的面上,所以其距离为 0.

使用三维扫描仪得到的高精度三维文物模型通常都包含超过百万个三角形.利用上述的模型化简算法将其化简到 5 000 三角形左右时,模型的局部细节大为缩减,但仍然较完整地保留了初始的几何特征.

2 基于远程渲染的三维模型发布系统

远程渲染系统是 Client/Server 结构,一般客户端负责接受用户的输入并向服务器发送相应的渲染请求,高图形性能的服务器负责进行渲染并把得到的图像传回给发送请求的客户端进行显示.系统结构见图 2.

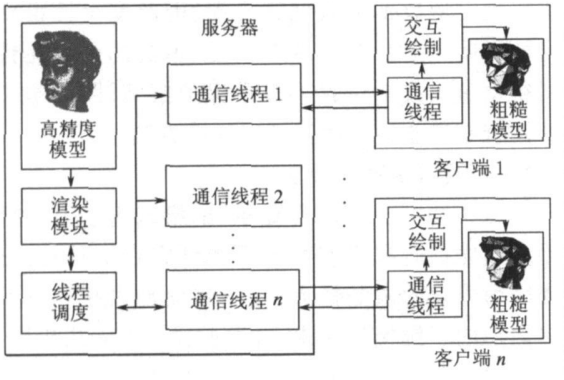


图 2　基于远程渲染的三维模型发布系统体系结构图

2.1 客 户 端

用户可以通过系统提供的三维客户端浏览器观察三维模型.客户端程序中包含一个分辨率很低的精简版三维模型,用户可以对此粗糙模型进行旋转、缩放、平移等交互式操作.当用户停止操作时(程序通过 MouseUp 消息检测到用户停止了操作),客户端程序通过网络向远程渲染服务器发送一个渲染请求,请求中包含当前用户的视点位置、方向以及控制三维模型状态的变换矩阵;服务器根据这些信息对服务器端的高精度模型进行渲染并得到高分辨率的渲染图像,然后发送给客户端,客户端用它来替换当前的低分辨率渲染效果,如图 3、图 4 所示.在低延迟的网络环境下,用户感觉就像在操作一个高分辨率的模型.在"中国数字博物馆"项目中,文物的三维模型通常超过百万个三角形,在客户端使用的精简版模型一般被化简到 5 000 个三角形左右.

2.2 服 务 器

2.2.1 渲染模块

远程渲染服务器的渲染模块的功能是根据客户端的请求对服务器端的高精度模型进行渲染,得到一幅高清晰度的图像.为了提高服务器的响应速度,在服务器程序中应用了软硬结合的渲染技术,主要包括:①把频繁使用的绘制命令或改变状态命令存储为显示列表以减少访问内存的次数.②利用 OpenGL 的 VBO 扩展把模型的顶点、纹理坐标、法向量、颜色等数据存储到图形卡的高性能显存中.因为 GPU 访问显存的速度远远高于访问内存的速度,因此能够带来较大的性能提升.采取上述加速措施之后,渲染模块在 P4 3.0 G/Radeon9800Pro 的机器上渲染百万多边形的模型时,平均速度从 24 帧/s 提高到 45 帧/s.

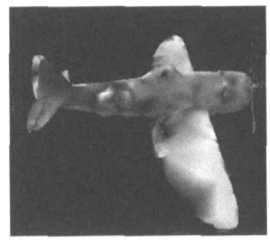


图 3　客户端的低分辨率模型图像(5 000 三角形)

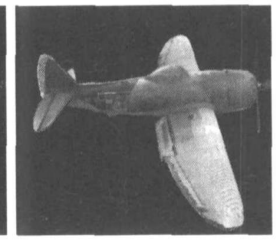


图 4　服务器端的高分辨率模型图像(100 万三角形)

2.2.2 渲染图像回读与压缩

服务器根据客户端提供的信息进行渲染之后,得到的图像通常以像素形式保存在帧缓存(framebuffer)中,服务器需要从帧缓存回读出这些像素信息并发送给客户端.在此过程中需要解决 2 个问题:①帧缓存属于 on-screen buffer,它必须与一个实际的窗口绑定,因此在各方面都受到这个窗口的限制,比如大小、像素格式等等.而且如果绑定的窗口被其它窗口遮挡,也会破坏保存在帧缓存中的图像信息.为克服这些弊端,服务器中采用 P-Buffer 作为渲染的目标缓存.P-Buffer 是 OpenGL 的标准 ARB 扩展,属于 off-screen buffer,它不与真正的窗口绑定,是不可见的.服务器程序可以根据需要自由设置 P-Buffer 的大小、像素格式等属性而不会受到任何限制.②从缓存中读取的图像格式为每像素 4Byte 的 bmp 格式,一幅 800×600 的图像大小约为 2 MByte,难以满足网络传输的要求.因此,必须对图像进行压缩.本文选择了通用的 JPEG 图像压缩标准.本文实现的压缩程序能够在保证图像质量的前提下把从帧缓存中读取的图像压缩到 20 KByte 到 40 KByte.

2.2.3 通信线程及其管理

为了提高系统的并发程度,满足尽可能多的渲染请求,服务器程序采用了多线程的实现方式.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

服务器为每一个客户端建立一个通信线程,负责接收来自该客户端的渲染请求,并从渲染请求中读取视点、窗口大小、模型状态等信息,提供给渲染模块;在渲染模块根据这些信息渲染完毕后又负责把压缩得到的 JPEG 图像发送回客户端.很显然,渲染模块和图像缓存是临界资源.本文采取了先来先服务的线程调度策略.

2.2.4 服务器性能分析

渲染服务器的性能瓶颈主要在 3D 渲染和图像回读与压缩上.在配置为 3.0 G CPU, Radeon9800Pro 显卡,1G 内存的机器上渲染 100 万三角形的模型时,远程渲染服务器处理一个渲染请求平均耗时 60 ms,其中渲染时间约为 24 ms,图像回读加上 JPEG 压缩平均共耗时约 36 ms.所以渲染服务器平均每秒大约能处理 16 个渲染请求.

3 发布系统的安全防范技术

与目前流行的"先下载,再显示"的 3D 模型发布系统相比,本文的系统具有先天的安全性优势——需要保护的原始模型数据保存在服务器端,客户端接收到的只有 2D 的图像.虽然客户端也有一个精简版的模型,但是本文的模型化简算法可以指定化简的粗糙程度.对于一个百万多边形甚至千万多边形的初始模型而言,当把它化简到 10 000 个左右的多边形时,虽然还具有基本的轮廓特征,但是会丢失绝大多数的局部细节,基本上已经不具有任何盗版的价值了.但即便如此,考虑到目前计算机视觉的高速发展提供了从 2D 图像重构 3D 模型的可能性,为了防止潜在的攻击者使用服务器提供的 2D 图像来重构初始的三维模型,服务器采取了下列防范重构的措施:

3.1 日志分析

服务器对每个客户端程序进行标识,并以此跟踪和监视每个客户端发出的渲染请求序列.通过分析服务器日志,可以鉴别出那些可疑的请求序列,例如在单位时间内发出异乎寻常的大量请求或者其他可疑的行为.

3.2 对渲染请求设置限制

为了进一步防止攻击者利用从客户端获取的大量 2D 图像进行 3D 重构,可以对观察条件进行一些特殊限制.即对模型设置一些"游人止步"的区域,禁止观察者在某些区域观察模型,从而使攻击者无法重构出完整的模型.

3.3 噪音干扰

在当前普遍使用的计算视觉算法中,噪音干扰往往会严重降低重构的质量.因此可以针对重构攻击的这一软肋,有针对性地在图像中加入同种类型的噪音干扰,以加大重构的难度.加入的干扰是以不影响用户观察为前提的,但是足以对重构造成严重的阻碍.系统中使用的干扰和变形包括:干扰渲染的观察参数,干扰渲染的光照参数,在图像中加入高频噪音等等.

4 与现有方法的比较

本节将把本文方法与现有几种三维模型网络发布方法进行比较,进一步阐述该系统的优势.

4.1 安全性

与"先下载,再显示"和递进传输的发布模式相比,传统的远程渲染方法和本文的方法都无需将三维模型数据下载到客户端,因此安全性得到可靠保障.同时,如第 3 节所述,本文的系统还针对视觉重构技术设置了多重保护措施,因此本文的系统在安全性上超过了以往的方法.

4.2 对网络带宽的要求

传统的"先下载,再显示"的模式为了显示模型必须先把所有模型数据下载到客户端.因此它受网络带宽的限制最大,对于规模动辄超过百万多边形的三维模型来说,这种模式根本无法应用.

递进传输技术对"先下载,再显示"模式进行了重要改进.这种方法首先传输一个数据量很小的粗糙的基网格给客户端,客户端接收到基网格后立即可以显示,然后服务器持续发送对基网格的优化信息,客户端的显示效果也逐渐精细,直到传输完毕或用户对模型精细度感到满意为止.这种方法大大降低了用户看到最初显示的等待时间,但是为了看到令人满意的精细的效果,用户仍然不得不等待很长时间.

传统的远程渲染系统不把三维模型数据传输到客户端,在客户端呈现给用户的实际上是由服务器根据客户端的用户输入渲染得到的图像流.为了在客户端得到实时的交互效果,图像流至少需要达到 30 帧/s.实验表明,压缩后的渲染图像大小平均约为 30 KByte,则客户端与服务器端的数据流量大约是 900 KByte/s;即使如 2.2.4 节所述,服务器渲染性能大约只有 16 帧/s,数据流量仍然达到可观的 480 KByte/s,这对于如今的普通网络条件而言仍然是一个沉重的负担.

本文的系统在服务器和客户端之间传输的主要数据是图像数据,根据实验统计,服务器发出的 JPEG 图像平均大小约为 30 KByte.可以合理地假

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

设用户在客户端平均每分钟使用鼠标操纵模型 60 次.则这个用户的网络通信流量为30 KByte×60/60=30 KByte/s.这样微弱的数据量对于目前的网络带宽来说没有任何问题.

4.3　对客户端图形性能的要求

"先下载,再显示"的方法和递进传输方法都是把全部的渲染任务交给客户端完成.因此为了达到令人满意的渲染效果,客户端机器必须配置高性能的图形硬件.

传统的远程渲染方法就是为了解决客户端图形性能弱的问题而诞生的.客户端只需要显示二维的图像,几乎所有的 PC 机都可以轻松胜任.

本文的系统同样把渲染高精度模型的工作转交给了服务器,而客户端机器只需要最基本的 3D 图形性能即可胜任渲染精简版本模型的工作.试验表明,对于 10 000 三角面片左右的模型,使用 5 年前面世的 GeForce2 显卡都能够达到 30 帧/s 以上的刷新率.可以认为,现在的主流机型完全能够满足客户端的图形性能要求.

4.4　实时性和逼真度

这 2 项主要是针对用户的使用体验而言的.对于"先下载,再显示"和递进传输方法而言,三维模型的渲染工作是在客户端本地完成的,因此只要客户端的图形性能足够强劲,就可以得到较高的实时性.但是由于模型数据需要通过网络传输到客户端,因此为了控制数据量,一般往往采用低精度的模型,所以逼真度不高.

传统的远程渲染系统受网络带宽的约束,客户端的图像刷新率一般只能达到 15 帧/s 左右,距离实时性的通用标准 30 帧/s 有很大差距.但是该方法把渲染工作放在了配置高性能图形系统的服务器端,因此,它能够处理大数据量的复杂三维模型.客户端提供给用户的始终是高精度的渲染图像,因此它在逼真度方面具有最佳的表现.

本文的系统为得到更好的实时性,在客户端放置了一个低精度的模型.用户能够实时地操纵(如旋转、缩放、平移)该模型,一旦用户停止操作就马上能够看到从服务器端发回的高精度渲染效果.用户操纵模型的过程中对模型的局部细节是没有很高要求的,当用户找到了合适的观察位置时(即停止操作时)他马上就能观察到最高精度的细节信息.因此本文的这种设计既弥补了传统远程渲染系统的实时性缺陷,同时在模型逼真度方面也没有实质性的损失是一种较好的折衷方案.

5　结 束 语

本文介绍了一种基于远程渲染的三维模型发布系统.该系统避免了将珍贵的三维文物模型数据直接暴露给用户,从而保证了文物数据的安全性.该系统将主要的渲染任务交付给服务器,从而大大降低了对客户端机器图形性能的要求.用户可以操纵客户端的粗糙模型,客户端只在用户操作的间隙给服务器发送渲染请求,这样的设计一方面增加了实时性,一方面又大大降低了对服务器的渲染工作负担.最后,由于服务器与客户端之间主要的数据传输是压缩后的图像,因此网络带宽也不再是系统的瓶颈.

参考文献 (References)

[1] Levoy M, Rusinkiewicz S, Ginzton M, *et al*. The digital michelangelo project: 3D scanning of large statues [A]. Proceedings of the ACM SIGGRAPH Conference on Computer Graphics [C]. New York: ACM, 2000.131～144

[2] Praun E, Hoppe H, Finkelstein A. Robust mesh watermarking[A]. Proceedings of the ACM SIGGRAPH Conference on Computer Graphics[C]. New York:ACM, 1999. 49～56

[3] Ohbuchi R, Takahashi S, Miyazawa T, *et al*. Watermarking 3D polygonal meshes in the mesh spectral domain [A]. Proceedings-Graphics Interface [C]. Canadian Information Processing Society, 2001. 9～17

[4] Schroeder W J, Zarge J A, Lorensen W E. Decimation of triangle meshes, computer graphics[J]. Computer Graphics (ACM), 1992, 26(2):65～70

[5] Hoppe H, DeRose T, Duchamp T, *et al*. Mesh optimization[A]. Proceedings of the ACM SIGGRAPH '93 Conference on Computer Graphics[C]. New York: ACM, 1993. 19～25

[6] Jonathan C, Amitabh V, Dinesh M, *et al*. Simplification envelopes [A]. Proceedings of the ACM SIGGRAPH Conference on Computer Graphics[C]. New York: ACM, 1996. 119～128

[7] Garland M, Heckbert P S. Surface simplification using quadric error metrics[A]. Proceedings of the ACM SIGGRAPH Conference on Computer Graphics[C]. New York: ACM, 1997. 209～216

[8] Engel K, Hastreiter P, Tomandl B, *et al*. Combining local and remote visualization techniques for interactive volume rendering in medical applications[A]. Proceedings of the IEEE Visualization Conference[C]. Salt Lake City, UT, 2000. 449～452

[9] Yoon I, Neumann U. Web-based remote rendering with IBRAC[J]. Computer Graphics Forum, 2000, 19(3):C-321～C-330

[10] Koller D, Turitzin M, Levoy M, *et al*. Protected interactive 3D graphics via remote rendering[A]. Proceedings of the ACM SIGGRAPH Conference on Computer Graphics[C]. New York: ACM, 2004. 695～703

[11] Hoppe H. Progressive meshes[A]. Proceedings of the ACM SIGGRAPH Conference on Computer Graphics [C]. New York: ACM, 1996. 99～108

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net