计算机科学 2007 Vol. 34 No. 6

# 一种基于交互式多维传递函数的纹理映射体绘制算法

## 郑杰'姬红兵'杨万海'

(西安电子科技大学电子工程学院 西安 710071)1 (西安电子科技大学研究生院 西安 710071)2

摘 要 本文设计了一种基于空间信息的交互式多维传递函数的纹理映射体绘制算法。该算法不仅可以根据体数据的强度而且还利用体素的空间位置来设定绘制的颜色和阻光度。通过采用一种独特的空间投影变换,根据用户需求, 将体数据划分为不同区域,并分别定义各自的传递函数。该特点使得本文的算法可以有效地对体数据进行交互式分析。在算法实现中,利用了通用图形硬件的可编程特性,在普通 PC上可以达到理想的绘制质量和交互速度。 关键词 直接体绘制,三维纹理映射,多维传递函数,通用图形硬件

#### Interactive Spatial Multidimensional Transfer Functions in Hardware Accelerated Volume Rendering

ZHENG Jie<sup>1</sup> JI Hong-Bing<sup>2</sup> YANG Wan-Hai<sup>1</sup>

(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071)<sup>1</sup> (Graduate School, Xidian University, Xi'an 710071)<sup>2</sup>

**Abstract** Transfer functions are fundamental to direct volume rendering because their role is essentially to make the data visible. In this paper a new method is proposed to design the interactive spatial multidimensional transfer functions in hardware accelerated volume rendering, which assign color and opacity to the volume based not only on the scalar intensity of the dataset but also on the position of voxels in the dataset. The approach uses a unique spatial projection transformation to label the volume into user desired different regions, and defines the transfer functions to each region respectively. The proposed technique utilizes sophisticated graphics hardware functionality, especially the fragment program, to enable interactively select and explore regions of the volume dataset under the standard PC.

Keywords Volume rendering, 3D texture mapping, Multidimensional transfer function, General graphics hardware

### 1 引言

在科学可视化中,直接体绘制逐渐成为三维规则数据场 可视化的一种灵活有效的方法<sup>[1]</sup>。其他的三维可视化技术需 要在绘制前通过计算得到体数据的几何表示,如进行等值面 提取构造多边形网格<sup>[2]</sup>。在直接体绘制中则首先对体数据进 行采样,然后将其转换为可以绘制的光学特性。这种转换被 称为"传递函数",通常根据体数据的各种属性对每个体素指 定绘制时的颜色和阻光度。

传递函数的作用是将体数据"可见",因此传递函数的设 计对理解体数据的空间结构至关重要<sup>[3]</sup>。然而目前的大多数 直接体绘制都采用一维传递函数,仅仅根据体数据的强度信 息来指定颜色和阻光度。通常体数据中重要的信息难以通过 一维传递函数表现出来<sup>[4,5]</sup>。在许多从 CT 或 MRI 获得的医 学体数据中,内部的组织结构非常复杂,一种体数据值可能对 应多个不同的组织边界,传统的一维传递函数很难将它们区 分开来。最近多维传递函数被用来对分类空间进行扩展<sup>[7]</sup>, 更好地区分各种特征。这些传递函数利用数据场的导数信 息,如梯度和二阶偏导等,进行颜色和阻光度的指定。然而这 些方法目前均属于全局分类函数,用户无法对某些重要的空 间特征进行单独分析。

绘制算法中巨大的运算量是影响直接体绘制应用的一个 主要因素<sup>[6]</sup>。在基于图形硬件三维纹理映射的体制中<sup>[8]</sup>,体 数据作为三维纹理被载入图形处理器(GPU),在用切片对纹 理采样时,利用图形硬件的高速并行处理能力进行三次线形 插值,可以对规模适中的体数据进行可交互的绘制并得到较 高的图像质量。

本文提出了一种基于空间多维传递函数的 PC 图形硬件 加速体绘制算法。在传递函数的设计中同时利用体数据强度 和位置信息来指定绘制的颜色和阻光度。通过定义一种空间 投影变换,有效地将绘制结果中的区域直接投影为体数据空 间中的体素,根据用户需求将体数据划分为不同区域。在绘 制过程中,对不同的区域设计空间独立地传递函数。利用目 前通用图形硬件成熟的可编程特性,尤其是 fragment program,对传递函数进行了实现,而且图形硬件的并行处理能 力加速了绘制过程。对大量的医学临床体数据实验表明,该 算法可以有效地显示体数据的结构特征,用户可以方便地对 体数据的空间结构进行交互式的分析。

#### 2 相关研究

传递函数是直接体绘制中的一个重要步骤。He 等<sup>[9]</sup>采 用遗传算法,根据用户选取的绘制缩略图来生成传递函数。 Marks 等<sup>[10]</sup>对绘制图像进行自动分析,在全部参数空间上得 到所有可能的传递函数,并由此生成"设计图库"供用户选择。 König 和 Gröller<sup>[11]</sup>提出了一种传递函数设计的界面,利用体 数据强度、颜色和阻光度空间的关系来布局绘制缩略图。

Levoy 在文[12]中引入了二维传递函数。他利用体数据 强度和梯度幅值来显示不同组织的边界。Kniss 等<sup>[13]</sup>利用数

郑 杰 博士生,主要研究领域为图像处理,计算机图形学,科学可视化等;姬红兵 博士,教授,博士生导师,IEEE 会员,中国电子学会高级会员,主要从事信号与信息处理和目标识别方面的研究工作;杨万海 教授,博士生导师,中国电子学会高级会员,主要从事图像融合、C3I系统数据融合、雷达系统建模、仿真和设计技术等方面的研究工作。

据场的多种导数特征来设计多维传递函数,可以得到更加通 用有效的绘制效果。Kindlmann等<sup>[14]</sup>在传递函数中采用曲 率信息,如脊线等,对绘制进行增强。Lum和Ma<sup>[15]</sup>通过利用 查找表的方式,同时指定颜色、阻光度和光照模型的相关参 数。他们在光照计算中利用一个二维传递函数对组织的边界 进行增强。尽管多维传递函数的使用显著地提高了绘制能 力,但也不可避免地增加了绘制的复杂性。在交互性上,也很 难设计出一种简单直观的方式来操作多维传递函数。另一个 主要的问题是增加了存储空间的开销。每种数据属性都要在 数据预处理时进行计算,然后和体数据一同载入图形硬件的 三维纹理中。由于通用图形硬件内存空间的有限性,降低了 大规模体数据可视化的能力。

本文的主要研究成果是在基于 PC 图形硬件的纹理映射 体绘制中,提出了一种交互式空间独立的多维传递函数设计 算法。通过一个空间投影变换有效地实现了体数据空间区域 的划分,用户可以对指定的区域设计独立的传递函数。整个 交互式的多维传递函数设计过程整合在基于图形硬件加速的 体绘制中,通过一个绘制通道达到可交互的绘制效果,因此该 方法适合于对交互要求较高的应用中。

#### 3 交互式空间多维传递函数的设计

本节主要将对交互式空间多维传递函数的设计算法进行 描述。为了可以在传递函数中有效地利用体素的空间位置信 息,对三维绘制的空间变换进行分析,设计了一种新的空间投 影变换,可以有效地将二维图像空间的像素直接投影为三维 空间的体素。用户交互地在绘制图像上表示出感兴趣区域, 将体数据划分为不同的空间区域,并生成各自独立的传递函 数。使用这种方法可以分析体数据的任意区域,对指定部位 进行有效的增强绘制。

#### 3.1 空间投影变换

三维绘制的主要工作是通过一系列空间变换实现从三维 空间到二维图像显示空间的映射。首先在世界空间中放置三 维模型数据,设定相机模型将世界空间中的三维数据变换到 视空间。视空间提供了一套方便的坐标系来确定进行绘制的 具体位置。第三个变换将视空间的数据转换为屏幕图像空间 的二维数据,通常称为投影变换。

在经过投影变换得到二维的投影坐标后,"剔除"(culling)操作被用来去除那些被相机模型指定的、对用户是不可 见的数据区域。然后采用图形硬件里固化的"剪裁"(clipping)处理来确定一个待绘制物体是否完全在视口以外,并将 视口内的物体切分为小的像素段,其中一些不可见的像素段 被剔除,将可见的部分绘制到屏幕上。

图1表示了对三维物体进行绘制的空间变换过程。"原 始"的三维模型坐标最终被变换为二维屏幕坐标进行显示。



图1 三维绘制空间变换

在三维绘制的空间变换过程中,投影变换完成时三维模 226 - 型坐标已经被转换为了二维屏幕坐标。这些变换结果对应着 计算机屏幕上绘制的相应像素。

对体数据 f(x, y, z),模型坐标表示为(x, y, z),在绘制中,使用模型-视矩阵(model-view matrix)  $M_{mv}$ 来得到视空间坐标(x', y', z'),利用投影矩阵  $M_{project}$ 得到用于最终绘制的视口坐标,即绘制图像坐标(x'', y'')。一般来说,视空间到绘制平面的投影为正交平行投影或透视投影。

这样绘制过程可以表示为:

 $(x'',y'') = M_{project} \cdot M_{nu} \cdot (x,y,z)$ (1)

在绘制的交互过程中,用户在计算机屏幕上手绘出任意 形状来表示感兴趣区域O,区域O中的像素属于绘制图像空 间。构造一个与视口大小一致的二值缓存区,保存感兴趣区 域O的位置信息。对于缓存区中在(xb,yb)的元素,1表示该 元素在区域内部,0则表示在外部。缓存区中的每个元素和 体数据空间的体素之间存在着一对多的映射关系。

这样对给定的区域缓存区元素坐标(x<sub>b</sub>, y<sub>b</sub>),根据式(1) 可以得到相应的在体数据空间中的坐标(x<sub>v</sub>, y<sub>v</sub>, z<sub>v</sub>)。

 $(x_v, y_v, z_v) = (M_{project} \cdot M_{mv})^{-1} \cdot (x_b, y_b)$ (2)

通过缓存区中的相应元素值,可以方便地判断在(x<sub>v</sub>,y<sub>v</sub>, z<sub>v</sub>)的体素是否属于指定的感兴趣区域。

$$f(x_v, y_v, z_v) = \begin{cases} (f, n) & \text{if } : O(x_b, y_b) = 1\\ (f, 0) & \text{if } : O(x_b, y_b) = 0 \end{cases}$$
(3)

其中 f 表示体数据强度,n 表示不同的区域 ID。这样就根据 空间位置信息将体数据划分为不同区域。在交互过程中,用 户可以在上次操作的结果上对体数据进行多次区域划分。

#### 3.2 空间多维传递

在直接体绘制中,传递函数用来将体数据强度映射为一 些光学特征,如颜色和阻光度,然后将体素沿着视线方向进行 混合,最后在视平面上成像。在传统的绘制中,每个体素上的 体数据强度被表示为一个 8 位或 16 位的整数。传统的一维 传递函数经常通过可编辑的分段线性的线段来手工指定,水 平轴为原始体数据强度,垂直轴为相关的颜色和阻光度。在 应用传递函数后,对阻光度,体数据强度被映射为 0 和 1 之间 的实数,表示在该点处的阻光度,1 表示不透明,0 表示透明。 对颜色,一般被映射为 RGB 三个颜色分量。

在本文的绘制过程中,用户在绘制效果图中手绘出感兴趣区域,通过空间投影变化按照空间位置将体数据划分为不同区域,对每个区域都分别指定不同的区域 ID。这样就可以设计一个空间二维传递函数,通过一个二维函数按照指定的体数据强度和区域 ID 得到相应的 RGB 颜色和阻光度。

为此,我们定义了如下的传递函数:

∀ voxelsv<sub>ijk</sub> :  $\{c,a\} = T(f,n)$  (4) 其中  $v_{ijk}$  表示在(i,j,k)处的体素, c 为映射后的 RGB 颜色, a 为映射后的阻光度, T 表示一个二维传递函数, f 表示体素  $V_{ijk}$ 的体数据强度, n 表示体素  $v_{ijk}$ 所属的区域 ID。

这种基于区域的方法可以对体数据中任意感兴趣的区域 指定独立的传递函数,进行不同的绘制。在利用二维查找表 来实现时,每一行都对应着一个区域的传递函数。在交互过 程中,当指定一个新区域时,在表中会增加一行表示相应的传 递函数,而其他部分则保持不变,这样可以使绘制具有一致 性。

目前,基于三维纹理硬件加速的体绘制算法已经成为绘制和分析体数据的一种有效工具<sup>[16,17]</sup>。本文利用硬件的三次线形插值,沿着视线方向对表示体数据的三维纹理进行切

• 236 •

片采样,对这些切片多边形进行光栅化操作就可以重建出体数据<sup>[18]</sup>。二维空间传递函数则由相关纹理采样操作来实现。 相关纹理采样是指将 RGB 颜色分量作为纹理坐标,对相关纹 理进行采样得到最终的颜色<sup>[19]</sup>。这个操作提供了一种通过 查找表来实现任意函数的途径。在绘制中,采用 OpenGL 的 ARB\_fragment\_program 扩展来实时计算和归一化光照中的 梯度,同时计算每个像素点上的光照贡献<sup>[18]</sup>。

在实现中,三维纹理中的每个体素用 16 位数值来表示, 其中 8 位用来表示体数据强度,另外 8 位则表示区域 ID。二 维空间传递函数则表示为一个二维相关纹理。当新区域产生 时,将区域划分后的体数据重新载人图形硬件,更新相应的三 维纹理。在绘制"fragment program"中,通过三维纹理采样得 到对应体素位置的体数据强度和区域 ID,对空间传递函数进 行相关纹理采样操作得到相应的 RGB 颜色和阻光度信息。 这样仅利用一个绘制通道就完成了整个绘制过程,可以达到 满意的交互性能。

#### 4 试验结果

我们利用实际 CT 扫描数据对上述算法进行了测试实 验,所有实验都是在一台 P4,1GB 内存,操作系统为 Windows XP 的 PC 机上完成的,显卡为配有 256M 显存的 NVIDIA GeForce FX5950。采用 C<sup>++</sup> 和 OpenGL 对提出的算法进行 了实现。

表1给出了采用本文提出的算法对来自实际 CT 扫描数 据采用空间二维传递函数进行绘制的性能参数,包括对体数 据进行区域划分的时间,将区域更新后的数据重新载入图形 硬件的时间以及绘制的帧速率。

表1	性能参数。	绘制窗	口大小为	$512 \times 512$
----	-------	-----	------	------------------

体数据	数据规模	区域划分	更新体数据	帧速率
		时间 (s)	(s)	(fps)
心脏	$256 \times 256 \times 229$	2.57	0.36	11.6
引擎	$256 \times 256 \times 110$	1.31	0.28	12.5
桔子	$256 \times 256 \times 389$	4.71	0.38	10.2
膝关节	$256 \times 256 \times 423$	4.72	0.37	10.2
腹部	$256 \times 256 \times 421$	4.71	0.39	10.3

图 2 为采用本文的算法对医学临床心脏 CTA 数据进行 交互式体绘制的结果。图 2(左)为利用传统一维传递函数绘 制的效果,周围的骨骼结构对心脏造成了一定的遮挡。对感 兴趣的心脏部分作为选定区域,根据得到的空间信息进行二 维空间传递函数的设计,改变非感兴趣区域的阻光度得到图 2(右),可以清楚地显示出心脏及其周围血管的结构。



(左) 传统 1D 传递函数

(右)本文提出的绘制方法

图 3 为对引擎和桔子 CT 扫描数据使用空间多维传递函 数进行绘制的结果。图 3(左)为引擎数据绘制结果,在绘制 中对数据中间部分进行区域划分,可以清晰地显示内部结构 信息。图 3(右)则将桔子内部的桔瓣和其它部分一同进行显 示。通过对感兴趣区域设置特定的传递函数,可以非常直观 地展示数据内部不同组织之间的空间关系。





(左) 引擎数据体绘制

(右) 桔子数据体绘制



(左) 膝关节

(右)腹部血管、

图 4 医学临床体数据绘制结果

图 4 为对医学临床 CT 扫描数据进行绘制的结果。图 4 (左)则对膝关节的上下两部分进行显示,对上侧受损的骨关 节突出绘制。在图 4(右)中对体数据进行多次区域划分,对 表示骨骼的区域采用相同的传递函数,具有较低的阻光度,而 对血管增强绘制,更好地显示出血管的空间形状。可见采用 本文基于空间信息的传递函数,能够灵活地挖掘数据的内部 信息,对不同的空间区域进行分析,对体数据得到有效的绘制 效果。

结论 本文提出了一种新的交互式空间多维传递函数的 设计算法,并整合到基于通用图形硬件加速的体绘制算法中。 该算法同时采用体数据强度和体素空间位置信息来进行传递 函数的设计,可以对体数据中的不同区域分别指定相应的传 递函数。这主要是通过一种有效的空间投影变换,将用户感 兴趣区域直接在体数据上进行标示,根据区域信息生成空间 多维传递函数。同时充分利用图形硬件的可编程特性和并行 处理能力进行绘制。由试验结果可见,该算法提供了一种有 效的交互性分析体数据内部结构的方法。

在将来的工作中,可以利用目前最新的 GPU(通用图形 处理器)提供的浮点纹理和更强大的可编程能力优化绘制算 法,将梯度信息引入到传递函数的设计里,提高对细小边界的 绘制能力。另一个可以进行的工作是进行交互技术的研究, 设计一套更加有效的交互工具,对多维函数提供更加灵活的 交互操作。

最后,本文提出的算法可以方便地对体数据进行交互式 绘制,更有效地了解感兴趣区域内部结构的空间关系,使得体 绘制更具实用价值。

## 参考文献

- Nicoletti G M. Advances in Direct Volume Rendering for Visualizing Large3D Data Sets from Scientific and Medical Applications. In: Proceedings of the 5th Biannual, World Automation Congress, 2002. 245~250
- Lorensen W E, Cline H E. Marching Cubes: a High Resolution 3D Surface Construction Algorithm. In: Proceedings of ACM SIGGRAPH'87, 1987. 163~169
- 3 Pfister H, Lorensen B, Bajaj C, Kindlmann G, Schroeder W, Avila L S, Raghu K M, Machiraju R, Lee J. The Transfer Function Bake-off. IEEE Computer Graphics and Applications, 2001. 16~ 22
- 4 黄汉青,唐泽圣.应用于传递函数设定的交互式体绘制工具[J]. 计算机学报,2005,28(6):1062~1067
- 5 Kindlmann G, Durkin J W. Semi-Automatic Generation of Transfer Functions for Direct Volume Rendering. In: Proceedings of IEEE Volume Visualization Symposium, 1998. 79~86
- 6 王文成,孙汉秋,吴恩华.加速体绘制技术[J]. 计算机辅助设计与 图形学学报,2002,14(9):880~886
- 7 Kniss J, Kindlmann G, Hansen C. Multidimensional Transfer Functions for Interactive Volume Rendering. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2002,8(3):270~285
- 8 Cabral B, Cam N, Foran J. Accelerated Volume Rendering and Tomographic Reconstruction using Texture Mapping Hardware. In: Proceedings of ACM Symposium on Volume Visualization,

#### (上接第 178 页)

对每一个输入样本( $x_i$ , $y_i$ )按以下步骤处理:①计算所有 隐节点的输出向量  $Q_i$ ,( $k=1,...,N_h$ );②计算 网络输出  $\hat{y}$ ( $x_i$ )=[ $\hat{y}_1(x^i),...,\hat{y}_l(x^i),...,\hat{y}_n(x^i)$ ]<sup>T</sup>;③为每一个隐节点 计算归一化输出向量  $r_i$ ;④删掉在连续 np 个样本输入期间 归一化输出向量  $r_i$ 的每个分量都小于阈值 $\delta$ 的隐节点;⑤如 果采用扩展 Kalman 滤波器算法,根据简化的网络结构调整 有关矩阵的维度;⑥修剪隐层-输出层连接。

根据以上删减算法,只有那些在连续 np 个样本输入期 间对每个输出节点的输出都不显著的隐节点才会被删减。在 多输出的结果中,可能存在这样一些隐节点,它们对部分输出 单元的输出很不显著,但是对其他一些输出单元有较为显著 的输出。对于这样的隐单元上述算法不作处理。实际上,隐 层-输出层连接的不显著也隐含了关于背景问题的知识。它 可能说明这个隐层节点与其相连接的输出节点的相关性不 大,从而反映出某些输入样本与特定输出节点的相关性不大。 据此,本文进一步提出了修剪隐层-输出层连接的机制,并与 前述隐节点删减算法合并为:

对每一个输入样本 $(x_i, y_i)$ 按以下步骤处理:①计算所有 隐节点的输出向量  $O_k$ , $(k=1, ..., N_h$ );②计算网络输出  $\hat{y}$  $(x_i)=[\hat{y}_1(x^i),...,\hat{y}_l(x^i),...,\hat{y}_n(x^i)]^T$ ;③为每一个隐节点 计算归—化输出向量  $r_k$ ;④修剪在连续 np 个样本输入期间 都小于阈值的 $\delta$ 归一化输出向量的分量  $r_k$ 所对应的隐层-输 出层连接,即令 w=0;⑤删掉在连续 np 个样本输入期间归一 化输出向量  $r_k$ 的每个分量都小于阈值 $\delta$ 的隐节点;⑥如果采 用采用扩展 Kalman 滤波器算法,根据简化的网络结构调整 1994.91~98

- 9 He T, Hong L, Kaufman A, Pfister H. Generation of Transfer Functions with Stochastic Search Techniques. In: Proceedings of IEEE Visualization, 1996. 227~234
- 10 Marks J, Andalman B, Beardsley, Pfister H, et al. Design Galleries: A General Approach to Setting Parameters for Computer Graphics and Animation. ACM Computer Graphics (SIG-GRAPH'97), 1997. 389~400
- 11 König A, Gröller E. Mastering Transfer Function Specification by Using VolumePro Technology. In: Spring Conference on Computer Graphics, 2001,17:279~286
- 12 Levoy M. Display of Surfaces from Volume Data. IEEE Computer er Graphics and Applications, 1988,8(3):29~37
- 13 Kniss J,Kindlmann G, Hansen C. Interactive Volume Rendering using Multi-dimensional Transfer Functions and Direct Manipulation Widgets. In:Proc. of IEEE Visualization, 2001.255~262
- 14 Kindlmann G, Whitaker R, Tasdizen T, Möller T. Curvaturebased Transfer Functions for Volume Rendering: Methods and Applications. In: Proc. of IEEE Visualization, 2003. 513~520
- 15 Lum E B, Ma K L. Lighting Transfer Functions using Gradient Aligned Sampling. In: Proc. of IEEE Visualization, 2004. 289 $\sim$ 296
- 16 Westermann R, Ertl T. Efficiently Using Graphics Hardware in Volume Rendering Applications. ACM Computer Graphics(SIG-GRAPH'98 Proceedings), 1998, 169~179
- 17 Engel K, Kraus M, Ertl T. High-Quality Pre-Integrated Volume Rendering Using Hardware-Accelerated Pixel Shading. In. Proceedings of Eurographics/SIGGRAPH Workshop Graphics Hardware, 2001. 9~16
- 18 Jie Zheng, Hongbing Ji. High Quality Per-Pixel Shading in Texture-Based Volume Rendering. In: Proceedings of the International Conference on Neural Networks and Brain (ICNN&B2005), 2005.1258~1261
- 19 nVidia Developer Relation Site. Available online at:http://developer.nvidia.com

有关矩阵的维度。经过多余隐单元修剪可以提高网络泛化能力,而通过隐层-输出层连接修剪,可以简化网络结构,提高神 经网络的学习效率。

结束语 本文的算法中尝试通过适当的隐节点删减策略 合并这些相似隐单元,给出了修剪隐层-输出层连接的机制, 将它合并到了隐层节点删减的算法当中,以进一步简化网络 结构,更好地拟合原问题。相信这一机制将对多输出的神经 网络训练产生有益的影响。但是另一方面,采用 ILA 算法虽 然能够取得几乎最小的网络结构,但是在算法执行前有许多 预选参数要设定,关于预选参数的设定是一个尚需深入研究 的问题。此外,ILA 算法的许多技术方法是基于经验和直觉 的,缺乏正式的理论证明,这也是许多神经网络研究的共同问 题。这些问题都需要在本文的后续工作中加以深入研究。

## 参考文献

- 1 阎平凡,张长水.人工神经网络与模拟进化计算.北京:清华大学 出版社,2000
- 2 Lu Y W, Sunderararajan N, Saratchandran P. A Sequential Learning Scheme for Function Approximation Using Minimal Radial Basis Function Networks. Neural Computation, 1997 (9): 461~478
- 3 Bors G, Pitas I. Median Radial Basis Function Neural Network. IEEE Transactions on Neural Networks, 1996, 7(6): 1351~ 1364
- 4 肖国强,张为群. 连续学习混沌神经网络的研究. 计算机科学, 2004(4): 12~16
- 5 王晓丹,郑春颖,吴崇明. 一种新的 SVM 对等增量学习算法. 计算 机应用,2006(10):45~48