

基于矢量尺度的图像滤波

李岳阳 王士同

(江南大学信息工程学院·无锡 214122)

摘要 对于医学图像滤波来说,很重要的一点就是滤波后的图像应该尽可能地保留图像中的边缘和细节特征。但通常在滤波过程中,在消除噪声的同时会模糊图像中一些重要的结构信息。在最近几年中,基于尺度的滤波方法已经有效地应用在灰度图像的滤波中。现把基于尺度的方法推广到矢量(彩色)图像的滤波中。在传统滤波方法(矢量中值滤波、基本矢量方向滤波和方向距离滤波)基础上,相应地提出了 3 种基于球尺度的矢量滤波器。新的滤波方法能根据图像中像素的尺度信息,在图像边缘和细节附近,即区域边界执行较小的平滑,而在区域内部进行较大的平滑,从而能够自适应地控制滤波过程。实验结果表明,所提出的滤波方法与传统滤波方法相比,在消除噪声的同时更能够保留图像中的边缘和细节特征。

关键词 医学图像滤波, 矢量图像, 尺度, 区域一致性

中图分类号 TP751 **文献标识码** A

Vectorial Scale-based Image Filtering

LI Yue-yang WANG Shi-tong

(School of Information Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract As to the filtering of medical images, it is important to preserve edges and details. A major drawback of filtering is that it often blurs important structures along with noise. Scale-based filtering methods of scalar images have been studied in recent years. In this paper, we generalized the scale-based filtering method from scalar images to vectorial images. Here we introduced three vectorial scale-based image filtering methods on the basis of conventional VMF, BVDF, and DDF. These new methods use local structure size or "object scale" information to arrest smoothing around fine structures. The object scale allows us to better control the filtering process by constraining smoothing in regions with fine details while permitting effective smoothing in the interior of homogeneous regions. Qualitative and quantitative experiments based on Visible Human Project data sets demonstrate that our proposed methods outperform the corresponding conventional filtering methods in preserving edges and details.

Keywords Medical image filtering, Vectorial image, Scale, Region homogeneity

1 引言

图像在获取或者传输过程中,经常会被加入大量的噪声,严重影响图像的视觉效果,甚至妨碍人们的正常识别。因此,滤除图像的噪声是图像处理中的一项重要任务。

在本文中,我们仅考虑被加性高斯噪声污染的医学矢量(彩色)图像。医学矢量图像可以是 RGB 图像,即图像中每一像素是由 R、G、B 3 个值构成,是一个三维矢量;或者是多光谱图像,即通过核磁共振成像方法得到的 T1-、T2-和 PD-加权的图像。相比于灰度图像,矢量图像能够提供更多的图像信息。因此,在灰度图像基础上,人们逐渐对医学矢量图像进行深入研究。对于矢量图像滤波,学者们已经提出许多有效的滤波方法,比如矢量中值滤波器^[1](VMF)、基本矢量方向滤波器^[2](BVDF)和方向距离滤波器^[3](DDF)等。这 3 种滤波器采用矢量图像像素矢量间不同的距离算法产生不同

的有序统计滤波器。其中 VMF 运用 L_1 或 L_2 范数来计算两矢量间的空间距离, BVDF 使用了矢量间的方向信息,而 DDF 综合了矢量间空间距离和方向信息。对于一个预先确定的滤波窗口内的所有像素矢量,这 3 种滤波器采用 3 种不同的距离算法,寻找一个与其它像素矢量距离和最小的像素,以此像素替代滤波窗口的中心像素。在这 3 种滤波器的算法中,一个主要的特征是滤波窗口的大小通常是固定的。很显然,这 3 种滤波器没有考虑图像中的结构信息。而我们知道,图像中一般既有较为平滑的区域,也有丰富的细节或边缘。滤波窗口固定意味着在图像的所有不同区域都采用相同的平滑。而滤波器去除噪声的性能受滤波窗口尺寸的影响较大,从而使得在抑制图像噪声和保护细节两方面存在一定的矛盾。也就是说,滤波窗口小,可较好地保护图像中的细节,但滤除噪声的能力就会受到限制;滤波窗口大,可较好地抑制噪声,但对细节和边缘的保护能力就会降低。那么,根据图像本

到稿日期:2009-10-19 返修日期:2010-01-05 本文受国家自然科学基金(60773206)资助。

李岳阳(1973-),男,博士生,讲师,主要研究方向为人工智能、图像处理等, E-mail: jsyueyangli@gmail.com; 王士同(1964-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为人工智能、模式识别等。

身的结构信息,如何在图像的不同区域自适应地进行相应的平滑,即在区域内部进行较大的平滑,而在图像边缘和细节附近,即区域边界采用较小的平滑,这是本文所要讨论的问题。

在本文中,我们引入尺度这个概念。在图像的不同区域,自适应地调节滤波窗口的大小,从而达到既能有效抑制噪声,又能保护图像细节和边缘的目的。对于一个由许多张切片组成的三维医学图像。每一张切片可以是一幅 RGB 图像,以一张切片中任一像素为球心能确定一个最大的球,在这球中的所有像素可以认为是与球心所在的这一像素处于同一区域内部。那么,对应于这个像素所在的这个区域(即球),可以用球尺度,即球的半径来表示。由球尺度这个定义,可以得出,在图像边缘和细节附近的像素所对应的球尺度应该较小,而在区域内部的像素所对应的球尺度应该较大。这样,我们可以对较小的尺度所对应的像素执行较小的平滑(较小的滤波窗口),而对较大的尺度所对应的像素进行较大的平滑(较大的滤波窗口),从而实现在区域内部进行较大的平滑,在图像边缘和细节附近,即区域边界进行较小的平滑这个目的。除了基于球尺度的滤波方法^[4],基于张量尺度^[5]和基于全尺度^[6]的滤波方法已经有效地应用在医学(灰度)图像的滤波中,即在滤除噪声的同时,能有效地保留图像中的边缘和细节。

在本文中,我们把基于球尺度的滤波方法推广到矢量(彩色)图像的滤波中。在三维医学图像中,球尺度是用球的半径来定义。在本文中,为简单起见,对于一张切片中的任一像素所对应的球尺度采用圆的半径来定义,即在这个圆中的所有像素都是与圆心所对应的中心像素处于同一区域内部。在传统滤波方法(VMF, BVDF 和 DDF)基础上,通过引进球尺度的概念,我们相应地提出了 3 种基于球尺度的矢量滤波器(BSVMF, BSBVDF 和 BSDDF)。新的滤波方法能根据图像中像素的尺度信息,在图像边缘和细节附近,即区域边界执行较小的平滑,而在区域内部进行较大的平滑,从而能够自适应地控制滤波过程。实验结果表明,我们所提出的滤波方法与传统滤波方法相比,在消除噪声的同时,更能够保留图像中的边缘和细节特征。

2 方法

在引言中,我们把球尺度应用到图像滤波中。那么对于一图像,如何确定该图像中每一像素所对应的球尺度呢?为计算每一像素所对应的球尺度,我们先定义一些术语^[7]。设整数集合用 Z 表示, Z^n 是 n 维数字网格,在 Z^n 上的元素被称之为空间元素(spels)。 $n=2$, 空间元素称为像素(pixels); $n=3$, 空间元素称为体素(voxels)。一个在 Z^n 上的模糊关系 α , 也称为一个模糊空间元素邻接,可以定义如下:对于任何空间元素 $c, d \in C$,

$$u_\alpha(c, d) = \begin{cases} 1, & \text{if } c=d \text{ or } \|c-d\| \leq 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\|c-d\|$ 是 c 和 d 间的距离。 (Z^n, α) 称为一个模糊数字空间。一个数字矢量图像可以看作在一个模糊数字空间 (Z^n, α) 上的一幅矢量图像,并可以定义为 $C=(C, f)$, 其中 C 是一个空间元素的矩形排列,称之为 C 上的域, $f=(f_1, f_2, \dots, f_l)^T$ 是一个矢量图像强度函数,其定义域为一组整数集合 $[L_1, H_1] \times [L_2, H_2] \times \dots \times [L_l, H_l]$, 其中 l 是矢量维数。例如,对于一个 24 位的 RGB 彩色图像, l 等于 3, L_i 和 H_i ($i=1, 2, 3$) 分别为 0 和 255。

2.1 尺度估计

对于任何空间元素 $c \in C$, 一个以 c 为球心、 r 为球半径的超球 $B_r(c)$ 可以定义为:

$$B_r(c) = \{d \in C \mid \|c-d\| \leq r\} \quad (2)$$

式中, $\|c-d\|$ 是 c 和 d 间的距离。 $FO_r(c)$ 定义为:

$$FO_r(c) = \frac{\sum_{d \in B_r(c) - B_{r-1}(c)} W_h(f(c) - f(d))}{|B_r(c) - B_{r-1}(c)|} \quad (3)$$

式中, $f(c)$ 和 $f(d)$ 分别为空间元素 c 和 d 的强度矢量值。 $FO_r(c)$ 可以看作是一个由 $B_r(c) - B_{r-1}(c)$ 构成的超球边缘区域的一组空间元素的集合,在这个边缘区域内所有空间元素同 c 处于同一区域内部。 $|B_r(c) - B_{r-1}(c)|$ 是区域 $B_r(c) - B_{r-1}(c)$ 内所有空间元素的个数。 W_h 是一个非归一化的多元高斯函数:

$$W_h(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}(x^T \Sigma_h^{-1} x)\right) \quad (4)$$

式中, Σ_h 是一个协方差矩阵。文献[7]中给出了 Σ_h 的计算方法。该计算方法考虑了除强度梯度值超过一个确定值之外的整个空间元素强度梯度值。比如,在图像区域边界附近,对于像素的每一个矢量组成部分 $i(1 \leq i \leq l)$, 相邻像素间的强度差值(梯度值) $c f_i(c) - f_i(d) c$ 可能会比较大。如果该梯度值超过一个给定值,那么该梯度值在 Σ_h 的计算中将不会被包括在内。对于满足式(1)的任何空间元素 $c, d \in C$, 在每一个矢量组成部分 $i(1 \leq i \leq l)$, 首先计算出 $|f_i(c) - f_i(d)|$ 的直方图 $h_i(x)$, 其中 $x \in [0, H_i - L_i]$ 。设 F_i 是满足下式的一个最小整数:

$$\frac{\sum_{k=0}^{F_i} h_i(k)}{\sum_{k=0}^{H_i - L_i} h_i(k)} \times 100 \geq \lambda \quad (5)$$

式中, λ 的值采用文献[7]中的给定值 90。然后 Σ_h 可以由下式估计出:

$$\Sigma_h^{-1} = \frac{\sum_{\substack{c, d \in C \\ |f_i(c) - f_i(d)| < F_i \\ |f_j(c) - f_j(d)| < F_j}} u_\alpha(c, d) (f_i(c) - f_i(d)) (f_j(c) - f_j(d))}{\sum_{\substack{c, d \in C \\ |f_i(c) - f_i(d)| < F_i \\ |f_j(c) - f_j(d)| < F_j}} u_\alpha(c, d)} \quad (6)$$

式中, $1 \leq i, j \leq l$ 。

在计算出式(4)中高斯函数的协方差矩阵 Σ_h 后,就可以通过式(3) $FO_r(c)$ 的定义得到每一个空间元素 c 的球尺度。对于任一空间元素 c , 以 c 为球心,从 1 开始逐渐增大球半径 r , 对应于每一个球半径 r , 可以得到相应的 $FO_r(c)$ 值。当 $FO_r(c)$ 的值(对应的球半径假设为 r_c) 小于一个确定的阈值 τ (阈值 τ 为 0.85, 可参考文献[7]) 时,可以认为由 $B_r(c) - B_{r-1}(c)$ 组成的边缘区域内的空间元素与 c 已处于不同的区域。那么对应于这个空间元素 c 的球尺度 r_s 即为 $r_c - 1$, r_s 就是对应于 c 的最大的一个超球的球半径,在该超球内部所有的空间元素与 c 是处于同一区域内部的。对于一个矢量图像 $C=(C, f)$ 上的每一个空间元素,计算出相应的球尺度之后,可以得到一个球尺度图像 $C_s=(C, r_s)$ 。

2.2 基于球尺度的矢量滤波器

在本节中,我们应用球尺度的概念,在传统滤波方法、矢量中值滤波(VMF)、基本矢量方向滤波(BVDF)和方向距离滤波(DDF)基础上,相应地提出了 3 种基于球尺度的矢量滤波器,即为球尺度矢量中值滤波(BSVMF)、球尺度基本矢量方向滤波(BSBVDF)和球尺度方向距离滤波(BSDDF)。此 3

种基于球尺度的滤波器能根据图像的结构信息,对应于图像中每个像素求得相应的球尺度,从而可以自适应地选择滤波窗口的大小,控制图像中不同区域内的平滑强度,最终实现既能有效抑制噪声又能保护图像细节和边缘的目的。

在运用新滤波器进行噪声滤除过程中,关键的问题就在于估算出对应于每一个像素的球尺度的大小,进而得到一个对应于矢量图像 $C=(C, f)$ 的球尺度图像 $C_s=(C, r_s)$ 。在图 1 中,(a)是从 Visible Human Project 库中得到的一张 2D 切片。对应于该切片矢量图像上任一像素 c ,运用上节中球尺度的计算方法,可以得到以 c 为圆心的一个最大圆,在该圆内所有的像素同 c 是处于同一区域内部的,那么此时的圆半径即为对应于像素 c 的球尺度。按照同样的方法估算出该切片图像上全部像素点的球尺度后,最终可以得到对应于该切片图像的一个球尺度图像(见图 1(b))。

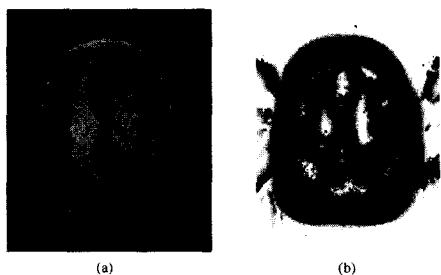


图 1 (a) 从 Visible Human Project 库中得到的一张 2D 切片矢量图像;(b) 对应于(a)中矢量图像的球尺度图像。

图 1

需要说明的是,为了显示清晰,该图中的每个像素的图像强度已经按比例扩展到 $[0, 255]$ 的范围内。

在图 1(b)球尺度图像中,对应于每一个像素,其球尺度的大小与其图像强度,即亮度大小存在着一定的对应关系。也就是说,该像素的球尺度越大,表明其图像强度即亮度也就越大。从图中可以明显地看出,在区域内部,球尺度一般较大。而在区域边界,即图像边缘和细节区域,球尺度一般较小。这样,在滤除噪声时,对应于区域内部的像素,可以选择相对较大的滤波窗口;而对应于区域边界的像素,可以选择相对较小的滤波窗口。从而能够根据图像本身的结构信息,在区域内部进行较大的平滑,而在区域边界进行较小的平滑,自适应地控制平滑强度,最终达到既能有效抑制噪声又能保护图像细节和边缘的目的。

3 种传统滤波器(VMF, BVDF 和 DDF)在滤除噪声过程中,对于噪声图像中每一像素,是以该像素为中心,预先确定一个固定的滤波窗口。对于该窗口内所有的像素矢量,分别采用矢量图像像素矢量间 3 种不同的距离算法,寻找一个与其它像素矢量距离和最小的像素,以此像素替代滤波窗口的中心像素。这 3 种传统滤波器,一个主要缺陷在于其滤波窗口的大小是固定的。当选用的滤波窗口小的时候,滤除噪声的能力会受到限制;而当选用的滤波窗口大的时候,又不能有效地保留图像中的细节和边缘。但保留这些细节和边缘,特别在医学图像中,显得尤其重要。因此如何根据图像本身的结构信息,在图像的不同区域优化地选择滤波窗口大小,是这 3 种传统滤波器的问题所在。

为了能够自适应地选择滤波窗口的大小,有效地解决噪声滤除及保留图像细节和边缘的矛盾,本文在 3 种传统滤波方法的基础上,引入球尺度的概念,相应地提出 3 种基于球尺度的滤波方法:BSVMF,BSBVDF 和 BSDDF。对于噪声图像

$C=(C, f)$,首先运用 2.1 节的方法得到相应的球尺度图像 $C_s=(C, r_s)$ 。然后对于噪声图像中的任一像素,以该像素为圆心,其球尺度为圆半径确定一个圆(即对应于该像素的滤波窗口)。最后对该圆内的所有像素分别采用与 VMF, BVDF 和 DDF 相同的矢量距离算法,求得一个与其它像素矢量距离和最小的像素,以此像素替代圆心所对应的中心像素。

下面是对于噪声图像 $C=(C, f)$,在得到其球尺度图像 $C_s=(C, r_s)$ 基础上,以 BSVMF 为例,求得滤波后图像 $C'=(C, f')$ 的算法。

算法 1 BSVMF

```

输入:  $C, C_s$ 
输出:  $C'$ 
begin
  for 噪声图像  $C$  中每一像素  $c$  do
    由球尺度图像  $C_s$  得到对应于像素  $c$  的球尺度  $r=r_s(c)$ ;
    得到满足式(2)的所有像素矢量;
    求得一个与其它像素矢量空间距离和最小的像素  $f'(c)$ ;
  end for
end

```

3 实验

为测试基于球尺度的 3 种新滤波器的性能,分别与 3 种传统滤波器相比较,对从 Visible Human 库中取得的矢量医学图像进行测试。这些图像大小为 $570 \times 670 \times 60$,像素大小为 $0.33 \times 0.33 \times 0.33 \text{mm}^3$ 。图 2(a)是其中一张切片图像。噪声图像是在原图像上加入了与图像强度相关的零偏差高斯噪声。其中一幅噪声图像见图 2(b)。

3.1 定量评价

在图 2 中,3 种传统滤波器(VMF, BVDF 和 DDF)的滤波结果分别为(c),(e),(g),对应的 3 种基于球尺度的新滤波器(BSVMF,BSBVDF 和 BSDDF)的滤波结果分别为(d),(f),(h)。从图中可以看出,3 种基于球尺度的新滤波器在边缘和细节保留方面(特别是图中箭头所示区域)要优于相应的 3 种传统滤波器。

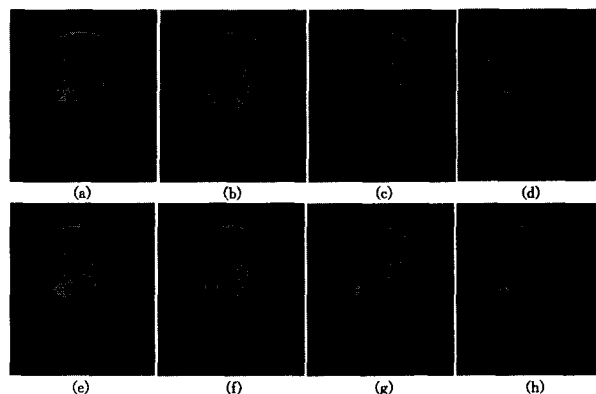


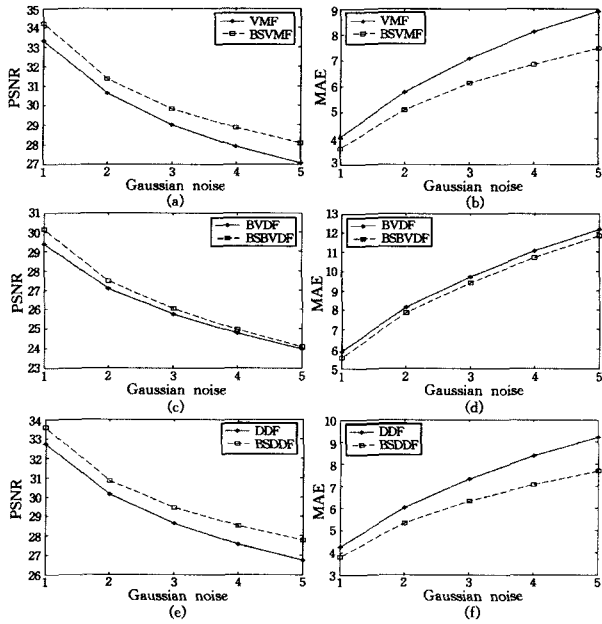
图 2 (a) 原始切片图像;(b) 加入了与图像强度相关的零偏差高斯噪声的噪声图像;(c) VMF 滤波图;(d) BSVMF 滤波图;(e) BVDF 滤波图;(f) BSBVDF 滤波图;(g) DDF 滤波图;(h) BSDDF 滤波图。

图 2 3 种基于球尺度的新滤波器和 3 种传统的滤波器的滤波效果对比

3.2 定性评价

除了上述定量评价之外,还需对滤波图像进行必要的定性分析。图 3 是 3 种基于球尺度的新滤波器和相应的 3 种传统滤波器的性能对比图。实验中所采用的定性评价指标为

PSNR 和 MAE。水平 x 轴为高斯噪声的强度大小,从左向右,分为 5 个等级,逐渐增大。从图 3 中可以明显看出,新滤波器的性能要优于与其相应的传统滤波器。



水平 x 轴方向,从左向右,高斯噪声(5 个等级)逐渐增大。

图 3 3 种基于球尺度的新滤波器和 3 种传统的滤波器的滤波性能对比

结束语 本文将基于球尺度的滤波方法从灰度医学图像滤波推广到矢量(彩色)医学图像滤波中。在 3 种传统滤波方法基础上,相应地提出了 3 种基于球尺度的矢量滤波方法。

基于球尺度的新滤波方法能根据图像中像素的结构(尺度)信息,自适应地选择滤波窗口,从而达到噪声滤除及保留边缘和细节之间的平衡。从实验的定量和定性分析中,我们可以看出新滤波方法在消除噪声的同时,能很好地保留图像中的边缘和细节特征。

参考文献

- [1] Astola J, Haavisto P, Neuvo Y. Vector median filters[J]. Proceedings of the IEEE, 1990, 78(4): 678-689
- [2] Trahanias P E, Venetsanopoulos A N. Vector directional filters—a new class of multichannel image processing filters[J]. Image Processing, IEEE Transactions on, 1993, 2(4): 528-534
- [3] Karakos D G, Trahanias P E. Combining vector median and vector directional filters: the directional-distance filters[C]// Proceedings, International Conference on Image Processing, 1995: 171-174
- [4] Saha P K, Udupa J K. Scale-based diffusive image filtering preserving boundary sharpness and fine structures[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2001, 20(11): 1140-1155
- [5] Saha P K. Tensor scale: A local morphometric parameter with applications to computer vision and image processing[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2005, 99(3): 384-413
- [6] Souza A, Udupa J K, Madabhushi A. Image filtering via generalized scale[J]. Medical Image Analysis, 2008, 12(2): 87-98
- [7] Zhuge Y, Udupa J K, Saha P K. Vectorial scale-based fuzzy-connected image segmentation[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2006, 101(3): 177-193

(上接第 241 页)

(3)资源使用效率比较

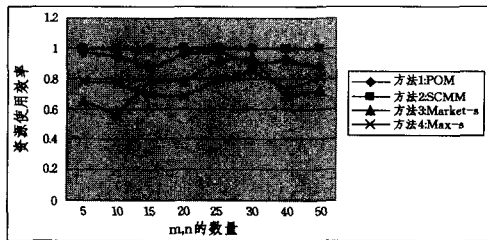


图 4 调度算法资源使用效率比较

结束语 寻找较优的服务调度方案,为用户提供满意的服务是服务计算的主要内容,本研究是在原有研究的基础上进一步进行的探索,把 PSO 寻优与本体和市场机制相结合,目的是为了解决当前服务调度过程中寻找调度方案速度慢、服务调度时缺少语义,以及资源利用效率不高的问题,编程及对比实验表明,本文方法执行时间较短,收益较好,效率较高,为根据语义获取满意的服务提供了一条途径。将来的研究包括进一步改进语义相似度本身的度量方法,把粒子群寻优算法的最新成果应用在本研究中以改进运算结果,获取更好的调度方案。

参考文献

- [1] Kennedy J, Eberhart R C. Particle Swarm Optimization[C]// Proc. of the IEEE Conf. on Neural Networks, IV. Perth; IEEE Press, 1995: 1942-1948
- [2] 胡旺,李志蜀. 一种更简化而高效的粒子群优化算法[J]. 软件学报, 2007(4)
- [3] Shi Y, Eberhart R C. A modified particle swarm optimizer[C]// Proc. of the IEEE Int'l Conf. of Evolutionary Computation. IEEE Press, 1998: 69-73
- [4] Clerc M. The swarm and the queen: Towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization[C]// Proc. of the ICEC. Washington, 1999: 1951-1957
- [5] 王刚,邱玉辉. 基于市场和本体的服务调度模型[J]. 计算机科学, 2008(8)
- [6] 王刚,邱玉辉. 基于语义元的相似度计算[J]. 计算机应用研究, 2008(11)
- [7] Paolucci M. Semantic Matching of Web Service Capabilities[C]// Proceedings of the First International Semantic Web Conference, 2002
- [8] Weinstein P, Birmingham W. Comparing concepts in differentiated ontologies[C]// Proceedings of the Twelfth Workshop on Knowledge Acquisition, Modeling and Management, October 1999
- [9] 易纲,海闻. 微观经济学[M]. 上海:上海人民出版社, 2003: 185-201
- [10] 曹鸿强,肖依. 一种基于市场机制的计算网络资源分配方法[J]. 计算机研究与发展, 2002(8)
- [11] 鲁昌,许永国. 一般均衡理论[M]. 上海:上海财经大学出版社, 2003