

多信息融合的模糊边缘检测技术^{*}

宗晓萍 徐 艳 董江涛

(河北大学电子信息工程学院,保定 071002)

(2006 年 2 月 17 日收到 2006 年 4 月 8 日收到修改稿)

提出了一种有效的模糊边缘检测算法,与传统的单纯基于图像增强技术的模糊边缘检测算法不同,此算法采用像素点的多种信息作为边缘检测的特征信息,利用模糊逻辑对这些信息进行综合,使边缘检测器输出的边缘信息更加完善且有效.实验表明,对于处理实际工作环境中的高噪图像的边缘检测问题,此算法是一种实用而有效的方法.

关键词:边缘检测,模糊算法,融合

PACC: 0210, 4230

1. 引 言

在数字图像中,边缘具有能勾画区域的形状,能被局部定义以及能够传递大部分的图像信息等许多优点,因此,边缘检测可以看作是图像处理的关键,广泛应用于图像分割、特征提取、纹理分析等领域.

传统的边缘检测方法有两类:空域检测和频域检测.传统的空域检测方法有 Prewitt 算子^[1], Sobel 算子^[2], Kirsch 算子、阈值分类、Canny 算法^[3]等,这种边缘提取方法主要是考察图像的每个像素在每个邻域内的灰度变化,根据边缘邻近一阶或二阶方向导数变化规律来检测边缘;频域方法主要是用各种滤波器在频域上对图像进行滤波处理^[4].在上述方法中, Canny 算法是目前应用效果比较好的边缘检测算法,该算法对图像中各个区域内灰度值对比度较大的边缘提取效果较好,而对灰度对比度较小或有较大噪声的图像,边缘检测效果很不理想,或根本无法检测出来.

在图像处理领域中,一般认为图像本身具有模糊性,对图像处理结果的描述、解释带有模糊性,因此模糊理论用于图像的处理具有可行性.文献[5, 6]中就提出了把模糊集理论中的模糊关系应用于对色彩相似性的判断,从而提高了图像检索的准确性和检索速度.基于物体边界的模糊性, Pal^[7]提出了一种图像边缘检测模糊算法,将模糊集理论引入到图

像的边缘检测中,利用模糊增强技术来增加不同区域之间的对比,并最终达到边缘提取.相对于传统的空域微分算法, Pal 算法有较好的抑噪性能和边缘检测效果,但是这种算法采用幂函数形式的模糊隶属函数将空间域灰度图像变换为相应的模糊集,其运算量较大,而且会损失图像中部分低灰度值的边界信息^[8].针对传统的 Pal 算法的缺陷,本文提出了一种综合梯度、相角和方向多种信息的模糊边缘检测方法,这一算法一方面克服了 Pal 算法的不足之处,另一方面也有利于准确地检测含有较大噪声的图像边缘.

2. 算法分析

在经典的 Canny 算法中,除了灰度信息外,像素点的相角信息也被融入到算法中,从而能够获得更加精确的边缘.虽然 Canny 算法中包含了高斯平滑的抑噪作用,但高斯滤波均方差需要人为设定,不同的高斯滤波系数对 Canny 边缘检测结果影响很大,造成算法对噪声的敏感性,容易造成伪边缘或丢失一些真实边缘的细节部分.在实际中,由于工作环境的限制,设备获取的图像一般都含有噪声,所以好的边缘检测算法一定要能够从含有噪声的图像中有效地恢复出边缘.基于 Canny 算法的启发,本文提出的多种信息融合的模糊边缘检测算法就可以达到这一目的.

^{*} 河北省自然科学基金(批准号:A2004000089)和国家教育部留学回国人员科研启动基金(批准号:48371109)资助的课题.

在经典的空域算法中,一般都是对原始图像进行导数运算以突出边缘,一阶导数比二阶导数更不容易受到噪声的影响^[9],原始图像通过求一阶偏导数得到的梯度图像记为 ∇f ,

$$\nabla f = \begin{bmatrix} G_x(x, y) \\ G_y(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial f(x, y) / \partial x \\ \partial f(x, y) / \partial y \end{bmatrix}. \quad (1)$$

对 ∇f 进行模值运算,得到

$$\text{mag}(x, y) = \sqrt{|G_x(x, y)|^2 + |G_y(x, y)|^2}, \quad (2)$$

对 mag 进行归一化处理,即

$$\text{mag}(x, y) = \text{mag}(x, y) / \max(\text{mag}), \quad (3)$$

其中 $\max(\text{mag})$ 是指模值图像 mag 中的最大值,经过归一化处理之后 $\text{mag}(x, y)$ 的值全部分布在区间 $[0, 1]$ 上.

为了使信号和噪声更好地分离,可以对归一化的梯度图像 mag 进行阈值处理,将梯度值在某个既定阈值以下的像素点赋予零值,在压缩大量噪声的同时凸现出主要的边缘^[10].然而阈值的选取非常关键,如果阈值选取过高,一些边缘像素会被错误地置零,从而引起边缘的不连续性;如果阈值选取过低,虽然边缘信息得以保留,但噪声的滤除又受到了限制,可见单阈值处理方法可能会造成假边缘或边缘的不连续等问题.

为此,文献[3]中采用双阈值处理技术来解决这一问题.梯度值大于较高阈值 T_U 的像素点被标志为“既定边缘点”,作为边缘增长的起始像素点——种子点.种子点邻域内的所有梯度值大于较低阈值 T_L 的像素点被看成“待定边缘点”,通过对待定边缘点的模糊处理来最终完成边缘增长过程. T_U 和 T_L 这两个值的合适选取取决于处理后的图像矩阵,如果取值不合适,则进行双阈值处理的图像结果中将含有较大的噪声,在加较大的噪声时处理后的图像会模糊不清.

经过双阈值处理后,虽然梯度平滑区域的假边缘能够有效的去除,但是边缘点邻域内的部分噪声仍然可能被误判为“待定边缘点”.由于待定边缘点具有前面所说的模糊性,就可以应用模糊的方法对其进行处理.

对每一个待定边缘点,其成为边缘点的隶属度由 $\mu_s(x, y)$ 表示, $\mu_s(x, y)$ 是由模糊逻辑中的交与并的概念得出的:

$$\mu_s(x, y) = k[\max(\mu_g(x, y), \mu_p(x, y), \mu_d(x, y))] + (1 - k) \min(\mu_g(x, y), \mu_p(x, y), \mu_d(x, y)), \quad (4)$$

其中 $\mu_g(x, y)$, $\mu_p(x, y)$, $\mu_d(x, y)$ 分别表示像素点的梯度、相角和方向信息的隶属度函数.利用模糊逻辑将多种信息加以融合来表示同一像素点的隶属度,使边缘信息更加丰富.可调参数的调整可以直接影响 $\mu_s(x, y)$ 的结果:增大 k 值,则某一种信息会在最终的 $\mu_s(x, y)$ 中起到决定性的作用;反之,减小 k 值,则这三种信息对 $\mu_s(x, y)$ 的综合作用力将得到增强.

待定点的 $\mu_s(x, y)$ 与种子点越相似(即待定点的隶属度越大),则该待定点最终成为边缘点的可能性就越大.用 $S_p(x, y, x', y')$ 表示点 (x, y) 与参考点 (x', y') 的相似程度,其中参考点 (x', y') 一般是取种子点.这样, $\mu_s(x, y)$ 可以表示为

$$\begin{aligned} \mu_s(x, y) &= S_p(x, y, x', y') \\ &= k_1[\max(S_{s1}(x, y, x', y'), \\ &\quad S_{s2}(x, y, x', y'), \\ &\quad S_{s3}(x, y, x', y'))] \\ &\quad + k_2[\min(S_{s1}(x, y, x', y'), \\ &\quad S_{s2}(x, y, x', y'), \\ &\quad S_{s3}(x, y, x', y'))], \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $S_{si}(x, y, x', y')$ ($i = 1, 2, 3$)分别表示待定边缘点与种子点在梯度、相角和方向方面相似的隶属度函数.

3. 三方面信息的隶属度函数的确定

$S_{si}(x, y, x', y')$ ($i = 1, 2, 3$)由待定点 (x, y) 和种子点 (x', y') 间的差异值 $\Delta P(x, y)$ 决定, $\Delta P(x, y)$ 表示梯度差异 $\Delta G(x, y)$ 、相角差异 $\Delta \alpha(x, y)$ 或方向差异 $\Delta d(x, y)$:

$$S_{si}(x, y, x', y') = \begin{cases} 1 & |\Delta P(x, y)| \leq P_{\text{similar}}, \\ 1 - \frac{|\Delta P(x, y)| - P_{\text{similar}}}{P_{\text{different}} - P_{\text{similar}}} & P_{\text{similar}} < |\Delta P(x, y)| < P_{\text{different}}, \\ 0 & P_{\text{different}} \leq |\Delta P(x, y)|, \end{cases} \quad (6)$$

P_{similar} 和 $P_{\text{different}}$ 两个参数分别代表待定点与参考点特征相似或不同的临界值 ,可代表梯度(G_{similar} 和 $G_{\text{different}}$),相角(α_{similar} 和 $\alpha_{\text{different}}$)或方向(d_{similar} 和 $d_{\text{different}}$)其中之一 .

当 $\Delta P(x,y)$ 表示梯度差量时 ,可以具体写成 $\Delta G(x,y)$ $\Delta \alpha(x,y)$ 代表待定边缘点与参考点之间归一化了的梯度差 :

$$\Delta G(x,y) = (\nabla f(x,y) - \nabla f(x',y')) / \nabla f(x,y), \tag{7}$$

式中 $\nabla f(x,y)$ 和 $\nabla f(x',y')$ 分别代表了 (x,y) 点和参考点 (x',y') 的梯度值的大小 .

同样 $\Delta \alpha(x,y)$ 代表待定边缘点与参考点之间

的相角差 :

$$\Delta \alpha(x,y) = \alpha(x,y) - \alpha(x',y'), \tag{8}$$

其中 (x,y) 点的像素的相角 $\alpha(x,y)$ 表示可由下式求得 :

$$\alpha(x,y) = \arctan(G_y(x,y)/G_x(x,y)). \tag{9}$$

图像像素点的方向特性由图像分别与 12 幅模板卷积得出 ,这 12 个模板(如图 1 所示)都是由 7×7 的矩阵构成 ,每一个模板中的非零元素以不同的排列方式通过中心点(中心点元素必不为零) ,卷积运算后产生的梯度图像的编号分别为 1—12. 在 12 幅梯度图像中 ,与某一点 (x,y) 相对应的梯度取最大值的图像编号定义为该点的方向值 $d(x,y)$ 则

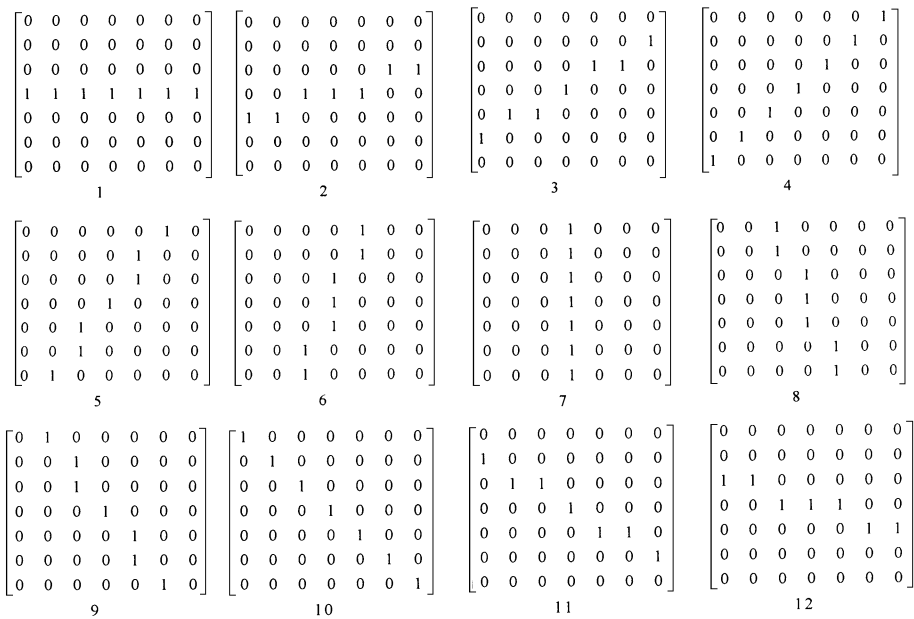


图 1 用于方向特性的 12 个模板

$$d(x,y) = \{d(x,y) | 1 \leq d(x,y) \leq 12, d(x,y) \in N\}. \tag{10}$$

待定边缘点 (x,y) 与参考点 (x',y') 的方向差值 $\Delta d(x,y)$ 可由下式给出 :

$$\Delta d(x,y) = \begin{cases} |d(x,y) - d(x',y')| & |d(x,y) - d(x',y')| \leq 6, \\ 12 - |d(x,y) - d(x',y')| & |d(x,y) - d(x',y')| > 6. \end{cases} \tag{11}$$

4. 边缘检测流程及参数的确定

图 2 为本算法流程图 ,在实际进行边缘检测时 ,对得到的梯度图像进行双阈值分割 ,采用文献 [11] 中确定较高阈值的方法可以求出作为既定边缘点(种子点)的最小梯度值 T_U ,待定边缘点的最小梯度值 T_L 可按下式确定 :

$$T_L = T_U \times t, \tag{12}$$

其中 $t < 1$,通过在实验中不断调整而最终确定 t 的取值 .此实验中 , T_U 和 T_L 分别取值为 0.1545 和 0.0927 ,且取值满足下列关系式 :

$$(T_U - T_L) / T_U = 40\%. \tag{13}$$

为使待定点梯度介于 $P_{\text{different}}$ 和 P_{similar} 两值中间 , G_{similar} 和 $G_{\text{different}}$ 可以取成 70% 和 10% ;在 $P_{\text{different}}$ 和 P_{similar} 代表相角这一特征时 , α_{similar} 和 $\alpha_{\text{different}}$ 分别为

70°和 10°; d_{similar} 和 $d_{\text{different}}$ 取为 5 和 1.这样,就可以通过(7)式求出 $S_{si}(x,y,x',y')$ ($i=1,2,3$),从而最终由(4)式求得 $\mu_s(x,y)$,此处参数 k 的值取为 0.5.

在进行边缘扩充的过程中,我们把种子点 8 邻域中最有可能成为边缘点的待定边缘点扩充为边缘点,但实际上在种子点的邻域中可能有几个边缘点,在这种情况下,同一个待定点可能属于两个边缘点,则该点的 $\mu_s(x,y)$ 的值是相对于两个边缘点的 μ_s 值中最大的一个值.也就是说对同一个待定点,可能要计算不止一次的 μ_s 值,其中最大的那个值作为该点最终的 $\mu_s(x,y)$,根据该值进行判断是否进行扩充.

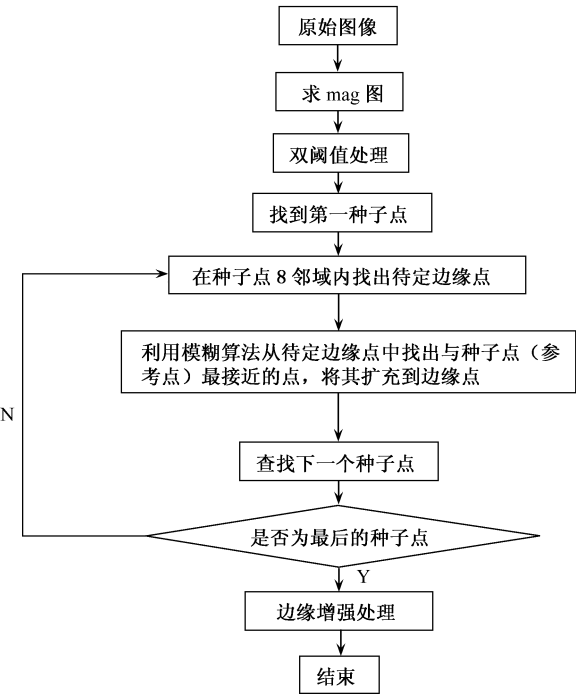


图 2 边缘检测模糊算法流程图

如果直接使用 $\mu_s(x,y)$ 进行边缘检测运算,由于 $\mu_s(x,y)$ 的范围是 0—1,使得边缘检测器输出的所有像素点都会得到几乎相同程度的增强处理,不能很好的突出边缘.因此,引进灰度图像 $I_G(x,y)$ 作为最终的检测器输出图像:

$$I_{GI}(x,y)=(1+k\mu_s(x,y))I_G(x,y), \tag{14}$$

其中, $I_G(x,y)$ 是原始的灰度图像,可调系数 k 的取值范围是 1.5—3.0, k 的调整可扩大 $\mu_s(x,y)$ 的取值范围, $1+k\mu_s(x,y)$ 与 $I_G(x,y)$ 相乘可以拉大 $I_{GI}(x,y)$ 像素点的灰度差距,从而突出边缘,为下一步对 $I_{GI}(x,y)$ 进行单阈值处理提供较好的阈值选择空间,最终消除残留的噪声.在本仿真试验中,通过多次重复调整,当 k 取 2.7—3.0 时,边缘检测器的抗噪能力比较好.

最后,对增强后的图像 $I_{GI}(x,y)$ 进行简单的单阈值处理, $I_{GI}(x,y)$ 中高于该阈值的点最终被确定为边缘.

5. 试验结果的比较

图 3 是运用 Canny 算法和本文提出的新算法对混杂有强烈噪声的图像分别进行边缘检测的结果.图中 A1、A2、A3 三幅图像中分别含有噪声功率谱密度为 0.05 的椒盐噪声,均值为 0.021 的高斯噪声和方差为 0.02 的 speckle 噪声;B1、B2、B3 是 Canny 算法的处理结果,可见对于处理类似图 3 中 A1、A2、A3 这种强噪声,Canny 算法的检测效果并不理想,边缘信息不能得到很好的显示,图像显得模糊不清;C1、C2、C3 所示是经新算法得到的分别对应含有不同噪声的原始图像的边缘,虽然仍然有少量的噪声或是假边缘的存在,但是主要物体的边缘得以很好的表现.

6. 结 论

本文提出的算法是受 Canny 算法中不单纯基于梯度的边缘检测思想的启发,利用图像边缘本身所特有的模糊性,融合像素点的梯度、相角和方向特征多种信息,利用简单的比较、加减等模糊逻辑运算来完成含有强噪声的图像的边缘检测.实验中,通过和 Canny 算法的比较,可以看出此算法在抑制噪声、减少假边缘方面有很好的效果,尤其适合对实际工作中含有强噪声的图像进行边缘检测.

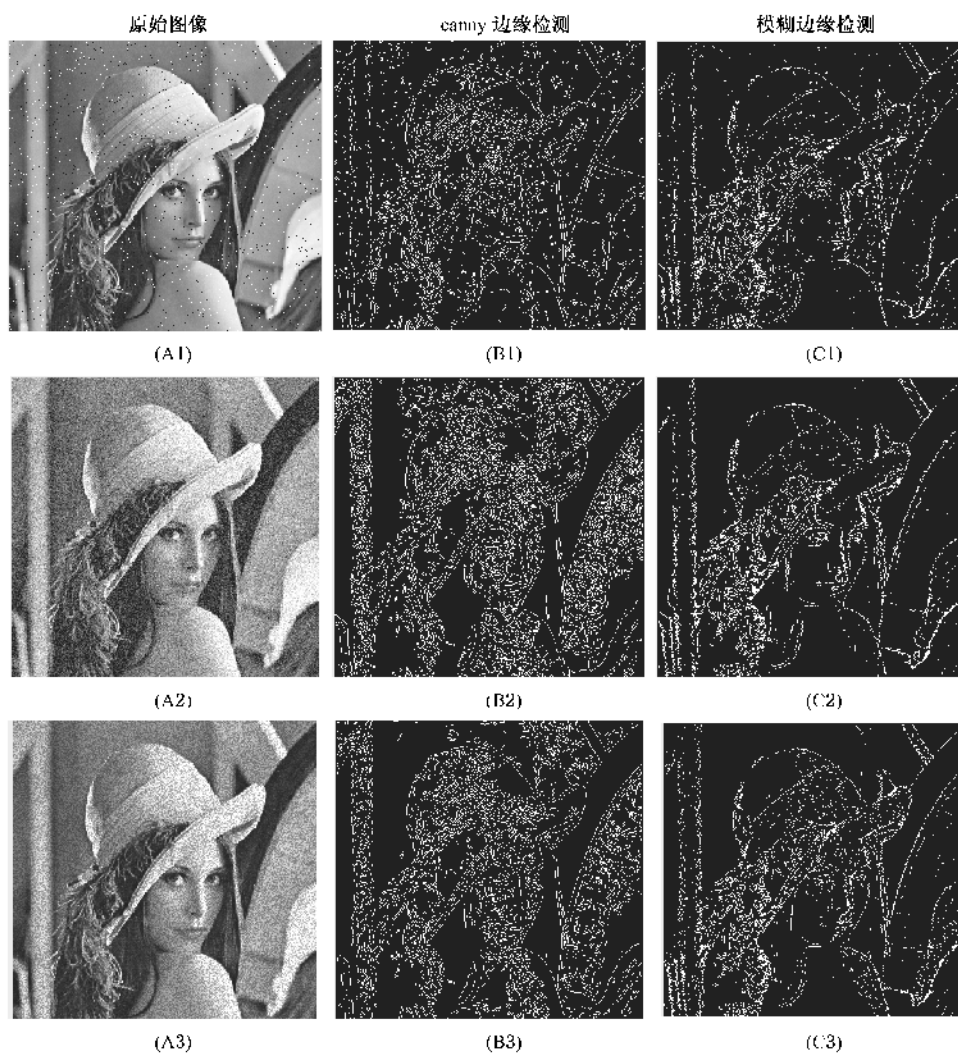


图3 模糊算法与 Canny 算法的比较 (A1)(A2)(A3)分别是含有 0.05 的椒盐噪声、0.021 的高斯噪声和 0.02 的 speckle 噪声的原始图像；(B1)(B2)(B3)是对原始图像进行 Canny 边缘检测的结果 (C1)(C2)(C3)是用本文提出的模糊算法进行边缘检测的结果

- [1] Prewitt J M S 1970 *Object enhancement and extraction in picture Processing and Psychopictorics* (New York : Academic Press) p75—149
- [2] Sobel I 1970 *Camera models and machine perception* (Stanford Artificial Intelligence Lab , Palo Alto , CA)
- [3] Canny J 1986 *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **8** 679
- [4] Wu X Q , Xu Y X , Zhou R 2001 *The University of Science and Technology of China* **31** 482 (in Chinese) [吴秀清、徐云翔、周蓉 2001 中国科学技术大学学报 **31** 482]
- [5] Liang Y M , Zhai H C , Chang S J , Zhang S Y 2003 *Acta Phys . Sin .* **52** 2655 (in Chinese) [梁艳梅、翟宏琛、常胜江、张思远 2003 物理学报 **52** 2655]
- [6] Liang Y M , Zhai H C , Mu G G 2002 *Acta Phys . Sin .* **51** 2671 (in Chinese) [梁艳梅、翟宏琛、母国光 2002 物理学报 **51** 2671]
- [7] Pal S K , King R A 1983 *IEEE Trans Patt Analand Machine Intell* **5** 69
- [8] Ma Z F , Yang S C , Zhao B J , He P K 2005 *Laser and Infrared* **35** 300 (in Chinese) [马志峰、杨水超、赵保军、何佩琨 2005 激光与红外 **35** 300]
- [9] Gonzalez R C , Woods R E 1992 *Digital Image Processing* (Massachusetts : Addison-Wesley Publishing Company) 402
- [10] Faghih F , Smith M 2002 *IEEE Transactions on Image Processing* **11** 1062
- [11] Ma Q , Yao C G , Liang G M 2003 *Techniques of Automation & Applications* **22** 27 (in Chinese) [马琦、姚春光、梁光明 2003 自动化技术与应用 **22** 27]

Fuzzy edge detection technique using multi-information fusion algorithm^{*}

Zong Xiao-Ping Xu Yan Dong Jiang-Tao

(*College of Electronic and Information Engineering , Hebei University , Baoding 071002 , China*)

(Received 17 February 2006 ; revised manuscript received 8 April 2006)

Abstract

An effective fuzzy edge detection algorithm is proposed in this paper. This novel algorithm is different from other fuzzy edge detection algorithms based purely on image enhancement technology. Several kinds of information are used as the characteristics of edge detection , and fuzzy logic is used to fuse the information together. So , the edge detecting process is more effective and gives much better edge information. It is proved that this algorithm is applicable to detect the edge of highly-noisy images .

Keywords : edge detection , fuzzy algorithm , fusion

PACC : 0210 , 4230

^{*} Project supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province of China(Grant No. A2004000089) and the Scientific Research Starting Foundation for Returned Overseas Chinese Scholars , Ministry of Education , China (Grant No. 48371109).