

# 膜计算在图像处理中应用的研究进展及展望

寇光杰<sup>1</sup> 马云艳<sup>2</sup> 岳峻<sup>1</sup> 邹海林<sup>1</sup>

(鲁东大学信息与电气工程学院 烟台 264025)<sup>1</sup> (鲁东大学数学与统计学院 烟台 264025)<sup>2</sup>

**摘要** 膜计算是仿生自然计算中新兴的一个极具潜力的学科分支。首先介绍了膜计算的概念、分类和定义;然后从图像分割、增强、细化等几个不同的应用层面对膜计算系统在图像处理领域的应用情况进行了分类综述,并分析讨论了有关膜计算实现方法的最新进展;最后对膜计算系统在图像处理领域的应用研究进行了总结展望。

**关键词** 膜计算,图像处理,组织型膜系统,脉冲神经型膜系统,图像分割,图像细化

**中图分类号** TP301,TP391 **文献标识码** A

## Research Advance and Prospect of Membrane Computing Applied in Image Processing

KOU Guang-jie<sup>1</sup> MA Yun-yan<sup>2</sup> YUE Jun<sup>1</sup> ZOU Hai-lin<sup>1</sup>

(School of Information and Electrical Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China)<sup>1</sup>

(School of Mathematics and Statistics, Ludong University, Yantai 264025, China)<sup>2</sup>

**Abstract** As a new branch of bio-inspired natural computing, membrane computing has potential capacity. The concept, classification and definition were discussed firstly in the paper. Then the applications of membrane computing in the field of image segmentation, image enhancement and image thinning etc. were classified and reviewed. The newest technologies of realization of membrane computing were analyzed and discussed. Finally, the summarization and expectation of the applications of membrane computing in image processing were given.

**Keywords** Membrane computing, Image processing, Tissue-like P systems, Spiking neural-like P systems, Image segmentation, Image thinning

## 1 引言

计算机科学与生物科学的交叉融合已成为信息科学领域中一个非常重要的研究方法,并且已经提出了许多卓有成效的计算模型。比如:从分子层面提出了 DNA 计算;从生物体组织器官层面提出了免疫计算、神经计算、内分泌计算等;从生物群体层面又提出了群体智能算法。膜计算就是在此背景下基于生物细胞层面所提出的概念,它由 Gheorghe Păun 在 1998 年首次提出,正式论文于 2000 年见刊<sup>[1]</sup>。膜计算是对生命细胞在分层结构中处理化合物的方式进行抽象得出的计算模型,具有分布式、极大并行性、非确定性等特点<sup>[2]</sup>,鉴于 Gheorghe Păun 的巨大贡献,该类计算模型又被称为 P 系统。2003 年,膜计算被美国科学信息所评为计算机科学领域发展最快的前沿领域之一。关于膜计算的研究工作可归为 3 类<sup>[3]</sup>:理论研究、应用研究和软硬件实现的研究。在理论研究方面的工作已经有深入的研究,提出了多种类型的膜系统;在膜系统的实现方面,目前多为软硬件仿真模拟,而采用真正的生物介质来实现膜系统的研究较少;在应用研究方面急需进一步推广,只有在多个领域获得了成功应用,才能进一步促进膜系统的研究发展,因此 Gheorghe Păun 将拓展膜系统的应

用领域作为膜计算领域下一步亟待解决的公开问题之一。

目前国内潘林强<sup>[4-6]</sup>、张葛祥<sup>[3]</sup>、王宁<sup>[7,8]</sup>等学者已经带领着他们的研究团队在膜计算的理论及应用等方面进行了很多开拓性的研究工作,但相对国外在该领域的研究而言,我国在该领域的研究人员还非常少。在膜计算的应用方面,国内研究主要集中在自然语言<sup>[5,6]</sup>、优化控制<sup>[7-9]</sup>等领域,而在图像处理领域应用的研究还较少<sup>[10]</sup>,为进一步拓展膜计算的应用领域,本文在介绍了膜计算的基本知识后,对国际上膜计算在图像处理领域的应用研究现状做了分类总结,并对该领域下一步的研究方向进行了探讨,旨在引起国内更多学者的关注。

## 2 膜计算基本知识

膜计算的本质是从活细胞以及由细胞组成的组织或器官的功能和结构中抽象出模型或计算思想。它是一种具有层次结构的分布式、并行计算模型。从微观的角度看,细胞中的细胞核、泡囊等被抽象成一个细胞中的细胞膜。这些膜将各个计算单元按区域划分,其中的数据结构具有多重性,可以用字符集或字符串来表示。生物细胞膜内的生化反应或细胞膜之间的物质交流被看成是一种计算过程,甚至细胞之间的物质

本文受国家自然科学基金项目(61170161),山东省科技发展计划项目(2012YD01056),山东省自然科学基金项目(ZR2012FM008, ZR2012FQ029, ZR2011FM017),山东省统计科研重点课题(KT13145),鲁东大学博士基金项目(LY201222, LY2013001)资助。

寇光杰(1977—),男,博士,副教授,主要研究方向为仿生自然计算, E-mail: kouguangjie@126.com; 马云艳 女,博士,讲师,主要研究方向为统计学习; 岳峻 女,博士,教授,主要研究方向为智能信息处理; 邹海林 男,博士,教授,主要研究方向为智能信息处理。

交换也可以看成是计算单元之间的信息交流。从某种意义上来说,可以将整个生物体看成一个细胞膜,甚至可以将一个生物系统看成一个膜系统<sup>[8]</sup>。有机生物体内细胞的数量非常多。根据细胞抽象出来的各个计算单元可以独立完成特定的计算,因此这种系统能以最大的并行度完成计算,其计算效率将远远超过现有的电子计算机。膜计算系统的理论模型不但具有图灵机一样的计算能力,甚至还有可能弥补图灵机的局限性。

膜计算系统的关键要素是系统的结构、对象和规则,因此可以根据这3个基本要素对现有的膜计算模型进行分类。膜计算模型主要有细胞型<sup>[2]</sup>、组织型<sup>[11,12]</sup>和神经型<sup>[13,14]</sup>3类,其中从结构上来看,组织膜和神经膜同属于网状结构膜系统<sup>[5]</sup>,而细胞型膜系统则属于树状结构膜系统。

细胞型膜系统是最早提出的模型,它模仿了细胞的结构和功能,由3部分构成:膜的层次结构、表示对象的多重集和进化规则。图1给出了一个包含4个膜的细胞型膜系统<sup>[3]</sup>,最外层的膜1又称为表层膜,它内部还包含了2、3、4三个膜,对于不再包含其它膜的膜(如膜3)又称为基本膜。每个膜所包围的部分称为区域,区域内又含有对象和进化规则。区域内的对象按照规则并行的进行演化,且膜区域间可以相互通信。细胞型膜系统的形式化描述和计算过程可参考文献<sup>[2]</sup>。

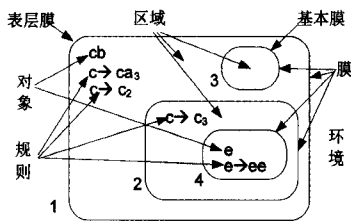


图1 细胞型膜系统

组织型膜系统是细胞型膜系统的一种重要拓展模型,是将多个细胞自由放在同一环境中,细胞和环境之间均可以包含对象,各细胞之间和细胞与环境之间可以采用相应规则进行通信<sup>[11,12]</sup>。一个度为 $q \geq 1$ 的组织型膜系统 $\Pi_1$ 可以看作是由 $q$ 个细胞构成的集合,每个细胞都包含一个基本膜,可以分别用 $1, \dots, q$ 来标记,组织膜外界的环境区域用 $0$ 来标记。 $\Pi_1$ 的形式化定义可用多元组(1)表示:

$$\Pi_1 = (\Gamma, \Sigma, \xi, \omega_1, \dots, \omega_q, R, i_{\Pi}, o_{\Pi}) \quad (1)$$

其中, $\Gamma$ 是字母表,其元素被称作对象; $\Sigma \subset \Gamma$ 为输入字母表; $\xi \subset \Gamma$ 为环境中的对象集合; $\omega_1, \dots, \omega_q$ 是 $\Gamma$ 上的符号串,表示初始配置下细胞 $1, \dots, q$ 内所包含对象的多重集; $R$ 是有限条通信规则集合:

$$(i, u/v, j), i, j \in \{0, 1, \dots, q\} \quad (2)$$

其中, $i \neq j, u, v \in \Gamma^*$ ,该规则的含义是标号为 $i$ 的细胞将其内部的对象多重集 $u$ 与 $j$ 号细胞内的多重对象集 $v$ 进行互换,当然若 $i=0$ 或 $j=0$ ,则意味着组织膜内的一个细胞跟环境区域的多重对象集进行交换; $i_{\Pi}$ 和 $o_{\Pi}$ 分别为输入和输出区域,它们可以处在环境区域内也可以在细胞内部。 $R$ 所表示的规则集合采用最大并行性的原则执行(系统采用一个全局同步时钟控制),即在每一个执行步骤,凡是能被规则使用的对象都必须选择一个规则,按该规则进化。但是,同一膜内的每一个对象每步只能被一条规则使用(若有多条规则同时满足执行条件,则随机选择一条)。

神经型膜系统是受生物神经系统启发而提出的一种膜系统模型,是当前膜计算理论研究的热点<sup>[4,6,13-15]</sup>。神经型膜系统又分为基本神经型膜系统和脉冲神经型膜系统,前者是对组织型 $P$ 系统的简单扩充,而后者是当前膜计算领域研究的重点。一个度为 $m$ 的带权重的脉冲神经膜系统 $\Pi_2$ 形式化定义可用多元组(3)表示:

$$\Pi_2 = (O, \sigma_1, \dots, \sigma_m, syn, i_{\Pi}, o_{\Pi}) \quad (3)$$

其中,1) $O = \{a\}$ 是单字母集合, $a$ 表示脉冲;2) $\sigma_1, \dots, \sigma_m$ 表示系统中的 $m$ 个神经元,每个神经元 $\sigma_i$ 表示为 $\sigma_i = (n_i, R_i)$ , $1 \leq i \leq m$ ,其中:(i) $n_i \geq 0$ 表示在计算开始时神经元 $\sigma_i$ 内包含的脉冲数;(ii) $R_i$ 表示神经元 $\sigma_i$ 中所有规则构成的有限集合,主要包括基本规则 $\{E/a^c \rightarrow a^p, c \geq p \geq 1, E$ 为 $a$ 的正则表达式)和遗忘规则 $\{a^b/a^c \rightarrow \lambda, b \geq c \geq 1\}$ 两类;3) $syn \subseteq \{1, 2, \dots, m\} \times \{1, 2, \dots, m\} \times W$ 表示神经元之间的突触连接, $W$ 表示连接的二维权重矩阵,其元素取值为 $0 \sim 1$ 之间的小数。对于 $1 \leq i \leq m, k \in W$ ,有 $(i, i, k) \notin syn$ ;4) $i_{\Pi}, o_{\Pi}$ 分别表示系统的输入和输出神经单元。

脉冲神经膜系统中所有神经元并行工作,但是每个神经元内部规则的使用是串行的,若在某一时刻神经元 $\sigma_i$ 有多条规则可以使用,则此神经元从中随机选择一条使用。 $\Pi_2$ 定义中的两类规则的含义及运行触发条件为:若某一时刻,神经元 $\sigma_i$ 内包含 $k$ 个脉冲,且 $a^k$ 是正则表达式所表示语言中的一个句子,同时 $k \geq c$ ,则神经元 $\sigma_i$ 即可使用激发规则 $E/a^c \rightarrow a^p$ ,该神经元将消耗掉 $c$ 个脉冲,同时向与其有突触相连的其它神经元发放 $p$ 个脉冲;当神经元 $\sigma_i$ 内恰好有 $b$ 个脉冲时,则遗忘规则 $a^b/a^c \rightarrow \lambda$ 变为可用,运行该规则后神经元 $\sigma_i$ 将消耗掉 $c$ 个脉冲,但不会对外发放脉冲。

### 3 膜计算在图像处理中的应用

膜计算系统具有分布式、极大并行性的特点,而图像处理过程中也具有较强的局部并行性,因此将膜计算系统引入到图像处理领域不仅有效扩大了膜计算的应用领域,同时也将有力提升图像处理的时间效率。目前膜计算在图像处理中的应用还基本处于探索阶段,多数集中在图像分割、平滑、细化等较基本的图像处理操作上。

#### 3.1 膜计算在图像分割方面的应用

一般而言,可以将图像分割的算法划分为基于边缘检测的分割方法、基于区域的分割方法和阈值化分割方法3大类。Christina H A和Diaz-Pernil D等人利用组织型膜系统<sup>[16-21]</sup>设计了基于边缘检测的图像分割方法,分析了采用此模型进行分割处理时的时间和空间开销,他们还采用细胞型膜系统<sup>[22]</sup>进行了图像分割处理的尝试。Yang Y等人<sup>[23]</sup>采用组织型膜系统设计实现了基于区域增长的图像分割方法,并给出了与串行算法运行时间的实验对比结果。文献<sup>[24-26]</sup>利用膜系统实现了对图像的阈值化处理。以下为一个采用组织膜系统实现图像分割的例子<sup>[17]</sup>。

对于一个大小为 $n \times m$ 像素的灰度图像,若其像素灰度值的集合为 $C$ ,则可用度为2的组织型膜系统 $\Pi_3$ 来实现对该图像的边缘检测处理。

$$\Pi_3 = (\Gamma, \Sigma, \xi, \omega_1, \omega_2, R, i_{\Pi}, o_{\Pi}) \quad (4)$$

其中, $\Gamma = \Sigma \cup \xi$ , $\Sigma = \{a_{ij} : a \in C, 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m\}$ , $\xi = \{\bar{a}_{ij} : 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m\} \cup \{A_{ij} : 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m, A \in C\}$ , $\omega_1 =$

$\omega_2 = \emptyset, i_n = 1, o_n = 2$ , 对象  $a_{ij}$  是对位于图像  $(i, j)$  处灰度值为  $a$  的像素的编码, 若此像素处在图像边缘上, 则用  $\bar{a}_{ij}$  进行标记, 并将其灰度值替换为  $A_{ij}$ , 其中  $a \in C, A \in C, 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m$ .

$\Pi_3$  的通信规则  $R$  定义为如下 3 组表达式:

1)  $(1, a_{ij} b_{kl} / \bar{a}_{ij} A_{ij} b_{kl}, 0)$ , 其中,  $a, b \in C, a < b, 1 \leq i, k \leq n, 1 \leq j, l \leq m$ .

当相邻的两像素具有不同灰度值时, 灰度值小的像素被标记为边界。

2) 以下 4 条子规则分别表示: 当一个像素与两个已经被标记为边界的、具有相同灰度值的像素相邻时, 何种条件下可以标记为新的边界像素。

(i)  $(1, \bar{a}_{ij} a_{ij+1} \bar{a}_{i+1+j} b_{i+j} / \bar{a}_{ij} \bar{a}_{ij+1} A_{ij+1} \bar{a}_{i+1+j} b_{i+j}, 0)$ , 其中,  $a, b \in C, a < b, 1 \leq i \leq n-1, 1 \leq j \leq m-1$ .

(ii)  $(1, \bar{a}_{ij} a_{i-1+j} \bar{a}_{i-1+j} b_{ij+1} / \bar{a}_{ij} \bar{a}_{i-1+j} A_{i-1+j} \bar{a}_{i-1+j} b_{ij+1}, 0)$ , 其中,  $a, b \in C, a < b, 2 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m-1$ .

(iii)  $(1, \bar{a}_{ij} a_{ij+1} \bar{a}_{i-1+j} b_{i-1+j} / \bar{a}_{ij} \bar{a}_{ij+1} A_{ij+1} \bar{a}_{i-1+j} b_{i-1+j}, 0)$ , 其中,  $a, b \in C, a < b, 2 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m-1$ .

(iv)  $(1, \bar{a}_{ij} a_{i+1+j} \bar{a}_{i+1+j} b_{ij+1} / \bar{a}_{ij} \bar{a}_{i+1+j} A_{i+1+j} \bar{a}_{i+1+j} b_{ij+1}, 0)$ , 其中,  $a, b \in C, a < b, 1 \leq i \leq n-1, 1 \leq j \leq m-1$ .

3)  $(1, A_{ij} / \lambda, 2)$ , 其中  $1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m$ , 将标记完的边界像素传到输出区域  $o_n$  (即细胞 2) 中, 其中  $\lambda$  为空对象。

$\Pi_3$  进行处理的过程可以分为如下 3 个阶段: 第一阶段, 在最大并行性运行方式下, 利用第 1) 组规则在 4 步内即可将满足该类条件的边界像素标记完 (此处相邻像素按照 4 邻域考虑, 对 8 邻域情况参见图 3 进行简单扩充即可); 第二阶段, 利用第 2) 组规则中的 4 条子规则, 可以对与两个已经标记为边界的像素相邻的像素是否为边界进行判断和标记, 此类规则也需要 4 步才能运行完。当然如果配置合理, 它们也可以从第二步开始就与第一类规则同时并行运行。第三阶段, 利用规则 3) 将前两个阶段标记出的边界像素传递到输出区域中, 这个过程只需一步即可。

由此可见, 采用组织型膜系统  $\Pi_3$  进行图像的边缘检测, 最多只需固定的 9 步即可全部完成。图 2 是利用  $\Pi_3$  进行处理的一个典型实验结果<sup>[17]</sup>, 所处理的图像为  $600 \times 600$  像素的人体肺部 CT 图像。

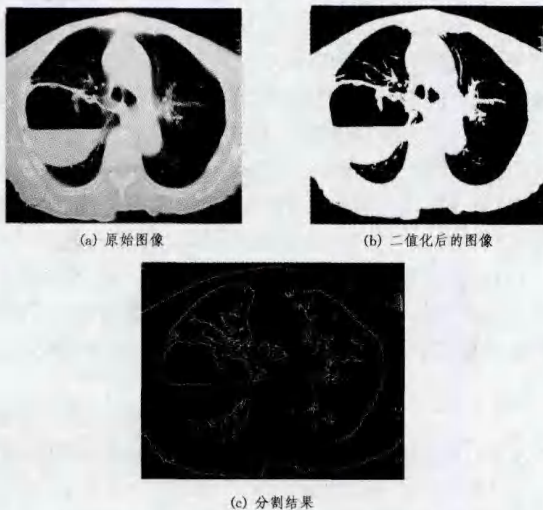


图 2 基于组织型膜系统的图像分割实验结果

### 3.2 膜计算在图像增强处理中的应用

图像增强是指通过相应处理使图像更适合于人眼观看或更适合于机器分析。增强技术可以分为频域增强和空间域增强, 其中空间域增强主要包括图像的平滑降噪 (均值滤波、中值滤波等)、边缘锐化 (梯度法、统计差值法等) 以及对对比度调整等操作, 这些操作多数都可以方便地用膜计算模型来实现, 从而使处理过程得到最大并行化。例如, 组织型膜系统  $\Pi_4$  即可实现对大小为  $(n \times n)$  图像的均值滤波处理。

$$\Pi_4 = (\Gamma, \Sigma, \xi, \omega_1, R, i_n, o_n) \quad (5)$$

其中,  $\Gamma = \Sigma \cup \xi, \Sigma = \{a_{ij} : a \in C, 1 \leq i, j \leq n\}, \xi = \{a_{ij} : a \in C, 1 \leq i, j \leq n\}, \omega_1 = \emptyset, i_n = o_n = 1$ 。通信规则  $R$  定义为<sup>[21]</sup>:

$$(1, a_{ij} b_{ij-1} c_{i-1+j-1} d_{i-1+j} e_{i-1+j+1} f_{ij+1} g_{i+1+j+1} h_{i+1+j} u_{i+1+j-1} / av(a) a_{ij} b_{ij-1} c_{i-1+j-1} d_{i-1+j} e_{i-1+j+1} f_{ij+1} g_{i+1+j+1} h_{i+1+j} u_{i+1+j-1}, 0) \quad (6)$$

其中,  $a, b, c, d, e, f, g, h, u \in C$  分别为图像中  $(i, j)$  处及其周围 8 邻域像素的灰度值 (如图 3 所示),  $av(a) = (b+c+d+e+f+g+h+u)/8$ , 若  $|a-av(a)| > r$ , 则规则 (5) 触发执行,  $r$  为均值滤波器的阈值,  $1 < i, j < n$  (为简化叙述, 此处没有考虑图像四周的边缘像素)。

$c_{i-1+j-1}$	$d_{i-1+j}$	$e_{i-1+j+1}$
$b_{ij-1}$	$a_{ij}$	$f_{ij+1}$
$u_{i+1+j-1}$	$h_{i+1+j}$	$g_{i+1+j+1}$

图 3 像素 8 邻域示意图

组织型膜系统  $\Pi_4$  按最大并行性的工作模式工作, 在一个执行步骤内, 图像中所有满足限制条件  $|a-av(a)| > r$  的像素均可以同时执行规则 (6), 进而一步即可完成对整幅图像的一次均值化处理。传统均值滤波器要完成同样任务, 则需要将上述 8 邻域均值滤波器滑过图像中的每一个像素, 所需时间复杂度为  $O(n^2)$ , 由此可见组织型膜系统在处理效率上的优越性。

组织型膜系统  $\Pi_4$  在功能上也很容易扩展, 只需对其通信规则  $R$  进行简单修改, 即可完成不同的图像处理任务。比如采用式 (7) 所示的这组规则, 即可完成对图像中无用细节信息的平滑处理<sup>[26, 27]</sup>。

$$(1, a_{ij} b_{kl} / a_{ij} a_{kl}, 0), 1 \leq i, j \leq n, a \in C, b \in C, a < b \text{ 且}$$

$$dis(a, b) \leq r \quad (7)$$

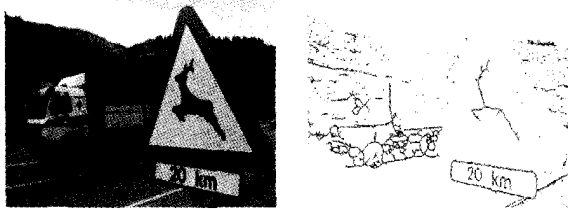
其中,  $b_{kl}$  为像素  $(i, j)$  周围 8 个相邻像素的统一表示 (见图 3), 所以式 (7) 表示了 8 条子规则。在一步执行过程中, 图像中所有满足  $dis(a, b) \leq r$  的像素均同时根据自身位置选择执行规则 (7) 中的某条子规则, 对灰度值大的像素值进行修改, 从而可完成对整幅图像的一次平滑处理, 通过对  $r$  值的大小的调整, 可以实现对图像平滑程度强弱的调整,  $r$  取值越大平滑效果越强。在相同阈值  $r$  的情况下, 上述处理过程的迭代次数越多, 平滑也越强。在时间复杂度的分析上, 与均值滤波器一样, 采用此模型进行平滑处理也将时间复杂度降低了一个数量级。

### 3.3 膜系统在图像细化处理中的应用

图像细化 (或骨骼化) 是模式识别任务中一个常见的预处理操作, 在文本识别、指纹识别等场合尤为重要。该处理指经过一层剥离, 去掉图像中一些冗余像素点, 但仍要保持图像原来的形状和拓扑结构, 直到得到图像的骨架 (中轴)。对于黑白二值图像而言, 就是利用最少的黑色像素, 将原图像中的

拓扑结构表示出来。

Reina-Molina R 等人利用组织膜系统实现了对 2 维和 3 维图像的细化处理<sup>[29]</sup>,通过分析该模型的时间和空间开销,证明了该模型在处理效率上的优越性。Díaz-Pernil D 等人利用带权重、度为 1 的脉冲神经型膜系统<sup>[30,31]</sup>实现了图像骨骼化算法——Guo and Hall 算法<sup>[32]</sup>,并对比了该模型相对分子自动机算法在执行效率上的优越性,图 4 为此模型处理的一典型结果。



(a) 原图

(b) 骨骼化处理后结果

图 4 骨骼化前后对比

### 3.4 膜系统在图像同调群求解中的应用

图像的同调群 (homology groups) 是一个重要的几何拓扑结构不变量,在一定程度上反映了图像中目标的拓扑属性,被广泛应用到图像分析及结构模式识别中。Díaz-Pernil D 等人利用具有催化剂的组织膜系统<sup>[33,34]</sup>和具有激活子的组织膜系统<sup>[35]</sup>实现了对二值图像的同调群求解。对于  $n \times n$  图像而言,求解  $H_0$  问题需要  $n+2$  步,求解  $H_1$  问题需要  $n+7$  步。Christina H A 等人则分别利用基本组织膜系统<sup>[36,37]</sup>和细胞型膜系统<sup>[38]</sup>实现了对同调群问题的求解。

### 3.5 膜系统在其它图像处理操作中的应用

除了对上述常见图像处理领域的研究,少数研究人员还结合具体的应用场合,对不同类型的膜系统的有效性进行了研究尝试。

Ardelean I 等人采用含有激活子的组织型膜系统实现了对微生物学研究领域中细胞个数的计数<sup>[39]</sup>。该模型将整个计数过程分为:对含有细胞的图像进行二值化、分割、降噪、计数等几个阶段。但此模型过于简单,距离实用还有较大差距。

Gimel' farb G 等人给出了利用基本细胞型膜系统实现立体匹配领域中的 SDPS (symmetric dynamic programming stereo) 算法<sup>[40]</sup>的具体方法<sup>[41]</sup>,并对此方法的时间复杂度进行了分析。文献<sup>[42]</sup>对于膜计算在图像检索及医学图像处理中的应用前景进行了讨论。

所有这些研究都为膜系统的应用提供了新的思路,但均存在一个共同的问题,即:要想真正发挥出膜系统的优越性,高效的膜系统仿真平台是必不可少的。

## 4 膜计算系统的实现方法

膜计算系统的实现方式可以分为 3 种:生物实现、软件仿真及软硬件混合模拟。到目前为止,仍没有基于生物介质(无论是生物体内或试管内)实现的膜计算系统,对各种类型膜系统研究的主要实现方法是在常规计算机上软件仿真或在新型体系结构计算机上软硬件混合模拟。

在软件仿真方面,Gutiérrez-Naranjo 等人<sup>[43,44]</sup>介绍了一系列细胞型膜系统的仿真软件及实现方法,并在文献<sup>[45]</sup>中设计实现了脉冲神经型膜系统;Borrego-Ropero 等人设计实

现了组织型膜系统<sup>[45]</sup>;Díaz-Pernil D 等人在积极实现膜系统仿真模拟的同时,成功地将各种类型膜系统引入到图像的分割、平滑、细化等处理领域<sup>[47,48,17-22]</sup>。

基于新型硬件平台的硬件软件混合模拟方法<sup>[49]</sup>,是近期发展起来的一类极具潜力的高效膜系统模拟方法。这类模拟方法采用 FPGA (Field Programmable Gate Arrays)<sup>[50]</sup> 或 CUDA (Compute Unified Device Architecture)<sup>[51]</sup> 等新型硬件系统作为运算平台,其中 CUDA 是由显卡厂商 NVIDIA 推出的一种通用并行计算架构的运算平台,它在计算性能、开发环境及通用性等各方面更具优势<sup>[27,52]</sup>。

**结束语** 将膜计算引入到图像处理领域的这一研究思路的最大的贡献包括两个方面:从图像处理研究领域来看,这一做法为图像处理的研究引入了一类新型的仿生并行计算模型,开辟了一条崭新的图像处理算法研究途径;从膜计算研究领域来看,这一做法为膜计算的应用研究提供了一个广阔的实验领域,极大促进了膜计算的应用研究。

虽然膜计算模型具有分布式、最大并行性等特点,将其应用到图像处理中具有天然的优越性,可以极大提高处理效率,但是,这种执行时间效率的提高是以空间开销的增加所换来的。另外,一些新型膜系统模型(比如脉冲神经型膜系统)在理论研究方面还有许多问题需要解决,并且目前尚未有真正的生物膜计算机问世,有关膜计算的研究均靠软件或硬件的模拟进行,在一定程度上影响了膜计算在图像处理中优越性的充分发挥。综上分析,在下一步研究中,可以从以下几个角度进行尝试:

(1) 进一步研究各种类型膜计算模型在图像处理应用中的有效性、可行性,并通过与其它传统算法模型相结合,提出更加有效的处理模型。比如,将细胞型膜计算模型与聚类算法相结合,将组织型膜系统与群体智能算法<sup>[53]</sup>相结合等。

(2) 研究基于离散规则集的神经型膜系统与基于连续微分方程集的神经网络之间的关系,将神经网络研究领域已有的成果引入到神经膜系统中。比如,分析脉冲神经型膜系统与脉冲耦合神经网络 (Pulse Coupled Neural Networks)<sup>[54]</sup> 之间的关系,后者是基于猫狗等哺乳动物视觉神经系统而提出的适合处理视觉信息的单层神经网络,目前 PCNN 已经被成功应用到图像处理的各个领域,这样通过建立脉冲神经膜系统与 PCNN 模型之间的关系,可以进一步扩大脉冲神经型膜系统在图像处理中的应用,并且利用膜系统规则设置的方便性,有望解决 PCNN 中模型参数设置困难的问题。

(3) 深入研究脉冲神经型膜系统的特点,结合哺乳动物视觉皮层神经系统发放脉冲的特性以及视觉信息的稀疏性表示特性,提出适合视觉信息处理的视觉脉冲神经型膜系统,探索该类模型在视觉信息智能化表征与计算方面的有效性。

(4) 在膜计算模型的实现方面,基于 CUDA 等新型硬件平台开发实现针对各种典型膜计算模型的通用仿真系统,为各种膜计算应用的研究提供一个高效的实验软硬件平台。

## 参考文献

- [1] Păun G. Computing with Membranes[J]. Journal of Computer and System Sciences, 2006, 1(1): 108-143
- [2] Păun G. Membrane computing. An introduction [M]. Berlin: Springer, 2002

- [3] 张葛祥,潘林强. 自然计算的新分支-膜计算[J]. 计算机学报, 2010,33(2):208-214
- [4] 潘林强,张兴义,曾湘祥,等. 脉冲神经膜计算系统的研究进展及展望[J]. 计算机学报,2008,31(12):2090-2096
- [5] 江赞. 网状结构膜系统的计算能力研究[D]. 武汉:华中科技大学,2011
- [6] 曾湘祥. 脉冲神经膜系统的计算性能研究[D]. 武汉:华中科技大学,2011
- [7] 赵进慧. 膜计算仿生优化算法及其应用研究[D]. 杭州:浙江大学,2010
- [8] 黄亮. 膜计算优化方法研究[D]. 杭州:浙江大学,2007
- [9] Cheng J,Zhang G,Zeng X. A Novel Membrane Algorithm Based on Differential Evolution for Numerical Optimization[J]. IJUC, 2011,7(3):159-183
- [10] 王浩. 基于膜计算的图像分割方法研究[D]. 成都:西华大学,2012
- [11] Martin-Vide C, Păun G, Pazos J, et al. Tissue P systems [J]. Theoretical Computer Science, 2003,296(2):295-326
- [12] Freund R, Păun G, Perez-Jimenez M J. Tissue P systems with channel states[J]. Theoretical Computer Science,2005,330(1):101-116
- [13] Păun A,Păun G. Small universal spiking neural P systems[J]. Biosystems,2007,90(1):48-60
- [14] Ionescu M,Păun G,Yokomori T. Spiking neural P systems[J]. Fundamenta Informaticae,2006,71(2-3):279-308
- [15] Păun G. Tracing some open problems in membrane computing [J]. Romanian Journal of Information Science and Technology, 2007,10(4):303-314
- [16] Christinal H A, Diaz-Pernil D, Jurado P R. Segmentation in 2D and 3D image using tissue-like P system[M]//Progress in Pattern Recognition Image Analysis Computer Vision and Applications. Springer Berlin Heidelberg, 2009:169-176
- [17] Díaz-Pernil D, Molina-Abril H, Real P, et al. A bio-inspired software for segmenting digital images [C] // IEEE Fifth International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications (BIC-TA)2010. IEEE,2010:1377-1381
- [18] Díaz-Pernil D, Gutiérrez-Naranjo M, Molina-Abril H, et al. Designing a new software tool for Digital Imagery based on P systems[J]. Natural Computing,2012,11(3):381-386
- [19] Christinal H A, Díaz-Pernil D, Real P. Region-based segmentation of 2D and 3D images with tissue-like P systems[J]. Pattern Recognition Letters,2011,32(16):2206-2212
- [20] Díaz-Pernil D, Berciano A, Peña-Cantillana F, et al. Segmenting images with gradient-based edge detection using Membrane Computing[J]. Pattern Recognition Letters, 2013, 34 (8) : 846-855
- [21] Carnero J, Diaz-Pernil D, Gutiérrez-Naranjo M A. Designing tissue-like P systems for image segmentation on parallel architectures[J]. Proceedings of the Ninth Brainstorming Week on Membrane Computing, 2011
- [22] Carnero J, Diaz-Pernil D, Molina-Abril H, et al. Image segmentation inspired by cellular models using hardware programming [C] // 3rd International Workshop on Computational Topology in Image Context. 2010:143-150
- [23] Yang Y, Peng H, Jiang Y, et al. A Region-based Image Segmentation Method Under P Systems[J]. Journal of Information & Computational Science, 2013, 10(10):2943-2950
- [24] Christinal H A, Diaz-Pernil D, Gutiérrez-Naranjo M A, et al. Thresholding of 2D images with cell-like P systems[J]. Romanian Journal of Information Science and Technology (ROM-JIST), 2010, 13(2):131-140
- [25] Peng H, Shao J, Li B, et al. Image Thresholding with Cell-like P Systems[J]. Proceedings of the Tenth Brainstorming Week on Membrane Computing, 2012, 2:03
- [26] Peña-Cantillana F, Díaz-Pernil D, Berciano A, et al. A parallel implementation of the thresholding problem by using tissue-like P systems[C] // Computer Analysis of Images and Patterns. Springer Berlin Heidelberg, 2011:277-284
- [27] Peña-Cantillana F, Díaz-Pernil D, Christinal H A, et al. Implementation on CUDA of the smoothing problem with tissue-like P systems[J]. International Journal of Natural Computing Research (IJNCR), 2011, 2(3):25-34
- [28] Peña-Cantillana F, Díaz-Pernil D, Christinal H A, et al. Smoothing Problem in 2D Images with Tissue-like P Systems and Parallel Implementation[C] // Proceedings of the Ninth Brainstorming Week on Membrane Computing. 2011:317
- [29] Reina-Molina R, Díaz-Pernil D, Gutiérrez-Naranjo M A. Cell Complexes and Membrane Computing for Thinning 2D and 3D Images[J]. Proceedings of the Tenth Brainstorming Week on Membrane Computing, 2012, 2:3
- [30] Díaz-Pernil D, Peña-Cantillana F, Gutiérrez-Naranjo M A. Skeletonizing Images by Using Spiking Neural P Systems[J]. Tenth Brainstorming Week on Membrane Computing, 2012:91
- [31] Díaz-Pernil D, Peña-Cantillana F, Gutiérrez-Naranjo M A. A parallel algorithm for skeletonizing images by using spiking neural P systems[J]. Neurocomputing, 2013(115):81-91
- [32] Guo Z, Hall R W. Fast fully parallel thinning algorithms[J]. CVGIP: Image Understanding, 1992, 55(3):317-328
- [33] Díaz-Pernil D, Gutiérrez-Naranjo M A, Real P, et al. Computing homology groups in binary 2D imagery by tissue-like P systems [J]. Romanian J. Inf. Sci. Technol. , 2010, 13(2):141-152
- [34] Díaz-Pernil D, Gutiérrez-Naranjo M A, Real P, et al. A Cellular Way to Obtain Homology Groups in Binary 2D Images[J]. Universidad de Sevilla, 2010:89
- [35] Díaz-Pernil D, Christinal H A, Gutiérrez-Naranjo M A, et al. Using Membrane Computing for Effective Homology[J]. Applicable Algebra in Engineering Communication and Computing, 2012, 23(5-6):233-249
- [36] Christinal H A, Diaz-Pernil D, Real P. Obtaining homology groups in binary 2D images using P systems[C] // Fourth International Conference on Bio-Inspired Computing 2009 (BIC-TA'09). IEEE, 2009:1-7
- [37] Christinal H A, Díaz-Pernil D, Jurado P R. Using membrane computing for obtaining homology groups of binary 2D digital images[M] // Combinatorial Image Analysis. Springer Berlin Heidelberg, 2009:383-396
- [38] Christinal H A, Díaz-Pernil D, Real P. P systems and computational algebraic topology[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2010, 52(11):1982-1996

分,而且要有有效地实现变化补偿、特征描述,达到准确的分类效果,这也是人脸识别的难点。

**结束语** 本文主要利用 LBPH 模型和 Haar 变换进行人脸识别与相似度检测,利用识别结果进行图片中主人公信息的匹配与图片分类,用户可以方便快捷地将上百上千张图片按照主人公进行合理分配,提高工作效率,其中人脸识别和单人匹配准确率较高,多人匹配准确率有待提高,多人匹配和阈值参数的调配也是未来工作的主要研究方向。

## 参 考 文 献

[1] 梁路宏,艾海舟. 人脸检测研究综述[J]. 计算机学报,2002,25(5):449

[2] 严云洋,郭志波,杨静宇. 基于特征空间划分的 AdaBoost 人脸检测算法[J]. 小型微型计算机系统,2007,28(11):2106

[3] 陈胜勇,刘胜. 基于 OpenCV 的计算机视觉技术实现[M]. 北京:科学出版社,2008

[4] 唐徒文,曾义. 人脸检测级联分类器快速训练算法[J]. 计算机仿真,2007,24(12):324

[5] 唐渝. 人脸实时监测技术研究及实现[D]. 重庆:重庆大学,2012

[6] Heisele B, Serre T, Prnticeb S. Hierarchical Classification and Feature Reduction for Fast Face Detection with Support Vector Machines [J]. Pattern Recognition,2003,01(09):2007

[7] Choi J Y, Ro Y M, Plataniotis K N. Boosting color feature selection for color face recognition [J]. IEEE Trans Image Processing,2011,20(05):1425

[8] Yang J, Lu W, Waibel IBEL A. Skin-color modeling and adaptation [J]. Lecture Notes in Computer Science,1997,10(10):687

[9] 李伟红,陈伟民,龚卫国. 一种人脸特征选择新方法的研究[J]. 电子测量与仪器学报,2006,20(02):16

[10] 祝海龙,屈梁生,张海军. 基于小波变换和支持向量机的人脸检测系统[J]. 西安交通大学学报,2002,36(9):947

[11] Huang Lin-lin, Shimizu A, Kobatake H. Classification Based Face Detection Using Gabor Filter Features [J]. Pattern Recognition Letters,2005,10(10):1641

[12] Tsao W K, Lee A J T, Lin Y H. A Data Mining Approach to Face Detection [J]. Pattern Recognition,2010,43(3):1039

[13] Viola P, Jones M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features [J]. Computer Vision and Pattern Recognition,2001,1(10):512

[14] 武妍,项恩宁. 动态权值预划分实质 Adaboost 人脸检测算法[J]. 计算机工程,2007,33(3):208-209

[15] Li S Z, Zhang Zhen-qiu. Floatboost learning and statistical face detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2004,26(9):1112-1113

(上接第 143 页)

[39] Ardelean I, Diaz-Pernil D, Gutiérrez-Naranjo M A, et al. Counting Cells with Tissue-like P Systems[C]// Proceedings of the Tenth Brainstorming Week on Membrane Computing, 2012

[40] Gimel'farb G L. Probabilistic regularisation and symmetry in binocular dynamic programming stereo[J]. Pattern Recognition Letters,2002,23(4):431-442

[41] Gimel'farb G, Nicolescu R, Ragavan S. P systems in stereo matching[C]// Computer Analysis of Images and Patterns. Springer Berlin Heidelberg,2011:285-292

[42] Burtseva L. Unconventional computation answer on challenges of medical imaging[C]//2nd International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering. Chisinau Republic of Moldova,2013:1-4

[43] Gutiérrez-Naranjo M A, Pérez-Jiménez M J, Riscos- Núñez A. Available membrane computing software[M]. Applications of membrane computing. Springer Berlin Heidelberg, 2006: 411-436

[44] García-Quismondo M, Gutiérrez-Escudero R, Martínez-del-Amor M A, et al. P-Lingua 2.0: A software framework for cell-like P systems[J]. International Journal of Computers Communications & Control,2009,4(3):234-243

[45] Gutiérrez-Naranjo M A, Pérez-Jiménez M J, Ramírez-Martínez D. A software tool for verification of spiking neural P systems [J]. Natural Computing,2008,7(4):485-497

[46] Borrego-Ropero R, Dlaz-Pernil D, Pérez-Jiménez M J. Tissue simulator; A graphical tool for tissue P systems[C]// Procee-

dings of the International Workshop Automata for Cellular and Molecular Computing. 2007:23-34

[47] Diaz-Pernil D, Pérez-Hurtado I, Pérez-Jiménez M J, et al. A P-lingua programming environment for membrane computing [M]. Membrane Computing. Springer Berlin Heidelberg, 2009: 187-203

[48] García-Quismondo M, Gutiérrez-Escudero R, Pérez-Hurtado I, et al. An overview of P-lingua 2.0 [M]. Membrane Computing. Springer Berlin Heidelberg,2010:264-288

[49] Gutiérrez A, Fernández L, Arroyo F, et al. Hardware and software architecture for implementing membrane systems; a case of study to transition P systems[M]// DNA Computing. Springer Berlin Heidelberg,2008:211-220

[50] Nguyen V, Kearney D, Gioiosa G. An extensible maintainable and elegant approach to hardware source code generation in Reconfig-P[J]. The Journal of Logic and Algebraic Programming,2010,79(6):383-396

[51] Nickolls J, Buck I, Garland M, et al. Scalable parallel programming with CUDA[J]. Queue,2008,6(2):40-53

[52] Cecilia J M, García J M, Guerrero G D, et al. Simulation of P systems with active membranes on CUDA [J]. Briefings in Bioinformatics,2010,11(3):313-322

[53] Garnier S, Gautrais J, Theraulaz G. The biological principles of swarm intelligence[J]. Swarm Intelligence,2007,1(1):3-31

[54] Wang Z, Ma Y, Cheng F, et al. Review of pulse-coupled neural networks[J]. Image and Vision Computing,2010,28(1):5-13