

# 一种用于图像曲线抽取的人工杆菌模型<sup>\*</sup>)

刘丹 赵宇 陈雁秋

(复旦大学信息学院计算机科学与工程系 上海200433)

**摘要** 用于曲线抽取的人工杆菌模型受启发于自然界中普遍存在的真实的杆菌。首先,杆菌直短线状的形状很有利于描述线条;其次,真实的杆菌在繁殖和移动的过程中就会排列成有趣的曲线。人工杆菌模型是基于人工生命理论和真实杆菌群落的、以数字图像的曲线抽取为目标构建的。人工生命模型很重要的思想是:生命个体的行为规则很简单,但是群体行为涌现出复杂的自适应的智能特点。本文提出的人工杆菌模型反映了生命世界的并行、动态、鲁棒等特点,具备了从图像中提取曲线的功能。

**关键词** 人工杆菌,人工生命,曲线抽取,图像处理

## Artificial Bacilli Model for Image Curve Extraction

LIU Dan ZHAO Yu CHEN Yan-Qiu

(Dept. of Computer Science and Engineering, School of Information Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433)

**Abstract** Artificial Bacilli Model is enlightened by real bacillus widely living in nature. The shape of real bacillus likes small rod which is advantageous to describe curve. Interesting line shape is arrayed by real bacilli during their multiplying and moving. Aiming at curve extraction of digital image, Artificial Bacilli Model is built based on real bacillus and Artificial Life theory, in which there is an important thought that individual living rule is simple, local-oriented and disorder, but the phenomenon of colony multiplying is complex, global-oriented and ordered. The Artificial Bacilli Model proposed in this paper reflects the biological world's characteristics such as parallelism, adaptiveness, robustness and so on. Further more, this model possesses the function of extracting curves from digital image successfully.

**Keywords** Artificial bacilli, Artificial life, Curve extraction, Image processing

## 1 问题背景

### 1.1 曲线抽取问题及常用方法

曲线抽取是指对数字图像中的边缘或者边界进行检测和描述,它是计算机视觉中最基本也是最关键的问题之一。曲线抽取对图像处理的其他方面例如图像分割、纹理分析、物体模式识别等有重要的意义。

传统常用的曲线抽取方法是面向局部信息的,包含两个步骤。首先是运用基于图像微分的极值和过零点的边缘检测算子<sup>[1~3]</sup>来标注曲线上的点。然后再运用边缘连接的算法对这些点进行处理,连接成曲线。这些方法的主要优点是简单易用,效果直观。但是它只关注了图像中的细节信息,受噪音影响很大,不能从全局把握。

面向全局信息的边界检测方法也有很多。例如,霍夫变换(Hough transform)<sup>[4]</sup>就是一种基于物体边界形状建立严格几何变换的检测策略。它对于噪音有很好的健壮性,但是它的性能强烈地依赖于形状的不变性而且很难适应普遍的变化。“蛇”(snake)<sup>[5]</sup>模型是找到一个由轮廓弹性定义的内力以及物体边界刚性限制定义的外力构成的能量函数,使得能量函数达到最小的检测策略。但是它处理凹陷曲线和开放曲线时力不从心,它的收敛强烈依赖于初始值的设置,并且容易陷入局部极小。

### 1.2 人工生命及其应用研究

人工生命的研究萌芽于20世纪中叶,随着计算机性能的提高在最近20年中迅速兴起。人工生命主要研究那些展示自然生命现象及其行为特征的人造系统。一个非常令人着迷的

思想吸引着大批研究人员的关注,也是人工生命的重要基础观点之一,那就是“个体的行为简单、局部并且带有随机性,但是整体的行为连贯、协调并且不盲目”。启发了研究复杂性系统的不同于传统分析思想的可预见前景的新思路。

这种全新的思路正在被越来越多地接受和逐渐应用于包括图像处理领域的多种方面的研究。Thearling<sup>[6]</sup>通过构建一种依据GA(遗传算法)演化的人工生命群体,实现了二值图像的还原。Liu和Tang<sup>[7,8]</sup>提出多个人工生命模型,实现了图像边界特征提取和印刷体汉字的识别与分割。He和Chen<sup>[9]</sup>提出的一个人工生命模型,较好地解决了数字图像的除噪和分割问题。另外,Reynolds<sup>[10]</sup>的boids模型被成功地应用到影视动画、计算机图形学、生态学、信息地理学、虚拟现实、科学仿真、模式识别等多个学科和研究领域。

### 1.3 我们的研究:人工生命用于曲线抽取

我们的研究首次将人工生命技术运用到数字图像的曲线抽取问题中。我们构造了杆状的生命个体——杆菌模型。杆菌短直的形状对于检测和描述曲线具有得天独厚的优越性。图像作为生命个体生存的环境。图像上由于灰度不同分布着一个特定的能量场,每个生命个体通过与环境进行能量交换和代谢而生存,同时与其它生命个体产生信息交流。充分利用了模型的并行性、面向不同程度细节的能力以及全局的统筹性。整个生命群落经过一段时间的繁衍能够逐步体现出它们生存环境的特征,进而涌现出曲线的分布。

## 2 人工杆菌模型

### 2.1 人工生命模型框架

<sup>\*</sup>)本项目由国家自然科学基金(No. 60275010),上海市科学技术委员会重点基础研究计划(No. 04JC14014)资助。刘丹 硕士生,研究方向:图像处理、人工生命;赵宇 硕士生,主要研究方向:图像处理、人工生命;陈雁秋 教授,博导,主要研究方向:人工生命、图像处理。

人工生命模型有两个要素。一个是实体(包括生命个体集合、生存环境),它是生命系统的物质基础;另一个是实体之间的交互(生命个体之间的交互、生命个体与环境的交互),它体现了能量和信息的流动,如图1。在不考虑食物链的情况下,生物体和环境之间的能量代谢是生命的基本特征。生命的另一个基本特征是应激性,正是由此,生命体可以从环境中获取信息,继而产生相应的行为;而这些行为有意无意地改变着环境,也就改变了环境所传达的信息。生命个体之间的交流是生命群落的基本特征,某种意义上说,这种信息流动是通过“语言”这个媒介实现的,当然不同种类的生物有它们自己的语言。这样的模型结构体现了生态系统动力学的特征,具有个体的并行性和群体的自适应性等特点。

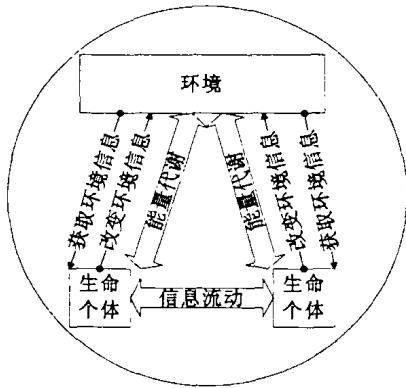


图1

### 2.2 真实的杆菌

杆菌是世界上种类最多的细菌。每个杆菌只有一个细胞,呈杆状或圆柱形。有的杆菌生有鞭毛(flagellum),有的不生。鞭毛是细菌的“运动器官”,鞭毛的运动引起菌体运动。细菌藉鞭毛运动可趋向营养物质和适合的生活环境或避开有害物质。能运动的细菌由于环境条件刺激而改变原来的运动方式,表现出一种新的运动特点,这种运动称为趋避运动,具体有光趋避和化学趋避等。杆菌细胞常沿一个垂直平面分裂。大多数菌体分散存在,有的呈长短不同的链状排列,有的一个紧挨一个呈栅栏状或八字形。如图2。

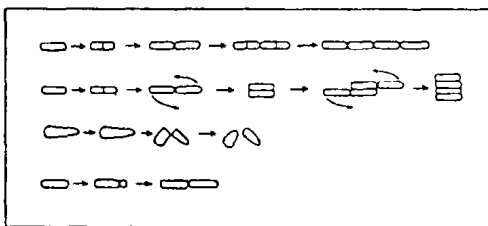


图2

在自然界中的真实的杆菌的这些有趣特点,对于研究人工生命有很大的启发,促使我们将杆菌生命的机制模型化,用于处理一些计算机世界的“运行”问题。在数字图像的曲线抽取方面取得了一些有趣的进展。

### 2.3 人工杆菌模型详述

2.3.0 杆菌生命逻辑的一个成长周期(框图) 杆菌模型具有简单而自然的生命逻辑。每个杆菌个体只是出于本能的想要生存下来、生存得更好。所以在每个成长周期中,它们吸收能量以维持生命,那些获得的能量不足以维生的个体死亡了,而存活下来的个体在获得的能量相当充裕的条件下,将进行繁殖。整个群落就这样繁衍着。

在这样的生命逻辑中,对于单个的杆菌个体来说,生命活动已经抽象到最基本的水平,也达到了最小的必要集合;对于整个杆菌群落来说,反映了这种生命类型在生命周期中的本质活动,也刻画了它的繁衍机制。按照这样的生命逻辑,我们构造了如图3所示的模型细节。

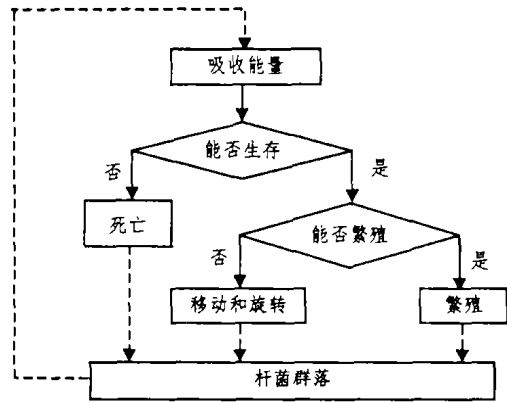


图3

2.3.1 虚拟生存环境 生存环境是承载生命群落繁衍的场所,它提供了生命体存活的基础—能量。在这里,数字图像是我们处理的对象,作为虚拟生存环境。我们并不是直接对数字图像进行处理,而是通过对在作为虚拟生存环境的数字图像上繁衍的人工生命群落的直接监测,来得到生命群落的分布特征,从而间接地得到数字图像的特征。我们认为在生存环境中自然地分布着特定的能量场,生活在其中的生命体总是趋向于能量大的地方才能更好地生存。其中,定义数字图像中的“能量”概念有关键性的意义和极大的灵活性。

给定数字图像  $L$ , 大小为  $U * V$  像素。在像素  $(x, y)$  位置处的灰度值为  $I(x, y)$ 。对于  $(x, y)$  处的能量值用  $E(x, y)$  表示,于是整个能量场  $E = \{E(x, y) | 0 \leq x \leq U, 0 \leq y \leq V; x, y \in Z\}$  表示为式(1):

$$E(x, y) = |\nabla I(x, y)|^2 \quad (1)$$

能量的定义体现了数字图像的特征,确定了处理的主要目标。它的定义是灵活多样的,可以根据处理目的的不同,定义最有利于表达图像某一方面特征的“能量”。这里为了突现边界特征,用梯度信息来定义能量。

2.3.2 人工杆菌个体 现在我们已经建立了人工杆菌生存的环境,在这个环境中,杆菌群落自由地繁衍。像真实的杆菌一样,每个人工杆菌具有短杆状的形状,在生存的环境中有确定的位置和方向,它也有从出生开始计算的年龄、机体内贮备的能量等属性。人工杆菌在其寿命的时间范围内随着时间的推进而进行着生命的行为。

杆菌位置矢量 在数字图像  $L$  上,一个杆菌的位置用矢量  $loc(u, v, l, \theta)$  表示,记为  $p = loc(u, v, l, \theta)$ 。其中  $u, v$  是杆菌中心的坐标,  $l$  是杆菌长度,  $\theta$  是方向。杆菌的身体占据了以  $(u, v)$  为中心,  $\theta$  为方向,长度为  $l$  的位置上的每一个像素。  $C(p)$  表示一个位于  $p$  的杆菌个体上的所有像素点的坐标的集合。

杆菌状态矢量 在某一个确定的时刻  $t$ , 以位置  $p$  出现在图像上的一个杆菌个体用矢量  $b^{(t)}$  表示,  $b \in R^k$ ,  $k$  表示属性的个数,此处  $k=2$  且  $b^{(t)}$  等价于状态矢量  $sta(b_{N_x}, b_{E_{max}})$ 。杆菌菌群  $B(t) = \{b_1, b_2, \dots, b_N; t\}$ , 表示在  $t$  时刻的杆菌群落集合,其中有  $N$  个杆菌个体。随着时间  $t$  的推进,群落中增加了新生的杆菌,同时也有年老的或者营养不足的杆菌死亡,整个群落中杆菌的数量在发生着变化。设在  $t$  时刻新

生的杆菌个体组成的集合记为  $B_{new}(t)$ ，在  $t$  时刻死亡的杆菌个体组成的集合记为  $B_{dead}(t)$ ，则杆菌群落的繁衍变化可以表示为式(2)。同时，那些活着的杆菌也在进行着生命的行为，状态发生着变化。

$$B(t+1) = B(t) \cup B_{new}(t) \setminus B_{dead}(t) \quad (2)$$

**感应范围** 一个位于位置  $p(u, v, l, \theta)$  的杆菌  $b$  的感应范围指的是图像上以  $(u, v)$  为中心， $r$  为半径的圆形区域  $N^r(p)$ 。所有在这个区域内的像素构成了  $b$  的临近像素集合。在感应范围中，圆周均分为8个方向角，记为  $b$  的感应方向角  $\alpha$ 。

感应范围是每个杆菌能力所及的范围，是它感应周围环境能量场和周围伙伴的最大尺度。这也是符合一般意义上的感应范围的，任何一个生物个体的感官作用范围都是有限的。

**个体竞争** 在局部的时间和空间范围内，生存资料的数量是有限的。为了生存就产生了个体之间对于生存资料的竞争。此处表现为杆菌个体对于感应范围内的能量的竞争。两个杆菌  $b_1$  和  $b_2$  分别位于  $p_1$  和  $p_2$ ，它们的感应范围分别是  $N^r(p_1)$  和  $N^r(p_2)$ 。如果  $N^r(p_1)$  和  $N^r(p_2)$  有非空的交集  $N$ ，那么在  $N$  中的能量被  $b_1$  和  $b_2$  竞争。假设像素位置  $(x, y)$  处的能量被  $n$  个杆菌个体竞争，那么每个杆菌在像素点  $(x, y)$  处将获得该点能量  $E(x, y)$  的  $f_{compete} = e^{-(n-1)^2}$  比例的能量。

**存活和死亡** 任何生物的存活都有一个最低的条件，在这里我们抽出最关键的两项来考虑，就是能量和寿命。 $E_{live}$  作为杆菌存活的最低能量， $A_{live}$  作为杆菌存活的最大寿命。当杆菌  $b$  的能量  $b_{Energy} > E_{live}$  并且年龄  $b_{Age} < A_{live}$  时，它可以存活；否则，杆菌个体死亡。

**2.3.3 能量代谢** 每个杆菌个体从产生的一刻开始，就利用自身的独特的生物化学变化，从周围的环境中吸收能量，同时消耗着能量，进行新陈代谢。每个杆菌能量的多少驱动着这个杆菌不同的生命行为，决定着它能否存活、能否移动、能否繁殖。

**获取能量** 杆菌获得能量的多少取决于感应范围  $N^r(p)$  内的环境属性。当在这个区域中出现同类生命个体时，发生了能量竞争，则每个生命体仅能够获得一定比例的本地能量。在一个时间周期  $t$  中每个杆菌从环境中获得的能量记为  $E_{increase}$ 。

$$E_{increase} = \sum_{(x,y) \in N^r(p)} [E(x,y) \times f_{compete}(x,y)] \quad (3)$$

其中： $f_{compete}(x,y) = e^{-(n(x,y)-1)^2}$  表示在像素位置  $(x,y)$  处的竞争系数。

$n(x,y)$  表示在  $(x,y)$  处参加竞争的生命体个数。

**能量代谢** 能量代谢是一个随着时间推进而进行的过程。获得能量的大小取决于环境条件的好坏，消耗能量的多少与杆菌个体的行为和大小有关。对于杆菌  $b^{(p,t)}$  的能量代谢定义如式(4)、(5)：

$$b_{Energy}^{(p,t+1)} = \varphi(b_{Energy}^{(p,t)} + E_{increase} - E_{consume}) \quad (4)$$

$$\varphi(E) = \begin{cases} E & 0 < E < E_{max} \\ E_{max} & E \geq E_{max} \end{cases} \quad (5)$$

其中： $E_{consume} = f_1(\Delta p, l)$  且  $E_{consume} < b_{Energy}^{(p,t)}$

$E_{consume}$  是在一个时间单位中杆菌个体消耗的能量，它是关于本时间单位内杆菌的位置改变量  $\Delta p = \tilde{p} - p$  和杆菌长度的线性函数  $f_1$ 。并且  $E_{consume}$  小于杆菌在时间单位起始时本身的能量  $b_{Energy}^{(p,t)}$ 。

$\varphi$  是杆菌的能量响应函数，它总是大于0的，用来控制杆菌储备能量的能力。

**2.3.4 移动** 真实的杆菌有一些在生存环境恶劣时会长出鞭毛，向着营养物质或者光照区域运动。而在环境条件优

越时不长或者失去鞭毛，安心繁殖新个体。人工杆菌也有这样特性，在某些时候 ( $b_{Energy} > E_{live}$  并且  $b_{Energy} < E_{reproduce}$ )，即杆菌能够生存但是不能繁殖，于是选择移动。

移动的一个关键问题是方向和步长。在此，假定杆菌个体的移动能力即移动的步长是均等的，则主要问题是选择移动的方向。这个方向用一个单位矢量——动力矢量来表示，其中矢量的起点就是杆菌的中心位置  $(u, v)$ 。

**动力矢量** 杆菌移动的动力来自两个方面，一是对于环境能量的趋避，二是对于群落中其他个体的聚集和排斥。所以杆菌个体  $b^{(p,t)}$  移动的方向用移动动力矢量  $\overline{Motivity}$  来表示，由这两方面的因素以某种权重的比例组合而成，定义如式(6)：

$$\overline{Motivity} = \|\omega_1 \times \overline{M_{Energy}} + \omega_2 \times \overline{M_{colony}}\| \quad (6)$$

可以通过调整权重来控制杆菌个体的移动能力和方式。

**能量动力矢量** 能量动力矢量是影响杆菌移动方向的重要因素，它完全由杆菌所处位置的感应范围内的环境能量决定。将杆菌  $b^{(p,t)}$  的中心位置  $(u, v)$  看作  $b$  的感应范围中所有能量矢量的起点，感应范围内的每一点  $(x, y)$  的能量矢量就是：以  $(x, y)$  为终点，能量值  $E(x, y)$  为长度的矢量。则  $b$  的能量动力矢量是  $b$  所能感应到的环境中的所有能量矢量的累加。以此来确定朝哪个方向移动可以获得最大的生存优势。定义如式(7)：

$$\overline{M_{Energy}} = \left\| \sum_{(x,y) \in N^r(p)} \overline{E(x,y)} \right\| \quad (7)$$

**同伴动力矢量** 同伴动力矢量是影响杆菌移动方向的另一重要因素，它由在杆菌感应范围内的同类生命个体影响而产生，主要改变杆菌对环境能量的感应以及对空间位置的占据。同伴的影响也分为竞争和互惠两种。当两个生命体过于接近时，必然造成对环境能量和空间位置的竞争，此时它们表现为相互远离的趋势。当两个杆菌有互惠关系，比如头尾相接可提高抵抗恶劣环境的能力时，它们表现为相互靠近的趋势。此处只考虑普遍存在的竞争关系。

将杆菌  $b^{(p,t)}$  的中心位置  $(u, v)$  看作  $b$  的感应范围中所有竞争矢量的终点，感应范围内的每一点  $(x, y)$  的竞争矢量就是：以  $(x, y)$  为起点，竞争值为  $E(x, y) \cdot (1 - f_{compete})$  为长度的矢量。则  $b$  的同伴竞争矢量是  $b$  所能感应到的环境中的所有竞争矢量的累加，以此确定来自哪个方向的竞争压力最大，从而趋向相反的方向，获得最大的生存优势。定义如式(8)：

$$\overline{M_{colony}} = \left\| \sum_{(x,y) \in N^r(p)} \overline{-E(x,y)} \times (1 - f_{compete}) \right\| \quad (8)$$

**2.3.5 旋转** 每个杆菌都是有形状的个体，短杆状的个体除了在生存环境中确定的位置之外还有自身的方向角，这个方向角在杆菌位置矢量中以  $\theta$  表示。每个杆菌的方向角是由杆菌感应范围中的环境条件和杆菌本身对这些条件的反应机制决定的。在我们的模型里，杆菌在当前位置的感应范围内，选择杆菌个体全身能够感应到的能量之和最大的角度作为自己的方向角。确定方向角后，杆菌以个体中心为中心旋转到这个角度，表现了趋向最大能量的特点。

在这样选择方向角的原则下，杆菌个体全身能够感应到的能量与杆菌所占据的空间位置上分布的能量场的强度有关。简单而自然的设计就是，在杆菌的感应范围内，它感应到的能量强度沿着与自身的方向角垂直的方向呈正态分布递减。则位于位置  $p(u, v, l, \theta)$  的杆菌  $b^{(p,t)}$  感应到的总能量记为  $E_{sense}$ 。

$$E_{sense}(\theta) = \sum_{(x,y) \in N^r(p)} (E(x,y) \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{e^2}{2}}) \quad (9)$$

其中,  $d = \frac{|Ax+By+C|}{\sqrt{A^2+B^2}}$ , 是感应范围内的一点  $(x, y)$  到直线  $Ax+By+C=0$  的距离。

这里直线  $Ax+By+C=0$  是过杆菌中心点  $(u, v)$  并且角度为  $\theta$  的直线。

2.3.6 繁殖 是生命体的重要特征, 甚至可以说是生命本质的一种体现。通过繁殖, 具有相同生命特征和活动机理的生命体被复制, 得以在时间和空间的拓展中延续下来, 保持了生命的存在。

人工杆菌的繁殖类似于真实杆菌的繁殖, 即分裂繁殖。理想情况下, 一个杆菌经过  $n$  个繁殖周期将得到  $2^n$  个杆菌的群落。不过这些杆菌并不一定都能存活, 也不一定都能繁殖, 具体情况要根据所处的环境条件判断。

人工杆菌的分裂繁殖模式类似于真实杆菌, 没有过多的约束。分裂得到的两个子代个体是完全新生的个体, 具有所有新生个体相同的能量和寿命, 与母代个体的能量和生存时间毫无关系。它们分布在原来母体的位置周围, 一个还位于母体的位置, 另一个在距离该位置一个成体长度的随机位置处。两个子代的方位角也是随机产生的, 它们完全有自主权去选择适合自己的方位角。

新生代具有的相似性使得它们在相同的生存能力和机会水平上, 利用相同的标准去衡量和表现它们所处的生存环境; 而新生代在位置和角度上的随机性给了它们根据生存规则去衡量和表现生存环境的充分的自由, 在某种程度上说能够更高效的发掘生存优势。

### 3 人工杆菌模型用于曲线抽取

人工杆菌模型提供了一种检测和表示图片中线状目标的方法。杆菌的短杆的形状可以作为线段来近似地描述曲线, 杆菌群落对整条曲线的覆盖帮助我们获得曲线的表示形式。在恰当地定义了图片中由于曲线的分布而确定的“能量场”的概念之后, 根据杆菌个体对能量的感应和吸收机制, 进而通过杆菌的生命逻辑, 则最终杆菌个体找到一小段曲线的事件是一个自然而且必然的结果。由于整个杆菌群落的繁衍机制, 则最终杆菌群落找到整条曲线也是可以预见的事件。

**适应的杆菌** 怎样定义“找到了曲线”这样的事件呢? 这里用“适应的杆菌”来描述。它是指那些经过了几个成长周期, 已经移动到了足够适合的位置的杆菌; 或者由在足够适合的位置的母代繁殖而来的, 并且也已经调整到了足够适合的位置的后代杆菌。在每个成长周期结束时, 整个杆菌群落中所有这些“适应的杆菌”的个体组成的集合记为  $M(t)$ 。

人工杆菌的繁衍是一个动态过程, 没有固定的最终结果。即使是找到了曲线的杆菌群落, 他们并不懂得所谓的“找到了曲线”, 只是自由的运动到这个最好的生存区域而已。因此曲线上的每一个杆菌都正常的经历着从新生到寿命结束的生命周期。整个人工杆菌系统始终是动态变化着的。

但是人工杆菌系统最终产生了一个动态平衡的结果, 不论时间如何流逝, 杆菌群落的个体数量以及整个群落的分布形状和位置都在一个微小的可忽略的范围内变化, 这是被实验证实了的, 因此在时间序列的统计意义上这是固定的最终的结果。这样的结果通过标记累加矩阵和方向均值矩阵来描述。

#### 3.1 标记累加矩阵和方向均值矩阵的处理

在一个成长周期结束时, 杆菌群落中所有那些符合定义“适应的杆菌”的个体组成了集合  $M(t)$ , 这就是找到曲线的杆菌集合。标记累加矩阵和方向均值矩阵都是记录  $M(t)$  中所有

杆菌的位置和方向信息的, 用于记录在时间序列上的统计结果。

**标记累加矩阵** 标记累加矩阵是和图像大小相同的  $U * V$  的矩阵。在一个成长周期  $t$  结束时, 对应于  $M(t)$  中所有个体占据的像素位置处, 标记累加矩阵的同一位置元素的数量增加一。在找到了曲线的杆菌群落自然的增生和衰减的过程中, 即使菌群在各个成长周期描述出来的曲线不是完全相同的, 但是对于标记累加矩阵来说, 系统平衡后它的累加结果的分布没有明显的不同, 这也是相对固定的曲线检测结果。

**方向均值矩阵** 方向均值矩阵也是和图像大小相同的  $U * V$  的矩阵。在一个成长周期  $t$  结束时, 对应于  $M(t)$  中所有个体占据的像素位置处, 方向均值矩阵的同一位置的元素记录了该像素的方向角, 并且和矩阵中该元素原有的方向角均值求新的平均。求平均时每个周期的方位角的权值都相同, 与求平均的时间先后无关。对于位于  $i$  行  $j$  列的矩阵元素  $A(i, j)$  来说, 均值计算如式(10):

$$A_{t+1}(i, j) = \frac{t}{t+1} \times A_t(i, j) + \frac{C_{t+1}}{t+1} \quad (10)$$

其中  $t$  表示成长周期, 也就是累加的次数,  $A_t(i, j)$  表示在周期  $t$  时  $(i, j)$  位置的元素已经记录的方位角均值,  $C_{t+1}$  表示在周期  $t+1$  时该位置应该增加的方向角的值。

由于有了方向均值矩阵, 可以方便地根据它的方向引导, 在已经检测出曲线的标记累加矩阵上, 提取出曲线, 表述为直线链码、夹角链码或者其他的表述方式。

## 4 实验结果及性能分析

由于现实中的同一种杆菌个体长度几乎相等, 因此实验中的人工杆菌设定固定的长度, 也便于描述。杆菌群落在图像环境中以随机方式初始化, 分布在整个图像上, 每个杆菌的位置和方向都是随机产生的。此时标记累加矩阵和方向均值矩阵都是空的, 即全零的。随着迭代次数的增加, 杆菌群落在数量上逐渐趋于描述边界的合理个数, 同时个数变化很小, 趋于稳定; 在分布上, 杆菌群落逐渐在非边界的地区死亡, 并且在边界地区蔓延直到最大限度占据边界地区。同时, 标记累加矩阵和方向均值矩阵也逐次记录着“适应的杆菌”的信息, 逐次修正边界信息, 同时这种修正的信息变化也越来越小, 趋于稳定。

图4为经过  $10^2$  数量级的迭代次数后的杆菌群落分布图和标记累加矩阵即抽取的边界图。其中可以看到红色的杆菌个体一个接一个地围绕在物体边界上。

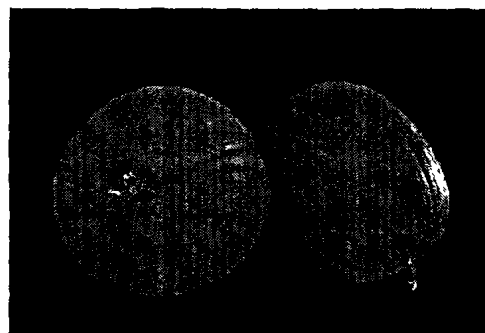


图4

**迅速收敛以及稳定性** 实验表明, 繁衍系统迅速地达到平衡状态。参见图5, 经过  $10^2$  数量级的迭代次数后, 杆菌群落中的个体数量和分布形状的变化很小, 几乎可以忽略不计。菌落繁衍的同时, 标记累加矩阵迅速地、并行地收集到图像上的粗略边界信息, 获得它的位置; 同时, 方向均值矩阵也同步获

取了每个边界像素点的方向信息,指导每个像素前后相连的像素位置。随着迭代次数的增加,标记累加矩阵和方向均值矩阵精细修画边界的细节信息。这是一种并行的、全局的获取信息的方式。

对同一幅图片进行多次试验,每次初始化均为随机地分布杆菌位置和方向。实验表明,每次繁衍都经过相同数量级的迭代次数达到平衡状态;平衡状态时,它们的标记累加矩阵和方向均值矩阵的结果的分布几乎相同,说明了杆菌模型的稳定性。

**无冗余以及完整性** 从图6的对比中可以看出,标记累加矩阵收集到的像素点,从人的视觉判断看,几乎全是边界点;从计算机的角度看,标记累加矩阵有数值的地方就是人看到的边界,而被认为不是边界的地方,计算机看到的数值都是零。也就是说几乎没有冗余信息。

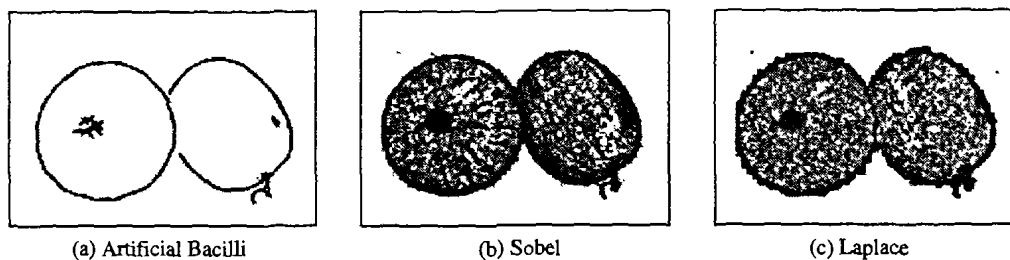


图6

虽然 Sobel、Laplace 等边界检测算子也有很强的边界监测能力,但是由于它们是面向局部和面向灰度的,因此这些算子除了突出的显示图像中物体的边界之外,对整个物体的区域也会产生数值,甚至包括对噪音产生数值。这对于下一步的曲线描述极其不利。而人工杆菌模型是面向全局和面向物体的,所以能够不受噪音的干扰,甚至能够屏蔽物体区域的影响,而只标识出物体的边界。这为下一步的曲线描述提供了精确、方便的数据,更何况同时还提取出了每个边界点上趋于下一个边界点的方向信息。

在无冗余的同时,人工杆菌模型还有一个突出的优点,就是几乎所有的边界都能被找到。虽然初始化的时候图像边界只有一部分被杆菌个体覆盖,但是经过一段时间的繁殖和移动,杆菌个体逐渐蔓延到所有的图像边界,以一种有序的方式排列,标记了曲线信息,保证了曲线抽取的完整性。

**方向信息以及精确性** 方向均值矩阵具有重大的意义。图像曲线描述中“走向”的信息非常有用却又难以获得,特别是精细而且准确的“走向”信息。这里的方向均值矩阵提供了边界上每个像素的方向信息,因此可以说相当精细;并且是以一个像素位置上多次迭代的统计数值作为该像素的方向,因此也可以说相当准确。

实验证明,杆菌模型对曲线有较强的检测能力,能够提供完整、精炼且带有方向的曲线信息。同时整个繁衍系统能够迅速地收敛到稳定的平衡状态。

**结论** 人工杆菌模型证实了人工生命用于曲线处理的可行性,体现了一些优势。其中,个体的行为规则简单并且面向局部,对应于图像局部细节标注;个体之间的交互使得处理范畴扩大到中等规模,实现了邻里之间的信息共享和行为协调;个体与环境之间的交互则通过环境这个媒介,从全局意义上

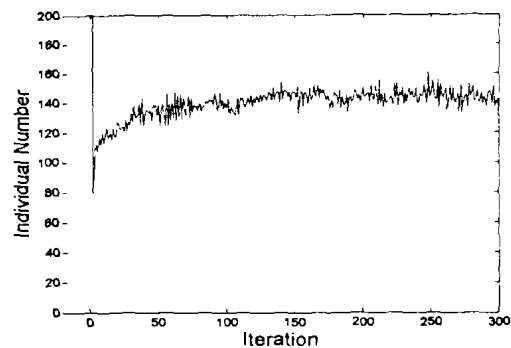


图5

指导个体行为。因而,整个群体涌现出自适应的智能特点。它体现了生态系统动力学的特征,具有个体的并行性和群体的自适应性等特点。

这里还可以发掘大量的后续研究。例如在已有框架下增删或修改生命规则来提高性能或者处理其他问题。通过得到的两个矩阵如何表示曲线等等。

总而言之,人工杆菌模型对于数字图像的处理突破了传统图像处理的模式。从并行的、动态的、系统的角度,结合人工生命的思想,提供了一种用于图像处理的全新思路。

## 参考文献

- 1 Robinson G S. Edge detection by compass gradient masks. *Computer Graphic Image Processing*, 1977, 6: 492~501
- 2 Rosenfeld A, Thurston M. Edge and curve detection for visual scene analysis. *IEEE Trans. Comput.*, 1971, C-20: 562~569
- 3 Argyle E. Techniques for edge detection. In: *Proc. IEEE*, 1971, 59: 285~287
- 4 Hough P. Methods and Means for Recognizing Complex Patterns. US Patent 3069654, 1962
- 5 Kass M, Witkin A, Terzopoulos D. Snakes: Active contour models. *Intl. Journal of Computer Vision*, 1988, 1: 312~331
- 6 Thearling K. Putting Artificial Life to Work. In: Männer, R., and Manderic, B, eds. *Parallel Problem Solving from Nature 2*. North-Holland, Amsterdam
- 7 Liu J, Tang Y Y. An evolutionary autonomous agents approach to image feature extraction. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1997, 1(2): 141~158
- 8 Liu J, Tang Y Y. Adaptive image segmentation with distributed behaviour based agents. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, 21(6): 544~551
- 9 He H, Chen Y Q. Artificial Life for Image Segmentation. *Intl. Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, World Scientific, 2001, 15(6)
- 10 Reynolds C W. Flocks, Herds, And Schools. A Distributed Behavioural Model. *Computer Graphics*, (SIGGRAPH '87 Conference Proceedings), 1987, 21(4): 25~34