

基于两组细胞神经网络的工业 CT 图像分割

刘长江^{1,2,3}, 曾理^{1,2}

LIU Chang-jiang^{1,2,3}, ZENG Li^{1,2}

1.重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室 ICT研究中心, 重庆 400044

2.重庆大学 数理学院, 重庆 400044

3.四川理工学院 数学系, 四川 自贡 643000

1.ICT Research Center, Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System of the Education Ministry of China, Chongqing University, Chongqing 400044, China

2.College of Mathematics and Physics, Chongqing University, Chongqing 400044, China

3.Dept. of Mathematics, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong, Sichuan 643000, China

E-mail: Lizeng@cta.cq.cn

LIU Chang-jiang, ZENG Li. Industrial Computerized Tomography image segmentation based on two Cellular Neural Networks. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(7): 206-208.

Abstract: Two groups of Cellular Neural Networks (CNN) have been used to segment Industrial Computerized Tomography (ICT) Images. The first group, namely rough image segmentation, has been adopted to obtain thresholding images, then with the adaptation of the second group some more sophisticated segmentation information will be procured, with edges included. This article deals with the Pseudo-steady-state of net, which has been served as the termination condition of the iteration. Experimental results of engineering image series demonstrate the efficiency of the methods presented in the article.

Key words: Cellular Neural Network (CNN); Industrial Computerized Tomography (ICT); image segmentation; edge detection

摘要: 采用两组细胞神经网络实现工业 CT 图像的分割。一组细胞神经网络用粗分割, 得到阈值分割图像, 在此基础上用另一组细胞神经网络细分, 得到精细的边缘等信息。修正网络稳定态的定义, 以网络伪稳定态作为网络迭代过程的终止条件。应用该方法, 以发动机切片 CT 图像作为实验对象, 能取得较好的效果。

关键词: 细胞神经网络; 工业 CT; 图像分割; 边缘检测

文章编号: 1002-8331(2008)07-0206-03 文献标识码: A 中图分类号: TP391

1 引言

细胞神经网络 (CNN) 是由 Chua 和 Yang^[1,2] 于 1988 年在美国加州伯克利大学电气工程和计算机科学系发明的。现在, CNN 已成为一个非常活跃的学术领域, 涵盖大规模并行计算、细胞自动机、图像处理、可视化大规模集成电路 (VLSI) 芯片和视觉处理器。CNN 广泛应用于图像处理的各个领域, 如边缘提取^[3-5], 图像去噪^[6], 图像恢复^[7], 字符识别^[8]等。

工业 CT 技术作为 20 世纪 80 年代发展起来的先进无损检测技术, 由于其具有非破坏性、测量精度高等特点, 广泛应用于诸多领域。CT 图像分割在许多图像分析和图像识别中都是必需的步骤, 图像分割技术广泛应用于测量^[9]、逆向工程等方面。本文针对工业 CT 图像的特点, 采用两组 CNN 实现工业 CT 图像分割的方法。实验结果表明, 本文的方法可将物质单一的工业 CT 图像分割成边缘、空气、实体三部分, 得到精细、连续的边缘, 并可得到相应部分的简单统计信息。

2 细胞神经网络

细胞神经网络的基本电路单元称作一个细胞 (cell), 考虑二维 $M \times N$ 的细胞神经网络, 以 $c(i, j)$ 表示第 i 行, 第 j 列的细胞。细胞 $c(i, j)$ 的动态方程^[10]描述如下:

(1) 状态方程

$$C \frac{dv_{ij}(t)}{dt} = -\frac{1}{R_x} v_{ij}(t) + \sum_{C(k,l) \in N(i,j)} A(i,j;k,l) v_{kl}(t) + \sum_{C(k,l) \in N(i,j)} B(i,j;k,l) v_{kl} + I, 1 \leq i \leq M; 1 \leq j \leq N \quad (1)$$

其中 C, R_x 分别表示电容、电阻常量。下标 x, y, u 分别表示网络状态变量、输出变量、输入变量, 如 v_{ij} 表示细胞 $c(i, j)$ 的状态变量。 $A(i, j; k, l), B(i, j; k, l)$ 表示细胞 $c(i, j)$ 与 $c(k, l)$ 的连接权值。 $N_r(i, j)$ 表示细胞 $c(i, j)$ 的 r 邻域细胞, 即:

$$N_r(i, j) = \{c(k, l) | \max(|k-i|, |l-j|) \leq r\}$$

图 1 给出 $r=1$ 时邻域细胞的示意图, 其中 Δ 代表细胞 $c(i,$

基金项目: 国家自然科学基金 (the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60672098); 重庆市科技计划攻关项目 (No.CSTC2006AB3027); 教育部春晖计划项目 (No. Z2005-2-63001)。

作者简介: 刘长江 (1979-), 男, 硕士生, 研究方向: 图像处理; 曾理 (1959-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 图像处理。

收稿日期: 2007-10-18 修回日期: 2008-01-07

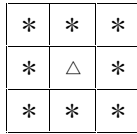


图1 r=1 时邻域细胞图

$j)$, * 代表其 $r=1$ 的邻域细胞。

(2)输出方程

$$v_{yij}(t)=f(v_{yij}(t))=\frac{1}{2}[[v_{yij}(t)+1]-|v_{yij}(t)-1|] \quad (2)$$

(3)约束条件

$$|w_{yij}| \leq 1, |w_{yij}(0)| \leq 1 \quad (3)$$

(4)参数假设

$$A(i,j;k,l)=A(k,l;i,j) \quad (4)$$

文献[1]已经证明 CNN 是稳定的,指出:

定理 1 如果网络参数满足:

$$A(i,j;i,j) > \frac{1}{R_x} \quad (5)$$

则有:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |v_{yij}(t)| \geq 1$$

或者等价地有:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} v_{yij}(t) = \pm 1$$

定理 1 保证了细胞神经网络有二值输出,该性质对于图像处理的分类问题有着重要意义。

3 用于图像分割的 CNN

在图像处理中,细胞 $c(i,j)$ 对应图像像素点 (i,j) ,假设处理图像大小为 $M \times N$ 。式(1)中网络输入 v_{ukl} 对应图像灰度,当网络稳定时,网络输出 v_{yij} 对应图像的一种分类(模式)。一般地,电容常量 $C=10^{-9}$ F,电阻常量 $R_x=10^3 \Omega$ 。

为了满足 CNN 约束条件式(3),作线性变换将 $[0, 255]$ 的灰度区间映射到 $[-1, 1]$,记变换:

$$v_{ukl} = \frac{2}{255} v_{ukl} - 1 \quad (6)$$

在网络动态变化过程中, v_{ukl} 不变,记:

$$I(i,j) = \sum_{C(k,l) \in N_r(i,j)} B(i,j;k,l) v_{ukl} + I \quad (7)$$

3.1 网络稳定的讨论

定义 1^[1] 细胞稳定平衡状态:

在带直流输入电压 v_{ukl} 的细胞神经网络中, v_{yij}^* 被称为细胞 $c(i,j)$ 稳定平衡状态,只需要满足下列条件:

$$\begin{cases} \left. \frac{dv_{yij}(t)}{dt} \right|_{v_{yij}=v_{yij}^*} = 0 \\ v_{yij} = \pm 1, \text{ 对 } c(k,l) \in N_r(i,j) \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中第 1 个方程是 v_{yij}^* 成为稳定平衡状态的必要条件。式(1)中,模板 A 以 $10^{-3} \Omega^{-1}$ 为单位, B 以 10^{-3} A 为单位,并令式(1)左边等于 0,则有:

$$v_{yij}(t) = \sum_{C(k,l) \in N_r(i,j)} A(i,j;k,l) v_{yij}(t) + \sum_{C(k,l) \in N_r(i,j)} B(i,j;k,l) v_{ukl} + I \quad (9)$$

从而得到稳定平衡状态的候选点 v_{yij}^* ,根据式(8)第 2 个方程进一步判断其是否为稳定平衡状态。

将 CNN 用于图像分割时,一般选取模板具有形式^[9]:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, a > 1$$

将模板 A 代入式(9),结合式(2),并考虑 CNN 初始状态约束条件式(3),得到图像分割 CNN 的离散形式的迭代公式:

$$\begin{cases} v_{yij}(n+1) = a v_{yij}(n) + I(i,j) \\ v_{yij}(n) = \frac{1}{2} (|v_{yij}(n)+1| - |v_{yij}(n)-1|) \\ v_{yij}(0) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N$$

定义 2 基于式(6)、(7)、(10)的迭代过程中,当 $v_{yij}(n) \equiv$ 常数时称为网络伪稳定态,迭代过程终止。

实验发现,一般地,用于图像处理的 CNN 先经过网络伪稳定态,再达到细胞稳定平衡状态。对发动机切片 CT 图像的实验表明,用网络伪稳定态作为迭代过程的终止条件,不仅可以快速得到边缘,还可以得到其它的分割信息。

文献[4]推导出 $v_{yij}(n+1)$ 与 $v_{yij}(1)$ 的关系:

$$v_{yij}(n+1) = a v_{yij}(n) + v_{yij}(1) \quad (11)$$

式(11)说明 v_{yij} 恒定不变时, v_{yij} 不再变化,达到网络伪稳定态。讨论 $v_{yij}(1)$ 的取值情况,可以得到下述结论:

- (1)若 $v_{yij}(1)=0$,则 $v_{yij}(n)=0$;
- (2)若 $v_{yij}(1) \geq 1$,则 $v_{yij}(n)=1$;
- (3)若 $v_{yij}(1) \leq -1$,则 $v_{yij}(n)=-1$;
- (4)若 $-1 < v_{yij}(1) < 1$, $v_{yij}(n) (n > 2)$ 无法由 $v_{yij}(1)$ 决定。

结论(1)~(3)见文献[4]。对于结论(4), $-1 < v_{yij}(1) < 1$,由式(10)第 2 个方程得: $v_{yij}(1) = v_{yij}(1) \in (-1, 1)$ 代入式(11),有 $v_{yij}(2) = a v_{yij}(1) + v_{yij}(1) = (a+1) v_{yij}(1)$ 。在 $a > 1, -1 < v_{yij}(1) < 1$ 条件下, $v_{yij}(2)$ 落在 $(-\infty, -1], (-1, 1), [1, +\infty)$ 某一区间均有可能,所以不能由确定的取值。

综上所述讨论,要得到网络输出,只需要对 $-1 < v_{yij}(1) < 1$ 的细胞 $c(i,j)$,由式(11)迭代直至网络达到伪稳定态。而对其它情形的细胞,其网络输出由 $v_{yij}(1)$ 的取值直接得到。

4 两组 CNN 图像分割方法

CNN 用于图像分割,关键是参数 a, I 及模板 B 的确定,待网络达到伪稳定态时,得到 CT 图像分割结果。对发动机切片 CT 图像的实验来看,由一组 CNN 网络实现图像分割效果不佳。本文采用两组 CNN,实现图像分割,思路如图 2 所示。

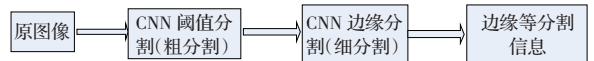


图2 两组 CNN 图像分割流程示意图

4.1 阈值分割 CNN

由式(7), $I(i,j)$ 在网络的动态过程中,与时间 t 无关,仅与原图像及常数 I 有关,因而 $I(i,j)$ 包含了原图像信息。设计粗分割 CNN 网络结构时,选择低通模板起到降噪的目的。

当网络达到伪稳定态时,网络输出 $v_{yij} = -1, +1$,分别对应像素 0, 255,实现图像粗分割,得到阈值分割图像。对发动机切片序列图像进行 CNN 阈值分割,可使用统一的网络参数并达到较好分割效果,易于批量处理。

4.2 边缘分割 CNN

对阈值分割图像,选取新的 CNN 参数,当网络达到伪稳定

态时,网络输出 $v_{yij}=-1$ 对应像素0, $v_{yij}=1$ 对应像素255(边缘点), $v_{yij} \in (-1,1)$ 对应像素128,从而把原图像分成3部分:边缘,空气,扫描物体实体部分。CNN用于边缘提取时,模板通常取作具有以下形式^[9]:

$$B = \begin{pmatrix} -c & -c & -c \\ -c & b & -c \\ -c & -c & -c \end{pmatrix}$$

CNN边缘分割较常规边缘检测方法,能得到更多的分割信息,并且网络参数具有很好的适应性,对发动机切片序列图像进行分割,可使用统一的网络参数。

5 实验及结果

5.1 本文方法的实验结果

以发动机切片图像序列^[10]作为实验对象。利用Delphi 7编程,设计CNN工业CT图像分割软件。软件及实验结果附图如图3、图4所示。

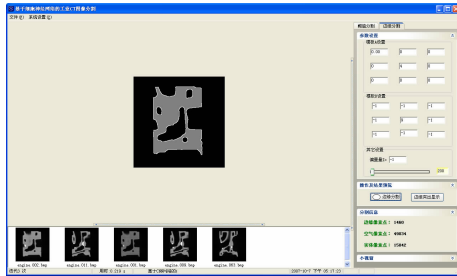


图3 基于神经网络的工业CT图像分割软件界面

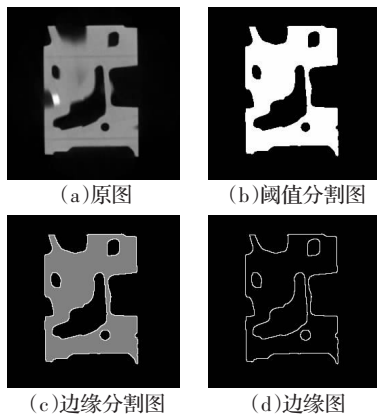


图4 实验结果

图4是发动机切片序列中第2张的实验结果。图4(b)是在图4(a)原图基础上,利用阈值分割CNN得到的分割图像。图4(c)是在图4(b)阈值分割图像的基础上,利用边缘分割CNN得到的分割图像。图4(c)中分别用灰度0,255,128表示空气、边缘、实体部分,并得到各部分的分割信息(边缘像素点数1460,空气像素点数49034,实体部分像素点15402)。图4(d)是图4(a)的边缘图。

利用分割软件对128张发动机切片图像进行实验,均能得到精细、连续且封闭的边缘。

5.2 对比实验

采用一组CNN进行图像分割(边缘CNN),只能得到少量的且不连续的边缘点,如图5所示。

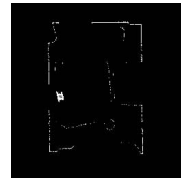


图5 采用一组CNN的边缘图

图6、图7给出Canny算法的边缘图。图6是采用自适应阈值(高阈值0.0313,低阈值0.0125)的方法得到的边缘。图6边缘图像噪声影响大,边缘不连续。图7是采用手动调节阈值(高阈值0.16,低阈值0.064)的方法得到的边缘。图7边缘图像噪声影响较小,边缘仍然不连续。用Canny算法对128张切片图像进行边缘检测,无法使用统一的阈值,不利于自动批量处理。

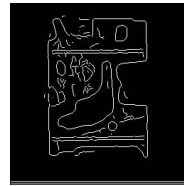


图6 Canny算法边缘
(自适应阈值)

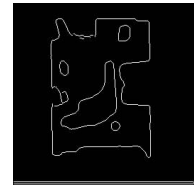


图7 Canny算法边缘
(手动阈值)

6 结论

CNN突出的优点是能高速并行计算,且处理速度与图像大小无关,便于硬件实现,在图像实时处理方面具有很大潜力。本文设计的两组CNN实现工业CT图像分割,比采用一组CNN的方法获得更精细的边缘。对于物质组成单一的工业CT图像,还能获得其它有用的分割信息。对于物质组成复杂的工业CT图像,处理效果欠佳,还需要做进一步的研究。

参考文献:

- [1] Chua L O, Yang L. Cellular Neural Networks: theory[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1988, 35(10): 1257-1272.
- [2] Chua L O, Yang L. Cellular Neural Networks: applications[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1988, 35(10): 1273-1290.
- [3] Zhao Jianye, Wang Haiming, Yu Daoheng. A new approach for edge detection of noisy image based on CNN[J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 2003, 31(2): 119-131.
- [4] 黄蕾, 刘文波. 基于CNN的灰度图像边缘提取算法中模板参数的研究[J]. 计算机与现代化, 2006, 6: 69-74.
- [5] 张洪钺, 钱芳, 郭红涛. 用神经网络提取二值与灰度图像边缘[J]. 中国图象图形学报, 2001, 6(10): 974-978.
- [6] 汪海明, 郭仕德, 余道衡. 一类用神经网络实现图像去噪的新方法[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2003, 39(5): 666-674.
- [7] Tao Y, Yang L B. Application of fuzzy CNN to morphological gray-scale reconstruction [J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 1997, 25(2): 163-165.
- [8] 曾理, 郭海燕, 候立华, 等. 基于改进主动轮廓模型的心室内窥显示及测量[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(19): 210-213.
- [9] Chua L. CNN: a paradigm for complexity[M]. Singapore: World Scientific, 1998.
- [10] Engine raw[EB/OL]. (2006). <http://www.gris.uni-tuebingen.de/areas/scivis/volren/datasets/data/engine.raw.gz>.