

基于元胞自动机模型的新型二值图像压缩算法^①

黄鹏涛 陈贤富 (中国科学技术大学 电子科学与技术系 安徽 合肥 230027)

摘要: 不同于传统的去相关, 去冗余的压缩方法, 提出一种基于元胞自动机模型的二值图像压缩算法。该算法用遗传规划算法搜索出较优的元胞自动机规则后, 对分块后的二值图像矢量进行元胞自动机变换, 利用元胞自动机的变换状态多样性等特点, 生成相邻矢量, 将变换次数作为码本。实验表明: 该算法经过 4 次以内的元胞自动机变换即可生成较优的相邻矢量, 具有编码时间短、重建图像的质量好、压缩率高、适应性强等特点, 并且与其它压缩算法结合性好。

关键词: 元胞自动机; 二值图像压缩; 矢量量化; 遗传规划

Novel Binary Image Compression Algorithm Based on Cellular Automata

HUANG Peng-Tao, CHEN Xian-Fu (Department of Computer Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: This paper reports a new Cellular Automata (CA) model for image compression. The genetic programming has been employed to search for optimal non-linear cellular automata rules which are used to generate vectors. The code is the simple CA cycle number. The simulation research proves that the algorithm is good in compression ratio, compression speed, decompression precision and the code can be compressed using other compression algorithms etc. The searched CA rule is also good for different compression.

Keywords: cellular automata; binary image compression; vector quantization; genetic programming

1 引言

随着通信技术的发展, 人们对图像和视频压缩技术提出了更高的要求, 如: 以二值位图文件为主的纸质档案建设需要进一步提高压缩率, 而传统的 TIFF G4 图像压缩算法、PDG 格式和 NLC 格式等压缩算法已相当成熟, 压缩率很难再提高^[1]。人们开始引入新的理论和方法, 探索图像压缩技术的新途径; 随着人工智能、并行计算等相关技术的发展, 探索智能计算在图像压缩中的应用也成为一个研究的热点方向。基于元胞自动机的二值图像压缩算法利用矢量量化的思想, 但避开了码本的设计和搜索, 达到了类似的压缩效果。将该算法对样本和测试图像的压缩效果与行程

编码表明: 该算法在压缩适应性, 时间空间复杂度, 控制图像压缩的损失率灵活性等方面优越于行程编码算法。

第 2、3、4 节介绍本文算法的相关知识。第 5 节给出该算法模型。第 6、7 节给出实验相关参数、实验数据以及该算法的优劣性分析。第 8 节给出本算法的未来工作以及在该领域的意义、发展前景。

2 元胞自动机模型

元胞自动机^[2](CA)最早由冯·诺伊曼于 20 世纪 40 年代末提出的模型, 由元胞空间、状态、邻居及规则组成的时间和空间都离散的并行动力系统, 是一种基

^① 收稿时间:2010-03-21;收到修改稿时间:2010-04-25

于局部的相互作用，研究系统的整体行为的特殊有限状态自动机。每个元胞的硬件模型由输入部分、输出部分、存储器和运算器等构成独立的处理器单元；CA 散布在网格上，相互连接，一维 CA 是条直线，按照 CA 的左右邻域构成的规则，依次对输入的图像矢量进行 CA 演化，生成后项的图像矢量。二维 CA 网格形状有三角形，正方形和六边形等；元胞的下一个状态是由当前其本身的状态及其邻居的状态共同决定；按照演化过程动力学行为划分，CA 有平稳型、周期型、混沌型、复杂型四大类。如：著名的平稳型二维 CA——J.H.Conwa 设计生命游戏，该 CA 模型中 0、1 两个状态分别代表“生、死”，网格形状为正方形，邻居半径为 1，元胞的状态由该元胞和周围相邻的八个邻居的状态和决定：如果一个元胞为“生”，且八个相邻元胞中有两个或三个的状态为“生”，则在下一时刻保持为“生”，否则“死”去；如果一个元胞为“死”，且八个相邻元胞中正好有三个为“生”，则在下一时刻“复活”；按照此规则演化。如图 1、图 3 分别是随机初始化图和十字形初始化图，图 2、图 4 分别是二者的演化收敛图。

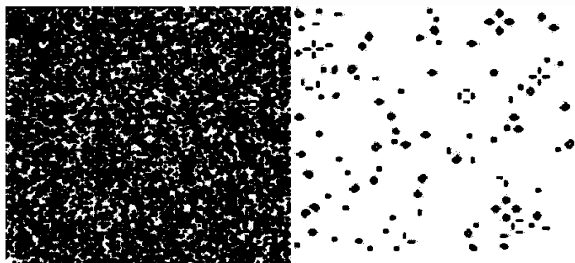


图 1 随机初始化图 图 2 演化后的收敛图



图 3 十字形初始化图 图 4 演化后的收敛图

本文算法的压缩机理是：将前项矢量输入 CA 输入状态，经过 CA 变换后状态作为后项矢量，将 CA

变换次数 n 编码。由于 CA 规则固定，则将前项矢量输入 CA，进行 n 次数 CA 变换，就可以生成确定后项矢量，实现解压，恢复原图像。由于 CA 变换次数组成的编码远小于矢量编码，从而可以实现了二值图像的压缩。编码器是一个特殊的有限状态矢量量化器^[3]；硬件实现框图如图 4，CA 具有 0、1 两种状态对应于二值图像的像素的黑白数值，规则半径为 2，采用首尾相连接的周期型边界条件规则，CA 的下一个状态是由当前其本身的状态及其左右 4 个邻居的状态共同决定，控制器控制 CA 的变换次数，输出状态与下一个图像矢量的匹配度； X_n 是由二值图像分块后生成的输入矢量； i_n 输出码本；利用 CA 演化状态的复杂多样性，易于生成匹配矢量，取得良好的压缩效果。

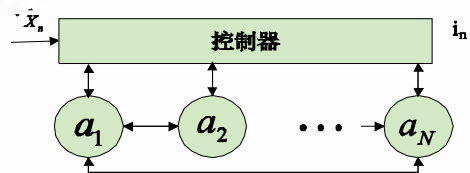


图 4 基于元胞自动机模型的有限状态矢量量化器结构

2.1 单规则元胞自动机模型 (Uniform Cellular Automaton)

单规则元胞自动机^[4]的每个元胞具有有限个离散状态，使用同一种演化规则；所有元胞同步进行演化，其动态演化规则可表示为：

$$a_i^{t+1} = F(a_{i-n}^t, \dots, a_{i-1}^t, a_i^t, a_{i+1}^t, \dots, a_{i+n}^t) \quad (1)$$

其中 $a_i^{t+1}, a_i^t, a_{i-n}^t, L, a_{i+n}^t$ 分别表示第 i 个元胞 t+1 时刻，t 时刻的状态值和关系邻居，F 是演化规则，每一个元胞有 k 个状态，元胞的状态取 0 到 k-1 范围内任意一个整数值，称为 k 状态，m 个邻居的 CA。如：最简单的单规则元胞自动机是初等元胞自动机：每一个元胞有 0 和 1 两种状态，关系邻居半径为 1。元胞有 $2 \times 2 \times 2 = 8$ 种组合，分别对应 $(000)_2 \sim (111)_2$ ，共有 $2^8 = 256$ 种不同的规则如图 1 其中的一种初等元胞自动机变换，把输出部分的 $(10100011)_2$ 转换成十进制数的形式 163，称为元胞自动机的规则。

表 1 单规则元胞自动机规则 163 状态转换图

t	111	110	101	100	011	010	001	000
t+1	1	0	1	0	0	0	1	1

2.2 多规则元胞自动机模型(Non-uniform cellular automata)

多规则元胞自动机模型^[5]的不同之处在于：每个元胞遵循各自独立的不同作用规则，同步更新，大量的元胞通过简单的相互作用而构成更复杂的动态系统的演化过程。多规则元胞自动机状态更加丰富，规则空间更加巨大，搜索规则复杂度也更高，如图 1：半径为 2 的多规则元胞自动机，其规则有 5×2^8 ，其中的规则为 $\langle 102, 60, 204, 204, 270 \rangle$ 的 CA 状态转换图。

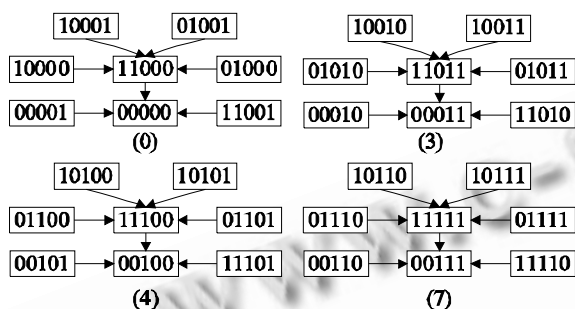


图 5 多规则 5 元胞自动机状态转换图

3 遗传规划

由于元胞自动机规则空间巨大，如：本文算法使用的规则半径为 2，单规则元胞自动机的规则空间为 2^{32} ，多规则元胞自动机的规则空间为向量长度 $N \times 2^{32}$ ，用穷举法搜索元胞自动机规则是不太可能。搜索满足需求的较优规则是本文算法的最大问题，采用遗传规划算法(Genetic Programming, GP)算法很好的解决了这个问题^[6]。

GP 是由斯坦福大学的 Koza 教授于 1989 年提出的用于优化设计及自动生成计算机程序的一种算法，与遗传算法相似，其思想是：给定任务的初始状态、目标状态和所有可行的操作的条件，随机生成一组初始解，遵从“优胜劣汰，适者生存”原则，通过复制、交叉和变异等遗传操作，逐步迭代，从巨大可行解空间中搜索出能达到目的的最优解规则；与遗传算法不同点在于，GP 具有描述问题层次化、编码长度动态可变等特点，能更好的扩大随即搜索 CA 规则空间，同时减少算法复杂度。

4 矢量量化

矢量量化(Vector Quantization 简称 VQ)是一种基于块编码的数据压缩方法，把每 K 个连续数据样本

分成一组，形成 K 维欧式空间中的一个矢量。在欧几里德空间 R^K 中，把 K 维空间无遗漏地划分为 N 个互不相交的子空间；进行量化时，首先要选好一个合适的失真测度，利用最小的失真测度原则，在每一个子空间中，找出一个代表矢量： $v_i = \{v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iM}\}$ 记为矢量集 $v = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ ， v_i 称为码书。编码过程是：对于输入矢量 $x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iM}\}$ ，在 V 中找出一个与 x_i 最相近的矢量 v_i 代替 x_i 。本文算法采用的失真测度是绝对误差失真测度：

$$d(v_i, x_i) = |v_i - x_i| = \sum_{j=1}^K |v_{ij} - x_{ij}| \quad (2)$$

VQ 是一种高效快速的数据压缩编解码方法，具有解码简单、压缩率高和易于硬件实现等优点，已经广泛用于语言和图像数据压缩编解码之中，其关键问题是码本设计、码字搜索，传统的矢量量化算法如：LBG 算法、神经网络算法等训练码本算法复杂度高，生成码本速度慢，很难在失真和运行时间之间产生很好的综合，通性差；本文算法避免了训练码本的复杂运算过程，失真大小便于控制，时间复杂性低，有效的避免了传统的生成码本问题。

5 基于元胞自动机的二值图像压缩算法模型

压缩算法的目标是用尽可能少的数据表示原图像信息。二值图像解压缩模型主要算法包括 CA 规则的搜索算法，编码算法，解码算法。整个图像传输过程的流程图如图 2 所示；虚线内是本算法与其他压缩算法结合的可选模块，用于进一步提高压缩效果。

5.1 CA 规则的搜索算法

该算法采用 GP 搜索较优的 CA 规则，主要步骤如下：

步骤 1：初始化群体。随即生成 CA 邻域个数和位置以及邻域个数组成的 CA 规则构成的个体；控制个体中的邻域个数和位置，对不符合规则的个体直接删除或调整生成合法的个体。

步骤 2：对种群个体进行遗传算子操作。交叉操作：采用随即寻找到的相同邻域个数的个体进行交叉。变异操作：随即生成指定范围内的邻域个数和邻域位置，如果变异的个体中规则大小不合法，则进行规则调整。

步骤 3：适应度评价。将样本二值图像进行分块

生成矢量，用每个新个体规则进行CA模型压缩算法，用压缩效率作为适应度大小。

步骤4：如果找到满足条件的规则或达到最大迭代数则进化终止；否则转到步骤2。

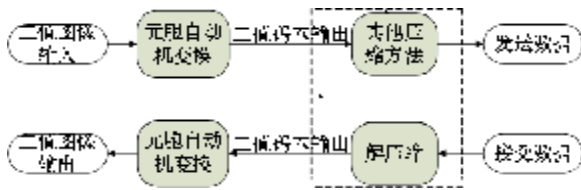


图6 二值图像压缩算法的传输流程图

5.2 编码算法

该算法的主要思想是：将二值图像分块生成矢量后，利用临近矢量的相关性和元胞自动机变换状态的多样性，将前项矢量，按照最优CA规则，进行元胞自动机变换生成后项矢量，记录CA变换次数作为码本，大大减少了二值图像信息数据，算法流程图如图7所示，具体步骤如下：

步骤1：输入二值图像，进行分块处理，形成矢量，设定元胞自动机变换最大运算次数N。

步骤2：将一个图像矢量块输入CA，按照搜索出的较优规则，进行CA变换，将生成的矢量与下一个相邻矢量比较，如果小于误差阈值，则输出元胞自动机运算次数n作为码本，否则将输出矢量作为输入矢量再次进行元胞自动机变换，如此循环运算，如果变换次数大于N，则码本为对应的原图像矢量。

步骤3：重复步骤2过程直至每个矢量处理完毕。

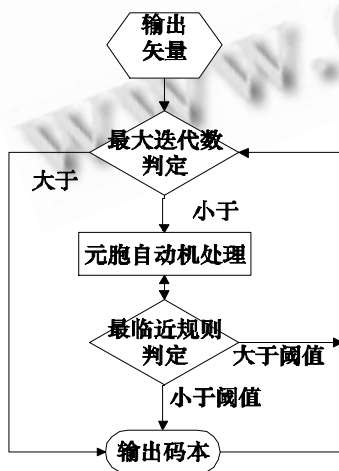


图7 基于元胞自动机的二值图像压缩算法的流程图

5.3 解码算法

解码算法的硬件实现框图和图4相似，不同的是控制器的功能。由于图像矢量长度和元胞自动机运算次数的编码恒定长度不一样，便于识别图像矢量；对二值图像矢量直接输出并判断，如果需要元胞自动机变换生成下一个相邻矢量，将该二值图像矢量输入元胞自动机，对其进行n次CA变换，然后输出矢量，得到对应的二值图像矢量；由此类推得到整个图像矢量。

6 实验

由于CA规则空间大，图像的数据量大，遗传规划算法复杂度高，收敛速度慢；为提高算法速度，采用二值图像进行训练，用GP算法搜索较优的CA规则，用不同大小的图像测试该规则的鲁棒性。本文算法对图8作为样本进行训练；用图9、图10、图11不同大小的二值图像作为测试图像，测试CA规则的鲁棒性、适应性。采用的CA邻居半径为2。由于该CA规则易于表达，采用完全法随机生成CA规则构成初始群体，使所有个体达到最大长度 2^5 ；交叉概率为0.8，变异概率0.2，本文算法的压缩效率有两种变量决定：(1)规定的元胞自动机循环变换的最大次数N；(2)在小于N的循环次数内，找到匹配的目标矢量数与整个二值图像矢量个数的比值。经过多次实验，对于二值图像，最大CA变换次数N=4时，压缩效果最好，即本文算法编解码复杂度为O(4)，用2bit记录元胞自动机变换次数。个体适应度评价采用元胞自动机输出的矢量占图像矢量匹配个数的百分率，百分率越高，种群个体适应度越高。

压缩效率是二值图像压缩编码方法优劣的重要衡量指标；同样压缩质量条件下，压缩效率越高，算法越好。假设原图像大小为A，压缩后的图像大小为B，则图像压缩效率R的定义为：

$$R = \frac{A-B}{A} \times 100\% \quad (3)$$

7 结果与分析

本文算法压缩效率及较优元胞自动机规则实验结果如下：表2是单规则无损压缩算法对样本图、测试

图的压缩效果。表 3 是单规则有损压缩算法, 在噪声小于 25%条件下, 对样本图、测试图的压缩结果。表 4 是多规则有损压缩算法, 在噪声小于 25%条件下, 对样本图、测试图的压缩结果。表 5 是单规则有损压缩算法, 对不同矢量长度, 不同的噪声控制系数条件下, 样本图的压缩结果; 该实验表明: 对于最大 4 层元胞自动机变换的二值图像压缩方法, 分块大小 4×4 是最优分块。图 12、图 13 分别是样本图 3 和测试图 7 获得最大压缩效率的解压效果图, 即最优规则是表 3 中的 CA 规则, 从客观评价标准上看, 图中有些连续的线变成了点划线, 但不影响视觉效果。以上数据表明: 本文算法在主观评价和客观评价都获得了很好的效果。

同时, 用本文算法与最适合二值图像的编码方法——行程编码进行压缩效率对比; 行程编码采用压缩算法如下: 对连续的 0、1 交替编码方法, 若连续的 1 超过最大行程, 则对下一行程编码为 0, 之后继续对其编码。用图 8 作为训练样本, 图 9、图 10、图 11 作为测试样本测试行程算法的适应性。用统计方法得出行程编码的最佳编码长度是 6, 即最长行程是 64。试验表明: 行程编码方法对特定的图像数据有较好的压缩效果; 而对内容丰富的测试图像, 本文算法的适应性, 压缩效率的稳定性更有优势; 同时本文算法与行程编码一样具有与其它压缩编码方法可以结合使用的优点, 以达到较好的压缩效果; 在数据传输过程中, 行程编码中任何一位发生错误, 后面的所有数据都将受到影响; 本文算法中, 原图像矢量嵌入传输数据中, 对于传输错误也限制是局部性的干扰, 具有较强的抗干扰性;

本文算法的优点总结如下: (1)基于一维 CA 模型, 结构简单; (2)并行性特点使其具有速度快, 算法时间空间复杂性低; (3)压缩率和失真大小平衡方面便于控制; (4)具有 VQ 的编解码优势, 但无需码本训练过程, 克服了 VQ 算法的缺点; (5)CA 规则对不同的二值图像鲁棒性比较好, 具有较强的灵活性和自适应性的特点; (6)较优的元胞规则比较多,

不同的规则输出的码本不同, 对输出数据具有很强的加密效果。

图 8 样本图 128×128 图 9 测试图 128×128 图 10 测试图 256×256 图 11 测试图 512×512

表 2 单规则无损压缩图像压缩效率

图像大小	压缩效率	CA 规则
128×128 图 8	0.5725	0xFAF8 D0C0
128×128 图 9	0.5195	0xFAF8 D0C0
256×256 图 10	0.6507	0xFAF8 D0C0
512×512 图 11	0.5841	0xFAF8 D0C0

表 3 单规则有损压缩图像压缩效率

图像大小	压缩效率	CA 规则
128×128 图 8	0.7639	0xE40A 8900
128×128 图 9	0.7058	0xE40A 8900
256×256 图 10	0.7757	0xE40A 8900
512×512 图 11	0.7222	0xE40A 8900

图 12 样本图解压图
效果图图 13 测试图 11 解压
效果图

表4 多规则有损压缩图像压缩效率

图像大小	压缩效率	CA 规则
128×128 图8	0.6161	0xDB5445B00F32D47013F
128×128 图9	0.4247	897F51C49243181890236
256×256 图10	0.5567	03C71E938E27EF554905FE 3D243B143D257D92672F 74376518BC2BB806CE8D1
512×512 图11	0.5331	B935B2C622ECC15B47498 2A63

表5 单规则有损压缩不同图像矢量、噪声系数的压缩效率

图像大小	压缩效率	CA 规则	噪声控制系数	分块大小
128×128 图8	0.4995	0x0436355F	<1/16	8×8
128×128 图8	0.6925	0xF8B68014	<1/4	8×8
128×128 图11	0.6927	0xF8B68014	<1/4	8×8
256×256 图8	0.3101	0x06013A00	<1/16	16×16
512×512 图9	0.6511	0x00630611	<1/4	16×16

表6 不同无损压缩算法压缩效率对比列表

图像大小	CA 单规则	行程编码
128×128 图8	0.5725	0.6323
128×128 图9	0.5195	0.3225
256×256 图10	0.6507	0.6689
512×512 图11	0.5841	0.4909

8 结束语

本文算法的进一步工作有：多次实验数据结果是单规则元胞自动机算法在无损和有损二值图像压缩效果都比较好，多规则元胞自动机规则空间巨大，GP 算法未搜索到较优的多规则；对该算法搜索元胞自动机规则空间的研究仍需进一步的工作。

随着并行计算的发展，元胞自动机的硬件实现指日可待，因此，该领域具有巨大的研究和发展的潜力。

参考文献

- 1 杨丽芳,廖宏,黄孜祺,罗维.一种基于符号的二值图像压缩算法.广西计算机学会 2008 年年会论文集.广西南宁:计算机学会. 2008: 1-2.
- 2 Sipper M. Evolution of Parallel Cellular Machines: The Cellular Programming Approach. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1997:2-14.
- 3 吴家安.数据压缩技术及应用.北京:科学出版社, 2009:91-92.
- 4 Lafe O. Data Compression and Encryption Using Cellular Automata Transforms, IJSSIS. IEEE International Joint Symposia on Intelligence and Systems: Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 1996:234-241.
- 5 Maji P, Chaudhuri P. Non-uniform Cellular Automata Based Associative Memory: Evolutionary Design and Basins of Attraction. Information Sciences, 2008,178-(10):2315-2336.
- 6 Ganguly N, Maji P, Dhar S, Sikdar BK, Chaudhuri PP. Evolving Cellular Automata as Pattern Classifier. Proc of the 5th International Conference on Cellular Auto-mata for Research and Industry. London, UK: Springer-Verlag, 2002:56-68.