

基于演化硬件的交通流模型自适应优化

聂鑫 李元香 王珑 柳林

(武汉大学软件工程国家重点实验室 武汉 430072)

摘要 BML 模型是用于研究城市路网结构中交通流特征的细胞自动机模型。基于软件的模拟及演化优化方式存在着运算效率低、优化速度慢等缺陷,极大地限制了交通流模型的实时应用能力。针对这一问题,提出将演化硬件与细胞自动机相结合,实现交通流模型的在线演化。同时对 BML 模型进行了改进,以便能够依据现实车流状况进行交通灯信号的自适应调节。实验结果表明,将演化硬件技术用于交通流模型的自适应优化,对于研制智能交通系统是一种可行的途径。

关键词 细胞自动机, BML 模型, 演化硬件, 软硬件协同演化, 智能交通系统

Self-adaptive Optimization for Traffic Flow Model Based on Evolvable Hardware

NIE Xin LI Yuan-xiang WANG Long LIU Lin

(State Key Laboratory of Software Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract BML model is a kind of cellular automata model used to simulate and analyze the traffic system in the road network structure. The simulation and evolutionary optimization of the model implemented by software are optimized slowly and very low efficiently, so that it limits the ability enormously of traffic flow model to be used in some high real-time and high-speed occasion. In view of this question, we presented the architecture of an EHW-based cellular automata model, a cellular automata model implemented in evolvable hardware platform and intended for the on-line evolution of the traffic flow model. And then it can adjust the rule of the traffic light signal according to the real-time state of traffic flow. After a careful analysis of the comparison result, the self-adaptive optimization for traffic flow model based on evolvable hardware was proved to be very useful and can meet the needs in the research and design of intelligent traffic system.

Keywords Cellular automata, BML, Evolvable hardware, Software and hardware co-evolution, Intelligent traffic system

1 引言

随着人们生活水平的不断提高,交通问题已经成为制约城市经济发展的瓶颈之一,其主要表现在交通基础设施的落后和对现有交通资源缺乏行之有效的管理手段两个方面。而要想以科学理论来指导和规范化交通控制与管理,就需要对道路交通流的特性及机理有比较详尽的认识。

目前,细胞自动机(Cellular Automata, CA)模型^[1]是被广泛应用于研究道路交通流理论的交通流模型之一。其中,由 Biham, Middleton 和 Levine 提出的二维交通流理想模型(BML 模型)^[2]已成为研究城市路网结构中交通流特性的重要基础。在 BML 模型之上, Nagatani^[3]研究了车辆的非对称分布情况, Fukui 等人^[4]则研究了车辆非匀速行驶的状况。此外,人们还提出了一些其它改进策略来模拟更为切合实际的交通行为。

演化算法(Evolutionary Algorithms, EA)^[5]近年来已成为工程优化和计算机智能研究的一个热点。文献[6, 7]等将演化算法用于优化交通流模型,分析与预测城市交通流控制。

然而,基于软件的交通流模拟与演化优化方式普遍效率低下,极大地限制了交通流模型的实时应用能力。这主要是因为其对细胞群体的演化采用的是串行处理方式,这样会在演化算法的适应值评价阶段消耗大量的时间。

本文正是从细胞自动机模型的内在并行性角度出发,研究了基于演化硬件(Evolvable Hardware, EHW)^[6]的交通流模型自适应优化。利用现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)^[9]极大地提高了细胞自动机的演化效率,并在演化硬件平台上将 BML 模型表示成自适应、可重构的硬件电路模块,通过软硬件协同演化^[10]目标电路的配置串,实现了 BML 模型的在线演化。同时对该模型进行了改进,通过实现交通灯信号依据实时车流状况进行自适应调节,表明了将其用于智能交通控制领域^[11]的可行性。

2 BML 模型的并行演化

2.1 BML 模型

城市交通网络一般都是纵横交错,有很多的交叉路口,形成一定的路网结构,因此二维即适用于路网的 CA 模型也就

到稿日期:2010-06-01 返修日期:2010-08-27 本文受国家“863”高技术研究发展计划基金项目(2007AA01Z290)资助。

聂鑫(1983-),男,博士生,主要研究方向为演化算法、演化硬件, E-mail: nix83@163.com; 李元香(1962-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为演化算法、并行计算。

随之产生。1992年 Biham, Middleton 和 Levine 在细胞自动机理论框架下,提出了一个二维的城市交通流模型(BML模型)。在 BML 模型中,用一个 $N \times N$ 的二维方形格点矩阵来表示城市交通网络, N 是方形点阵的边长。每一格点具有 3 种状态,用 $S_{i,j} = \{0, 1, 2\}$ 来表示。其中 2 表示第 i 行 j 列格点上有一辆由北向南行驶的车辆; 1 表示该格点有一辆由西向东行驶的车辆; 0 表示该格点没有车辆。规定在每一个奇数时间步,东西向的车辆向前行驶一个格点。在每一个偶数时间步,南北向的车辆向前行驶一个格点,如果某车辆前面的格点被其它车辆所占据,即使阻挡车辆在时刻向前运动让出了空间,该车辆也只能保持静止不动,即不能跟驰。

通常采用的对细胞自动机演化过程的软件模拟^[12]方式,是对整个格点矩阵逐行细胞、逐个细胞地扫描,然后计算出下一代细胞群体的状态值。这种串行执行的方式,不能充分利用细胞自动机内在的并行演化特性,制约了群体细胞演化的速率。在一些实时、高速的应用场合,应使用并行计算的方式来演化细胞自动机。

2.2 基于 FPGA 的 BML 模型实现

BML 模型规定细胞格点按照等长的奇偶时间步,分别在横向和纵向进行演化,每个细胞取 3 个状态 $\{0, 1, 2\}$, 邻居半径为 1。因此可以定义该二维细胞自动机的演化规则如下:

(1) 东西向行车 Rule_{we}:

若 $S_i = 2$, 则 $S_i^{+1} = 2$

若 $S_i = 1$, 则 $S_i^{+1} = \begin{cases} 0, & S_{i+1} = 0 \\ 1, & S_{i+1} \neq 0 \end{cases}$

若 $S_i = 0$, 则 $S_i^{+1} = \begin{cases} 0, & S_{i-1} \neq 1 \\ 1, & S_{i-1} = 1 \end{cases}$

(2) 南北向行车 Rule_{ns}:

若 $S_i = 1$, 则 $S_i^{+1} = 1$

若 $S_i = 0$, 则 $S_i^{+1} = \begin{cases} 0, & S_{i-1} \neq 2 \\ 2, & S_{i-1} = 2 \end{cases}$

若 $S_i = 2$, 则 $S_i^{+1} = \begin{cases} 0, & S_{i+1} = 0 \\ 2, & S_{i+1} \neq 0 \end{cases}$

需要注意的是,对于南北向行车 Rule_{ns}, 细胞的邻居的状态 S_{i+1} 和 S_{i-1} 应该按照二维格点矩阵的纵向来选取。

根据以上定义的演化规则,对于某一个细胞单元,可设计一个三输入、一输出的硬件功能模块,输入值为细胞及其左右邻居的当前状态,输出值为该细胞下一时刻的状态。由于在奇数和偶数时间步,单个细胞采用的演化规则不一样,应分别满足式(1)和式(2),因此需要将这两种规则分别写成两个模块。当细胞自动机开始演化后,这两个模块将在等长分配的时钟周期内被轮流调用。

由于细胞自动机在演化过程中群体细胞在同一时刻采用相同的演化规则,因此可以设计行处理模块,并行处理每一行的每个细胞(当采用 Rule_{ns} 时,即为每一列细胞)。同理,行与行(列与列)之间也同样是并行演化的,所以我们在上层再次封装行(列)处理模块。这样,一个二维细胞自动机中的细胞群体,就能够在 FPGA 里实现每个细胞状态的并行演化,如图 1 所示。

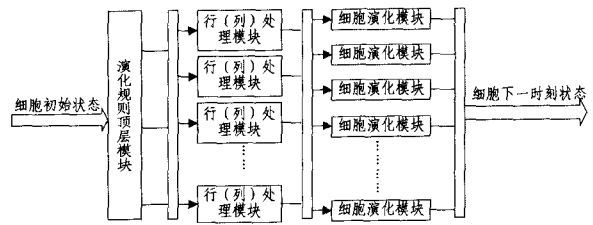


图 1 细胞自动机在硬件上的并行演化

2.3 实验结果与分析

我们采用 Xilinx 公司的 Virtex-II Pro 系列^[13]的开发版、内含 XC2VP30-6ff896 型号的 FPGA 芯片和 ISE9.1i 集成开发环境实现 BML 模型的并行演化。采用 Verilog HDL 语言^[14]编写硬件功能模块。细胞群体的初始状态由外部信号输入。在逻辑上,细胞群体排列成一个二维矩阵。而在实现上,将这个格点矩阵按行用一个一维的向量来表示,每个格点具有 3 种状态。这样,设定一个 20×20 的细胞矩阵进行演化,需要用到一个 800bit 的寄存器变量来表示细胞群体。输入细胞的初始状态后,顶层模块将会按照奇偶时间步,将细胞向量分解,提取出该时刻的所有单个细胞及其邻居,传递给底层模块,实现全体细胞的并行演化。

以下是对 20×20 的道路交叉网络进行模拟。通过代码输入、综合、布局布线之后,得到的系统资源使用情况如表 1 所列。

表 1 FPGA 系统资源使用情况

资源	占用数目	可用数目	比例
Slice Flip Flops	776	27,392	2%
4 input LUTs	2288	27,392	8%
occupied Slices	1183	13,696	8%
bonded IOBs	364	556	65%
GCLKs	1	16	6%

使用 Java 语言对相同条件下的细胞自动机模型进行了软件模拟。对于 20×20 的细胞格点矩阵,统计出细胞自动机在软件和硬件平台上实现的性能差异,得出表 2 所列的统计结果。

表 2 20×20 细胞种群演化耗时

资源	所用时间	演化代数
软件	94ms	1000
硬件	0.062ms	1000

由以上结果可知,使用硬件并行实现的细胞自动机演化过程比软件实现方式要快得多,这是一种切实可行的提高细胞自动机演化效率的方法。在使用演化算法对细胞自动机的演化规则进行优化的过程中,对个体进行适应值评价所耗费的时间将会大大缩短。因此,将交通流模型构建于演化硬件平台之上,对于加速模型的自适应优化及增强实时应用能力是一种有效的方法。

3 基于演化硬件的自适应优化

3.1 对 BML 模型的改进

BML 模型问世后引起了广泛的注意。改进和扩充 BML 模型,把各种交通因素合理地容纳进去,使细胞自动机交通模型更接近于城市交通的实际情况,是当前努力的方向^[15]。

在经典 BML 模型中,所有的格点从其交通功能来看实

实际上都相当于路口,每个路口都有红绿灯。某一时刻所有的交通灯都为南北向行驶的车辆开绿灯,然后以同一节奏变换红绿灯。这种等时长变换的红绿灯信号很难满足现实的需要。例如,在某些主干道上行驶的车流明显多于在其垂直方向的小街道上行驶的车流,或者可以将其垂直方向看作是人行横道。这样,这种等时长的信号灯设置,可能会造成某一方向上车流前进缓慢甚至拥堵,而另一方向上车流稀疏或行人稀少,从而不能充分利用城市交通资源,增大交通通行量。

因此,在对 BML 模型的改进中,做出了如下调整:

- ① 将细胞的边界条件设为固定边界,值为 0;
- ② 通过一个配置串,动态调节演化规则 Rule_we 和 Rule_ns 的调用顺序。

这样改进的前提,是假设所有位于给定道路交叉网络边缘部分的车辆都能顺利离开,且不再有新的车辆进入该网络区域。这种理想状况的假设,目的是消除原有模型对于红绿灯采用等时长分配的策略,同时考察当交通灯信号采用动态调节时对于密集车流尽快疏散所起到的作用。

这种动态调节方式是通过一个可重构电路配置串来实现的。该配置串下载到 FPGA 后,能够决定 Rule_we 和 Rule_ns 两个硬件功能模块的调用方式,从而实现交通流模型的红绿灯信号分配。在演化硬件平台上,通过演化出某一个最优配置串,给出最优的红绿灯信号时间配置,使得当前区域内、某时刻的所有车辆能在最短时间内离开该区域,这样等价于起到平衡各方向车流的利益,乃至缓解交通拥堵的作用。

3.2 软硬件协同演化策略

我们采用遗传算法来优化交通流模型。遗传算法是模拟达尔文的遗传选择和自然淘汰的生物进化过程的计算模型,是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法。算法从任意初始化群体出发,通过选择、交叉和变异操作,在群体中一代一代地进入到搜索空间中越来越好的区域,直至抵达最优解点,其本质是一种求解问题的高效并行搜索方法。

在遗传算法求解的过程中,适应值计算通常被认为是最耗时的部分,于是我们将这一部分在硬件上实现。配置串种群的生成和遗传操作部分使用软件方式实现。所以,整个算法优化过程使用了软硬件协同演化的设计思想。种群中的每一个染色体,都被下载到硬件上,计算其适应值,然后反馈给软件部分进行遗传操作,直至满足搜索条件,找到最优的染色体。这个染色体就代表了在当前道路车流状况下最优的红绿灯信号配时策略。

算法实现的步骤如下:

- ① 随机生成配置串种群;
- ② 将配置串下载到 FPGA,连同已经做好的 Rule_we 和 Rule_ns 演化规则模块,生成电路;
- ③ 输入细胞种群的初始状态;
- ④ 计算此配置串的适应值,并返回结果。继续评价这一代种群中的下一个个体;
- ⑤ 当种群中的个体全部评价完毕后,通过一系列的遗传操作,生成新一代配置串种群,然后再执行第②步,直至满足遗传代数,找到最优解。

遗传算法的目的是找到最优的红绿灯信号时间配置,使当前状态下的所有车辆能尽快全部离开。这里,不考虑某一

辆车离开该路段的时间长短,而考虑全体车辆。也就是说,使得细胞格点矩阵的状态全部演化为 0 的时间越短越好,所以定义适应值评价函数 F :

$$S_i^{t+1} = f(S_i^t, S_N^t) = 0 \quad (3)$$

式中, f 为细胞自动机的演化规则, S_N^t 表示 t 时刻 i 细胞的邻居细胞状态,求使得对于所有的 $1 \leq i \leq N \times N$, 上式成立的 t , 即该配置串的适应值。且取种群中 t 值最小的个体,即当前最优配置串。

4 实验结果与分析

4.1 模型的在线演化

我们仍然采用上述实验的开发板来实现交通流模型的在线演化。在这块 FPGA 芯片中,集成了 IBM PowerPC405 型号的处理器的。因此,我们基于软硬件协同演化的策略来演化改进后的 BML 模型。首先将交通流的行车规则,即细胞自动机的演化规则 Rule_we 和 Rule_ns 表示成硬件电路模块,并且将其与存有配置串的寄存器一同封装于上层模块并写入 FPGA 芯片中。随后,在 PowerPC 处理器上完成系统的初始化工作,根据前述设定好的系统优化算法,找出最优的配置串。

整个交通流模型的自适应优化系统结构如图 2 所示。

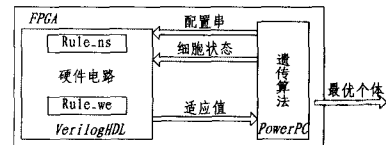


图 2 交通流模型的软硬件协同演化

该优化算法的遗传操作部分的设定参数如表 3 所列。

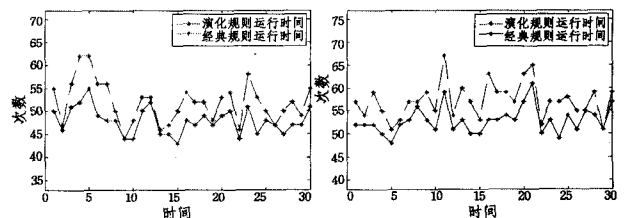
表 3 算法采用的参数设置

种群规模	杂交概率	变异概率	遗传代数	基因长度
20	0.3	0.1	100	4×32

其中,考虑到模拟的是 20×20 的道路交通网络,我们将配置串的大小设定为 4 个 32 位长度的整形变量,其长度为 128 位。即我们对每一个配置串个体的评价,只根据细胞自动机演化 128 代后的结果做出判断。如果此时仍不能满足式 (3), 则取 $t=128$, 该个体的适应值认为是最差的。

4.2 结果与分析

分别把模型中的车流密度设定为 0.3 和 0.4 来进行数值试验。车流的初始分布由系统随机产生。为了模拟主干道与次干道之间的区别,将东西方向与南北方向的车流量之比分别设定为 2:1 和 3:1。对于每一种情况,均实验 30 次,获得的交通流模型优化结果如图 3、图 4 所示。



(a) 车辆比位 2:1

(b) 车辆比位 3:1

图 3 车辆密度为 0.3 时

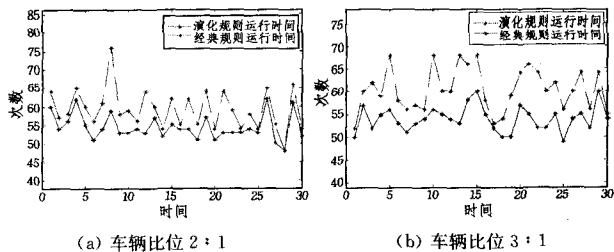


图4 车辆密度为0.4时

图中,虚线条表示的是在经典 BML 模型中红绿灯信号等时长分配的条件下某区域车辆全部驶离该地区所花费的时间;实线条表示的是经过自适应优化之后某区域车辆全部驶离该地区所花费的时间。从实验取得的结果来看,当路段内各方向的车流量不均匀或某一方向为行人道时,通过对交通灯信号的动态调节,能够使得该区域内的交通做到更快速度的流动。

此外,也可以观察到存在某些特殊的点,对它的优化效果并不明显。这说明,存在某一车辆的初始分布,在这种分布情况下,任何的红绿灯配时策略,都无法明显改善该区域的车流通行效率。对于这一种极易造成车辆行进缓慢乃至可能发生拥堵的车辆分布状况,其机理有待进一步研究。

4.3 进一步的探讨

通过以上对 BML 模型的改进及在线演化的实现,可以根据实时车流状况,找出合适的信号灯配时策略,灵活调整各个方向红绿灯的时长。实验结果表明其能够有效地起到对主次交错的路网结构内车辆充分调度的作用。然而,虽然消除了十字路口处对红绿灯的严格等时长配置,但是对某一方向上的最长连续红绿灯信号配时并没有进行约束,这就有可能使得某一方向上车流通性时间过长,而导致另一方向长时间等待;另外,在实际交通情况下某一地区道路网络内,在同一方向上的交通灯也不可能完全同步。因此,对于 BML 模型关于交通信号灯的时间分配策略,仍然可以提出进一步的改进。一种可行的方式是,将 BML 模型中的道路交通网络划分成若干个不同的子区域,在每一子区域内,采用本文所述的信号灯分配策略,即可以在某段道路同一方向上实行同步控制;而不同子区域之间,可以分别实行不同的信号分配。这样,车辆在经过城市中不同交通特性的路段网络区域时,都可以在相对较优的信号灯配时下行驶,充分发挥交通流模型自适应优化对城市交通的管理和指导作用。

结束语 本文以 BML 模型的基本原理为基础,对基于演化硬件的交通流模型自适应优化及其在实时智能交通系统中的应用进行了研究。通过将细胞自动机的演化规则在 FPGA 上并行实现,极大地提高了在进行演化优化时交通流模型适应值评价的速度。随后,提出了一种对该模型的改进策

略,用于研究交通信号灯对城市交通流的影响,并结合演化硬件平台,将改进后的交通流模型表示成自适应、可重构的硬件电路结构,采用软硬件协同演化策略,对交通流模型进行在线演化,进而实现了交通灯信号在不同车流状况下的自适应调节。实验结果表明,基于演化硬件的交通流模型自适应优化方法在研制智能交通系统领域拥有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] Wolfram S. A New Kind of Science [M]. Champaign Illinois: Wolfram Media, 2002
- [2] Biham O, Middleton A A, Levine D A. Self-organization and a dynamical transition in traffic-flow models[J]. Phys. Rev, 1992, A 46:R6124-R6127
- [3] Nagatani T. Anisotropic Effect on Jamming Transition in Traffic-flow Model[J]. Phys. Soc. Japan, 1993, 62:2656-2662
- [4] Fukui, Oikawa H, Ishibashi Y. Flow of Cars Crossing with Unequal Velocities in a Two-Dimensional Cellular Automaton Model[J]. Phys. Soc. Japan, 1996, 65:2514-2517
- [5] 潘正君,康立山,陈毓屏. 演化计算[M]. 北京:清华大学出版社, 1998
- [6] Guan Haishuang, et al. Traffic flow prediction based on hierarchical genetic optimized algorithm[C]//3rd International Conference on Innovative Computing Information and Control (ICICIC'08), 2008
- [7] Song Yue-cong, Hu Wei, et al. Combined prediction research of city traffic flow based on genetic algorithm[C]//8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments (ICEMI), 2007:3862-3865
- [8] Timothy G, Gordon W, et al. On Evolvable Hardware[M]. Soft Computing in Industrial Electronics. Germany: Heidelberg, Physica-Verlag, 279-323
- [9] 潘松,黄继业. EDA 技术实用教程[M]. 北京:北京科学出版社, 2002
- [10] 焦李成,刘静. 协同进化计算与多智能体系统[M]. 北京:科学出版社, 2006
- [11] 陆化普,李瑞敏,朱茵. 智能交通系统概论[M]. 北京:中国铁道出版社, 2004
- [12] 吴秀华,孙国凯. 基于 BML 模型的二维交通流系统的模拟分析[J]. 计算机工程与设计, 2006, 27(21), 4139-4141
- [13] Xilinx Inc. Virtex-II Pro and Virtex-II Pro X FPGA User Guide [S]. 2007
- [14] 王金明,杨吉斌. 数字系统设计与 Verilog HDL[M]. 北京:北京电子工业出版社, 2002
- [15] 贾斌,高自友. 基于元胞自动机的交通系统的建模与模拟[M]. 北京:科学出版社, 2007