

时延 Petri 网分布式模拟的先行值研究^{*}

方贤文¹ 吴哲辉² 刘士喜¹

(安徽理工大学数理系 淮南 232001)¹ (山东科技大学信息学院 青岛 266510)²

摘 要 先行值计算是提高时延 Petri 网并行模拟性能的一个好的方法。给出了时延 Petri 网的先行值计算的四种基本结构,对于存在循环的复杂的 Petri 网结构给出了预测图算法,通过预测图,能够很容易求出静态和动态先行值,在并行模拟中利用先行值可以分析出存在并发和阻塞的结构,从而为网分块在并行机的结点上运行奠定了基础。

关键词 先行,时延 Petri 网,分布式模拟,逻辑进程

The Lookahead Study in Distributed Simulation of Timed Petri Nets

FANG Xian-Wen¹ WU Zhe-Hui² LIU Shi-Xi¹

(Maths and Physics Department, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001)¹

(School of Information, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510)²

Abstract Lookahead computation is a good method that improves the distributed simulation performance of timed Petri nets. In the paper, we give four basic architectures about the lookahead computation of time Petri nets, also obtain the algorithm of prediction graph to having cyclic and complex Petri nets architecture. By prediction graph, static and dynamic lookahead can be computed easily. In distributed simulation, we can use lookahead to analyze the architecture having concurrency and blocking, which is foundation on net partitioning for running in parallel nodes.

Keywords Lookahead, Timed Petri nets, Distributed simulation, Logical process

对于分析大的物理系统的时间 Petri 网模型,采用串行离散事件模拟已显得不足了。目前主要采用并行或分布式模拟机制以及相应的软件工具使这些模型并发执行,这样问题就会便于解决。在分布式模拟方法中,引入了与时间相关的空间分解技术及子模型的异步并行执行。在这里子模型也称逻辑进程 LP(Logical Process)。Petri 网的逻辑进程模拟已经发展了两类协议,保守协议和乐观协议。在时间 Petri 网模型中,每个事件都与时间相关联,保守协议在逻辑进程执行时,每个逻辑进程都以时间的先后顺序运行,绝不允许违背时间的先后关系。在基本的保守分布式模拟中,如果事件的每个输入缓冲区包含至少一个事件信息,那么逻辑进程执行带有最小时间标记的事件;如果一个或多个输入缓冲区中是空的,这时可能有一个事件其时间标记小于正在等待事件的时间标记,将到达缓冲区,则逻辑进程会被阻塞。在乐观分布式模拟(也称 Time Warp)中,为了以时间顺序接收所有输入事件,且逻辑进程不阻塞,采用的方法是使逻辑进程不接收其时间标记小于最近一次被处理的事件的时间标记的事件。如果发生这种情况(即接收了事件其时间标记小于最近一次被处理事件的时间标记),这个处理过程必须被撤消到最后正确的状态,因此这种方法需要大量的额外内存来保存一个过程的状态。对于内存管理,保守算法需要很少的内存及更简单的要求,但在保守协议中,逻辑进程的阻塞会影响模拟性能,产生阻塞的原因是空信息的发送及产生循环链接。在文[8]中已给出了死锁检测和恢复机制,这样我们可以用这个机制来验证死锁是否发生,为了减少空信息数,可将预测结果与必须发送的源信息的时间联系起来,给每个输出的信息一个时间预

测值(即先行值),基于此值,下一个信息将被送到相同的信道,如果具有最小先行值的信道是空的,则一个进程开始进行死锁检测,这种方法能够检测出存在有循环和阻塞等待彼此发送信息的死锁情况。先行是分布式模拟时间管理协议中的一个重要概念,各模拟实体使用先行把自己产生事件的时间标记情况更早地通知给其它实体,以加快程序的运行。HLA(高层体系结构)标准中对先行作用的说明是:“保证联邦中的所有成员,都不会产生时间标记小于当前邦元时间加上先行值的事件”。在文[6]中,Chiola 和 Fescha 提出了基于简单变迁链的时间变迁 Petri 网的先行值研究,它通过静态计算网中两点之间的最短路、结果矩阵及当前标识来作预测。这种方法只适合一些特别的情况。在文[7]中, A. Nketsa 和 N. B. Khalifa 给出了基于时间库所 Petri 网的先行值预测,这种预测仅包括串行、同步、冲突三种基本结构形式。在一般的模拟中,事件总是与变迁相联系的,我们在本文中讨论了基于时延变迁 Petri 网的先行值问题。

1 基本概念

在这里我们仅给出几个与本文密切相关的概念,其它 Petri 网术语可参见文[1~3]。

定义 1^[1,2] 满足下列条件的三元组 $N=(P, T; F)$ 称为一个网

- 1) $P \cup T \neq \emptyset$
- 2) $P \cap T = \emptyset$
- 3) $F \subseteq ((P \times T) \cup (T \times P))$
- 4) $dom(F) \cup cod(F) = P \cup T$

^{*} 国家自然科学基金资助项目(60173053),安徽理工大学青年基金资助项目(2004020)。方贤文 硕士,讲师,研究方向为并行算法;吴哲辉教授,博导,主要从事 Petri 网、算法设计与分析等方面的研究;刘士喜 硕士研究生,研究方向为 Petri 网,最优化算法。

其中: $dom(F) = \{x \in P \cup T \mid \exists y \in P \cup T, (x, y) \in F\}$

$cod(F) = \{x \in P \cup T \mid \exists y \in P \cup T, (y, x) \in F\}$

P 和 T 称为网 N 的基本元素集, P 的元素称为 P -元或库所, T 的元素称为 T -元或变迁, F 是网 N 的流关系。

定义 2^[1,2] 设 $N = (P, T; F)$ 为一个网, 对 $x \in P \cup T$, 记 $\cdot x = \{y \mid y \in P \cup T \wedge (y, x) \in F\}$

$x \cdot = \{y \mid y \in P \cup T \wedge (x, y) \in F\}$

称 $\cdot x$ 为 x 的前集或输入集, $x \cdot$ 为 x 的后集或输出集。

定义 3^[1,2] 六元组 $\Sigma = (P, T; F, K, W, M)$ 称为一个库所/变迁系统, 其中

1) $(P, T; F)$ 是一个网;

$K: P \rightarrow N_0$ (N_0 是自然数集合) 称为容量函数;

$W: F \rightarrow N_0 - \{0\}$ 称为权函数;

$M: P \rightarrow N_0$ 是 Σ 的一个标识, 满足条件

$\forall p \in P: M(p) \leq K(p)$

2) Σ 满足下面变迁发生规则:

a) 对 $t \in T, M[t >]$ (表示变迁 t 可发生) 的条件为

$\forall p \in \cdot t: M(p) \geq W(p, t)$

$\forall p \in t \cdot: M(p) + W(t, p) \leq K(p)$

$\forall p \in t \cdot \cap \cdot t: M(p) + W(t, p) - W(p, t) \leq K(p)$

b) 若 $M[t > M']$, 则对 $\forall p \in P$:

$$M'(p) = \begin{cases} M(p) - W(p, t) & \text{当 } p \in \cdot t - t \cdot \\ M(p) + W(t, p) & \text{当 } p \in t \cdot - \cdot t \\ M(p) - W(p, t) + W(t, p) & \text{当 } p \in \cdot t \cap t \cdot \\ M(p) & \text{当 } p \notin \cdot t \cup t \cdot \end{cases}$$

定义 4 前集为空的库所为源库所, 后集为空的库所为结束库所。

定义 5^[3] 时延变迁 Petri 网是一个六元组: $TTPN = (P, T, F; \tau, W, M)$, 其中:

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ ($n \geq 0$) 是一个库所的有限集合。

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ ($m \geq 0$) 为变迁的有限集合, 且 $P \cap T = \emptyset$ 。

$F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 为一个有向弧集合。

τ : 是时间映射函数 $\tau: T \rightarrow 0 \cup Q^+$ (Q^+ 为正有理数)。规定网中每个变迁发生的持续时间。当持续时间为 0 时, 称之为瞬时变迁, 持续时间不为 0 时称之为时延变迁。

$W: F \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$ 称为权函数。

$M: P \rightarrow I$, 是网系统的标识, $I = \{0, 1, 2, \dots\}$, M_0 是初始标识。

我们定义的时延变迁 Petri 网, 变迁的发生是实时的, 也就是说, 当变迁具有发生权时, 变迁立即发生, 这时变迁输入库所中的托肯(token)没有被取出, 当变迁发生 τ 段时间后变迁发生完毕, 托肯从输入库所中取出并存入输出库所。

定义 6 时延变迁 Petri 网 $TTPN = (P, T, F, \tau, W, M)$ 的变迁发生规则:

1) 对 $t \in T$, 若 $\forall p \in \cdot t: M(p) \geq W(p, t)$, 称 M 使能(enable)变迁 t 发生, 记为 $M[t >]$ (当 $\cdot t = \emptyset$ 时, t 在任意标识下都有发生权)。

2) 若标识 M 使能 t 发生, 则 p 中的托肯被移出, 变迁 t 在 M 下可以发生(fire)持续 τ 段时间后变迁发生完毕, $W(p, t)$ 个托肯被存入输出库所, 从 M 发生 t 得到新的标识 M' (记作 $M[t > M']$), 对 $\forall p \in P$:

$$M'(p) = \begin{cases} M(p) - W(p, t) & \text{当 } p \in \cdot t - t \cdot \\ M(p) + W(t, p) & \text{当 } p \in t \cdot - \cdot t \\ M(p) - W(p, t) + W(t, p) & \text{当 } p \in \cdot t \cap t \cdot \\ M(p) & \text{当 } p \notin \cdot t \cup t \cdot \end{cases}$$

2 并行模拟中逻辑进程先行值研究

在不同分布式模拟环境和不同协议中, 先行的概念意义略有差别。在保守分布式模拟协议中, 逻辑进程的事件处理模型采用单队列单服务方式, 这种情况下逻辑进程之间所传送的事件的时间标记采用了三个时间量(如图 1): t_{cause} : 实体最初知晓要发送事件的时刻, 可以认为是源事件的时间标记; t_{commit} : 事件可以提交发送的时刻, 源事件被处理完毕的时刻; t_{effect} : 可作为被发送事件时间标记的有效时刻, 可以认为是被发送事件的时间标记。

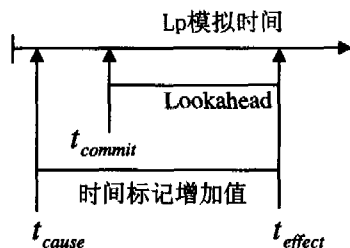


图 1 Lookahead(先行值)的表示

这样对先行值(Lookahead)的定义采用 $\text{Min}\{t_{effect} - t_{commit}\}$, 它表示模拟过程中时间标记增量的最小值。

定义 7 设 t_{commit} 表示事件可以提交发送的时刻, t_{effect} 表示被发送事件到达的有效时刻, $La = \text{Min}\{t_{effect} - t_{commit}\}$, 表示模拟过程中时间标记增量的最小值, 则称 La 为先行值。

定义 8 前集为空的库所为源库所, 后集为空的库所为结束库所。

在时延 Petri 网描述的系统, 消息的发送是根据托肯(Token)移动来实现的, 在我们分析的 Petri 网结构中, 有些 Petri 网结构有确定的初始标识, 有些则没有, 相应地, 先行值包括无初始标识先行值和有确定初始标识先行值, 无初始标识先行值被定义为从结束库所接收下一信息的最早时间。有确定初始标识先行值是通过考虑初始标识的情况来进行计算的。因此无初始标识先行值又称为缺省先行值。

定义 9 无初始标识先行值是在无初始标识的 Petri 网结构中, 结束库所接收下一消息的最早时间, 即为消息从源库所发送到结束库所的最小延时。

定义 10 有确定初始标识先行值是在具有确定初始标识的 Petri 网结构中, 结束库所从具有确定初始标识的库所接收下一消息的最早时间, 即为消息从具有确定初始标识的库所发送到结束库所的最小延时。

先行值计算是基于每个子网的结构和运行的最后状态, 它联系到结束库所及由源库所到结束库所所经历的变迁。由源库所到结束库所的基本组成形式如图 2。

对于一些复杂的 Petri 网结构, 我们很难直接得出它的先行值, 下面我们采用预测图算法将带有回路的结构图变成不带回路的预测图, 求解无初始标识先行值的预测图算法如下:

(1) 预测图的建立是根据结束库所反方向移动来实现的, 预测图的结点由库所和变迁组成;

(2) 预测图的初始结点是结束库所 ps , 若有多个结束库所, 则预测图包括多个初始结点;

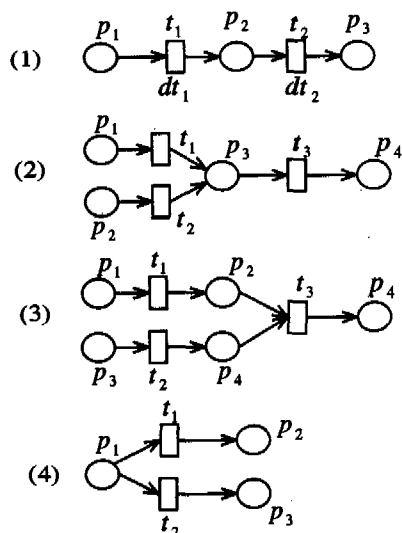


图 2

(3)预测图初始结点的下一个结点是 ps 的前集(为变迁);

(4)再从 Petri 网结构图中寻找预测图当前结点的前集,作为该结点的下一个结点,若当前结点有多个前集,则每个前集作为一个分支结点,依上述方法继续找各分支结点的前集,直到无前集或出现下列情况:

(a)某结点的前集已出现在该预测图中且若连接此结点前集能与前面产生的预测图形成循环结构(有方向),这时不将此结点的前集加入预测图,此分支回退到最近加入的库所结点(若此结点为库所,则就到此结点)为止;

(b)若某结点的前集已出现在该预测图中但按方向不形成循环,则此结点的前集加入(即共用);

(5)预测图生成的结束条件为源库所已加入到图中,其它分支已按(4)结束。

根据求解无初始标识先行值的预测图算法,从源库所到结束库所的四种基本形式的预测图及对应先行值如图 3。

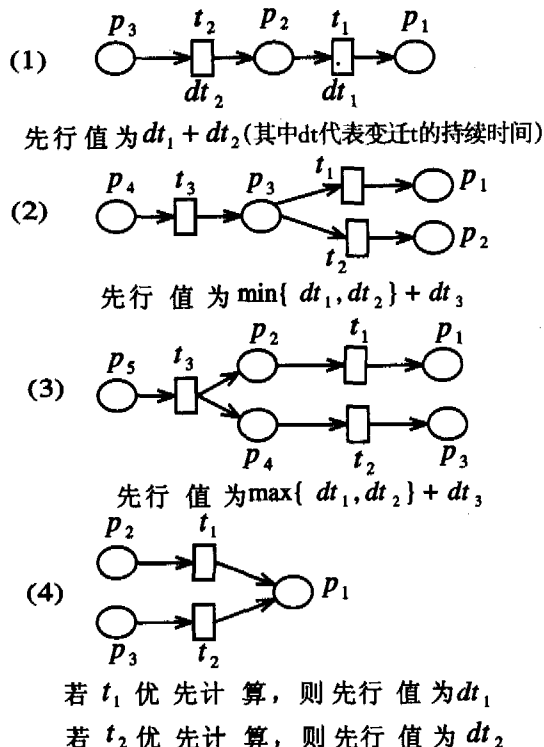


图 3

一个网的无初始标识先行值计算是首先把它转变为预测图,然后根据四种基本结构的先行值来计算整个预测图的先行值。

有确定初始标识先行值的计算是与初始标识相关的,它相当于将初始标识库所作为源库所来求先行值,求解方法基本相似。现举例说明:

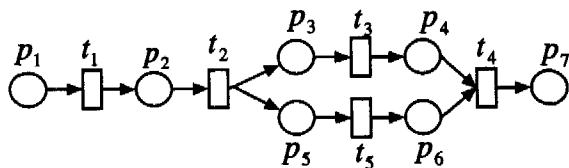


图 4 一个时延 Petri 网模型 Σ_1

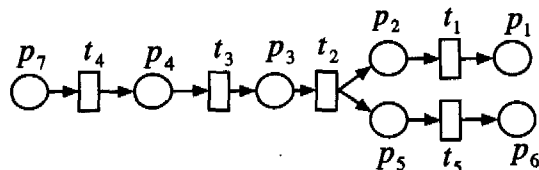


图 5 时延 Petri 网模型 Σ_1 对应的预测图

从图 5 可看出,图 4 所给的模型的无初始标识先行值为 $\max\{dt_1, dt_5\} + dt_2 + dt_3 + dt_4$ 。有确定初始标识先行值为:若 p_3 或 p_4 被标识,则预测图分别只画到 p_3 或 p_4 ,其有确定初始标识先行值分别为 $dt_3 + dt_4, dt_4$;若 p_1 被标识, p_5 或 p_6 中一个被标识,分别对应的有确定初始标识先行值为 $dt_1 + dt_2 + dt_3 + dt_4, \max\{dt_1, dt_5\} + dt_2 + dt_3 + dt_4$ 。

3 先行性在并行模拟中的应用

在 Petri 网的并行模拟中,一般方法是将复杂的网结构分解成若干小的子网(逻辑进程),然后让这些子网分配到并行机的各个结点进行处理,从而提高模拟效果。在文[10]中, A. Chiola 给出了根据网的结构来进行模型分割的方法,其核心是将网中并发结构分开,使之成为不同逻辑进程,后分配到并行结点上,以减少时间和通信开销;冲突或信息传递中阻塞等待的结构要放在同一个逻辑进程上,主要减少通信开销。

定义 11 设 $t(a)$ 表示变迁 a 的局部模拟时间,给定变迁 x 和 y ,若 $t(x) < t(y)$,则称变迁 x 先于变迁 y 发生,记为 $x > y$ 。

定义 12 若 z 发生,则必须 $x > z$,则称 x 能调度 z 。

定义 13 记 LP 为逻辑进程,给定 x 是 L_{pi} 中的变迁, y, z 是 L_{pj} 中的变迁,若 x 能调度 z 且 $z > y$,则变迁 x 影响变迁 y 。否则变迁 x 不影响变迁 y 。

定义 14 设 x, y 分别为 L_{pi}, L_{pj} 中的变迁,若 x 不影响 y 且 y 不影响 x ,则称 x 和 y 是并发的。

在用先行性来分析时延变迁 Petri 网模型时,我们可以在开始时将模型分成多个逻辑进程 LP,让每个 LP 仅包含一个变迁,然后分析各个 LP 间的关系,再进行合并。另外也可以根据 Chiola 的方法将存在冲突结构的变迁直接放在一个 LP 上,以及其它需放在同一个 LP 上的结构也事先确定好(对于多个变迁在同一个 LP 时,可按时间戳由小到大确定一个事件表)。然后用先行性来分析这些 LP,确定这些 LP 间的阻塞与并发。

定理 1 设 x, y 分别为 L_{pi}, L_{pj} 中的唯一变迁, L_{aij} 为连接 L_{pi} 和 L_{pj} 的有确定初始标识先行值,若 $t(x) + L_{aij} < t$

(y), 则 x 影响 y 。若 $t(x) + Laij \geq t(y)$, 则 x 不影响 y 。

证明: 可由定义 13 及先行值概念得出。

定理 2 设 x, y 分别为 Lpi, Lpj 事件表中的第一个变迁, $Laij$ 为连接 Lpi 和 Lpj 的有确定初始标识先行值, $Laji$ 为连接 Lpj 和 Lpi 的有确定初始标识先行值, 若 $t(x) + Laij \geq t(y)$ 且 $t(y) + Laji \geq t(x)$, 则 x 和 y 是并发的。

证明: 由定理 1 知,

若 $t(x) + Laij \geq t(y)$, 则 x 不影响 y 。

若 $t(y) + Laji \geq t(x)$, 则 y 不影响 x 。

由定义 14 知, x 和 y 是并发的。

定理 3 设 $LTmaxi$ 和 $LTmaxj$ 分别是逻辑进程 Lpi 和 Lpj 的局部最大模拟时间, e_i 和 e_j 分别是 Lpi 和 Lpj 事件表中的第一个变迁, $LTdli$ 和 $LTdlj$ 分别为 Lpi 和 Lpj 的局部模拟时间, $Laij$ 为连接 Lpi 和 Lpj 的有确定初始标识先行值, $Laji$ 为连接 Lpj 和 Lpi 的有确定初始标识先行值, 如果 $LTdli + Laij \geq LTmaxj$ 且 $LTdlj + Laji \geq LTmaxi$, 那么在 $[LTdli, LTmaxi]$ 和 $[LTdlj, LTmaxj]$ 时间区间中, Lpi 中的变迁与 Lpj 的变迁是并发的。

证明: 设 Eli 是 Lpi 的事件表, Elj 是 Lpj 的事件表, 表中变迁是根据时间戳排序的。

任给 $x, y, x \in Eli, y \in Elj$,

有 $t(x) \geq LTdli, t(y) \geq LTdlj$

故 $LTmaxi \geq t(x) \geq LTdli$

$LTmaxj \geq t(y) \geq LTdlj$

又因为 $LTdli + Laij \geq LTmaxj$

所以 $t(x) + Laij \geq LTdli + Laij \geq LTmaxj \geq t(y)$

即 $t(x) + Laij \geq t(y)$

同理可得 $t(y) + Laji \geq t(x)$

由定理 2 知 x 和 y 并发。

由 x 和 y 的任意性可知, 在 $[LTdli, LTmaxi]$ 和 $[LTdlj, LTmaxj]$ 时间区间中, Lpi 中的变迁与 Lpj 的变迁是并发的。

根据先行值的概念及定理 2, 我们在并行机上模拟复杂的时间 Petri 网结构时, 可以通过分析哪些事件是并发的, 哪些是可能发生阻塞, 进而来确定逻辑进程, 这样可大大减少模拟开销, 提高模拟性能。

结束语 在保守分布式模拟中, 先行值的计算是促进并

行模拟性能的有效方法之一, 它能让我们事先去分析网的结构, 减少盲目分割带来更大的通信开销, 让并发的进程能同步运行在各并行机结点上, 从而提高模拟性能。本文给出了计算时延变迁 Petri 网的先行值的预测图算法, 便于我们计算复杂 Petri 网结构的先行值, 然后将先行值应用到并行模拟中, 对于将网分割成逻辑进程有很大帮助, 这将促进并行模拟的性能。

参考文献

- 1 吴哲辉译. Petri 网理论与系统模拟[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1989
- 2 袁崇义. Petri 网原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 1998
- 3 Wang Jiacun. Timed Petri nets: Theory and Application [M]. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1998
- 4 Murata T. Petri nets - properties, analysis, and applications [J]. Proc. IEEE, 1989, 77(11): 541~580
- 5 Ferscha A. A Petri Net Approach for Performance Oriented Parallel Program Design [J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, July 1992, 15(3): 188~206
- 6 Chiola G, Ferscha A. Distributed Simulation of Timed Petri Nets: Exploiting the Net Structure to Obtain Efficiency [C]. In: Proc. of the 14th Int. Conf. on Application and Theory of Petri Nets 1993, July 1993
- 7 Nketsa A, Khalifa N B. Timed Petri nets and prediction to improve the Chandy-Misra conservative-distributed simulation [J]. Applied Mathematics and Computation, 2001, 120: 235~254
- 8 Janneck J W. Behavioural prediction of timed Petri nets with applications to distributed simulation. Proceedings of High Performance Computing [C]. Advanced Simulation Technologies Conference, 1998. 416~424
- 9 Fujimoto R M. Exploiting temporal Uncertainty in Parallel and Distributed Simulations, 1998, Technical Report [R]. Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA
- 10 Chiola G, Ferscha A. Exploiting Timed Petri Net Properties for Distributed Simulation Partitioning [C]. In: Proc. of the 26th Hawaii Int. Conf. on System Science, 1993, 194~203
- 11 王召福, 金士尧. HLA 仿真系统中 Lookahead 的分析与动态调整策略[J]. 计算机仿真, 2003. 78~81

(上接第 227 页)

两种方法。实验表明: 本文算法既克服了传统 FCM 算法的缺点, 又最大限度地保持了算法计算的简洁性, 在图像分割中取得了良好得效果。

参考文献

- 1 Bezdek J C. Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms. N. Y: Plenum Press, 1981
- 2 冯衍秋, 陈武凡, 等. 基于 Gibbs 随机场与模糊 C 均值聚类的图像分割新算法. 电子学报, 2004, 32(4): 645~647
- 3 Chen Songcan, Zhang Daoqiang. Robust Image Segmentation U-

sing FCM With Spatial Constraints Based on New Kernel-Induced Distance Measure. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics 2004, 34(4): 1907~1916

- 4 高新波, 李洁, 姬红兵. 基于加权模糊 c 均值聚类与统计检验指导的多阈值图像自动分割算法. 电子学报, 2004, 32(4): 661~664
- 5 Besag J. Spatial interaction and the statistical analysis of lattice systems. J. Roy. Statist. Soc. B, 1974(36): 192~236
- 6 Derin H, Elliott H. Modeling and segmentation of noisy and textured images using Gibbs random fields. IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell, 1987(1): 39~55
- 7 <http://www.bic.mni.mcgill.ca/>