

基于 Petri 网运行状态的组件化软件可靠性分析方法

郑晓东, 崔志明, 陈建明

(苏州大学 智能化信息处理及应用研究所, 江苏 苏州 215006)

摘要:通过分析软件系统的组件结构特征、运行状态和可靠性因素,提出了基于随机 Petri 网运行状态的可靠性分析方法。对构成软件系统的各组件的可靠性进行分析和评估,根据系统运行状态动态跟踪软件的可靠性,推导出整个软件系统的可靠性。与仅着眼于系统组件间的执行路径不同,该方法更关注于系统各个运行状态的可靠性。最后给出了一个实例研究。

关键词:组件;软件可靠性;随机 Petri 网;运行状态

中图分类号: TP311

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2008)04-0005-04

Petri - Net Running State Analysis Method for Component - Based Software Reliability

ZHENG Xiao-dong, CUI Zhi-ming, CHEN Jian-ming

(Institute of Intelligent Information Processing, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: Puts forward a reliability analysis method based on Petri net's running state via analyzing the characteristic of the component structure, the running state, and the reliability factor of the software system. First analyze and evaluate the reliability of the elements of the software architecture, then trace the reliability of the system through its running state, and finally deduce the reliability of the whole software. Unlike putting much emphasis on each execution path of the system, focus on its running states. In the end present an example about how to evaluate the reliability of a simple component-based system.

Key words: component; software reliability; stochastic Petri net; running state

0 引言

组件(Component)是构成软件系统的结构单元,是指封装了数据和功能、在运行时能够通过参数进行配置的模块^[1]。通常组件由第三方开发,具有清晰的接口描述。除了常见的功能接口描述以外,组件还应有表明该组件使用场合和可靠性等性能指标的描述。对于组件化的软件来说,需要的早期可靠性模型不仅应该能够分析软件的可靠性,如软件系统结构的特征和适用性的评价等,而且还应该能根据这种分析的结果对其后的软件开发和可靠性管理加以必要的指导,包括软件系统结构的优化,组件的选择,测试用例的编写以及故障诊断等等。Petri 网^[2]是用于描述分布式系统的一种模型。它既能描述系统的结构,又能模拟系

统的运行。因此, Petri 网特别适用于描述基于组件的多线程、分布式软件系统结构,以及构成软件系统各组件间的运行关系。将 Petri 网运用于基于组件的软件可靠性评估中,体现了组件技术的封装特性和 Petri 网模型的模块化、易扩充、可重用的特征。

1 用 Petri 网来描述组件化的软件系统

为了描述软件系统的整体结构和运行状态,在基本网系统和随机 Petri 网^[3]定义的基础上,引入组件基本网系统(software component elementary net system,简记为 SCEN)。如果用 S 表示组件集, T 表示变迁接口集, F 表示边集, M 表示状态集;用 TF 表示变迁接口的可靠性系数, TP 表示选择结构的迁移概率, λ 表示迁移的平均速率,则给出组件基本网系统的形式化定义如下:

定义 1: 组件基本网系统是一个八元组 $\Sigma = (S, T; F, M; SR, TP, TF, \lambda)$, 其中:

1) $(S, T; F, M)$ 是一个基本网系统, S 称为组件集(software component set), T 称为变迁集(transition

收稿日期: 2007-07-12

基金项目: 教育部科研重点项目(205059)

作者简介: 郑晓东(1982-), 男, 湖北宜昌人, 硕士研究生, 研究方向为软件测试自动化、软件可靠性; 崔志明, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能化信息处理、计算机网络应用与数据库应用; 陈建明, 副教授, 研究方向为软件测试自动化、软件可靠性和智能化信息处理。

set), $M \subseteq S$ 称为 \sum 的一个运行状态。变迁 $t \in T$ 在状态 M 有发生权(记作 $M[t >]$), 当且仅当 $t \subseteq M \wedge t \cap M = \emptyset$ 。

2) SR 是组件的可靠性, $SR = \{R(s_1), R(s_2), \dots, R(s_n)\}$, $R(s_i)$ 描述的是仅与组件自身有关的可靠性。

3) TP 是选择结构的迁移概率。设 $TP = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$, 则对任意 $p_i \in s'$, $\sum p_i = 1$ 。显然, 若组件只有一个后继变迁 t_k , 则其迁移概率 $p_k = 1$ 。

4) TF 是变迁接口的可靠性系数, $TF = \{F(t_1), F(t_2), \dots, F(t_m)\}$, $F(t_i)$ 描述的是组件调用接口, 以及组件间依赖关系和被调用组件的运行环境的整体可靠性。

5) 设 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$, 则对 $t_i \in T$, $\lambda(t_i) = \lambda_i$ 为一个非负实数, 它表示变迁(当满足发生条件时)的发生速率。 t_i 发生的时延 d_i 是一个同时间 τ 相关联的随机变量 $d_i(\tau) = e^{-\lambda_i \tau}$ 。

6) 若变迁 t 在状态 M 发生, 产生新的状态 M' , (记作 $M[t > M']$), 则 $M' = (M - t) \cup t'$ 。一个组件基本网系统也是一个网系统, 因此也具有网系统的变迁发生规则(transition firing rule)。

在 SCEN 中, 构成系统的组件不可避免地存在着缺陷^[4], 系统运行期间这些缺陷将导致故障的产生。而且组件通过彼此的协作、交互以及调用共同实现系统功能, 组件之间存在的各种依赖关系也会导致故障的产生。为了描述因组件间的依赖关系及特定运行环境而导致的系统可靠性变化, 为每一个变迁接口赋予一个可靠性系数, 运行状态中的组件可靠性简单地表示为其自身可靠性与调用此组件的前置接口可靠性的乘积。调用某一组件只需一个接口即可, 所以任意组件的前置接口至多一个, 即 $\max\{|s| : s \in \text{pre}(t)\} = 1$ 。更进一步为了描述系统状态转移的时间特征, 在基本 Petri 网的基础上对其中每个变迁 t 引入一个满足指数分布的实施速率(firing rate)得到随机 Petri 网, 随机变量的引入使得可以用 Petri 网对不确定的软件系统进行建模和分析。

如果一个 Petri 网模型确切地描述了一个系统的结构和运行, 那么这个系统所具有的一些性质也会在其 Petri 网模型上得到体现。Petri 网的主要性质有可达性、可逆性、可覆盖性、有界性和安全性、活性、公平性以及持续性等。在此不一一做具体的解释, 仅指出用于描述软件系统结构和运行的 Petri 网的有界性 $B(\sum) = 1$, 是安全的。因为 \sum 是安全的, 则其完全状态集个数 $|R(M_0)| \leq 2^n = |\rho(S)|$ 。考虑到软件的实际运行状态, 其状态集个数应该远小于这个值, 设 $|R(M_0)|$

$| = k \ll 2^n$ 。文中的目的就是描述如何对软件系统进行 Petri 网建模, 通过其有限的各个运行状态的可靠性来描述整个软件系统的可靠性。

2 基于 Petri 网运行状态的可靠性分析

设 $M \in R(M_0)$, M 是软件系统的一个运行状态^[5], 即 Petri 网中的一个状态, 设此状态下系统可靠性为 $R(M)$ 。若第 i 个组件的可靠性为 $R(s_i)$, 且其前置变迁接口可靠性系数为 $F(s_i)$, 各个组件和变迁接口之间相互独立, 则如前所述此状态下该组件动态可靠性为 $R(s_i) \times F(s_i)$ 。而在此运行状态下整个系统的可靠性计算分三种情况:

1) 若在某状态下, 当且仅当处于运行状态的组件全部正常工作时, 系统才正常工作, 任意一个模块失效都将导致整个系统的失效, 则称其为串联运行状态。此时系统的可靠性计算公式如下:

$$R(M) = \prod_{i=1}^n (R(s_i) \times F(s_i)) \quad (M(s_i) = 1)$$

2) 若在某状态下, 只要某一组件正常工作时, 系统就可以正常工作, 只有所有的模块都失效才能导致整个系统的失效, 则称其为并联运行状态。此时系统的可靠性计算公式如下:

$$R(M) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - (R(s_i) \times F(s_i))) \quad (M(s_i) = 1)$$

3) 若在某状态下, 既有串联运行状态也有并联运行状态, 则称为混联运行状态, 此时的可靠性计算可采用递归方法: 每次依串联或并联的形式, 对运行状态进行逐级分解, 直至分解所得的每一部分均含有单纯串联或并联运行状态为止, 再利用前述串(并)联状态可靠性计算方法逐级回溯, 最终计算得出整个状态的可靠性。

在得到了单个运行状态的可靠性之后, 可以来求解整个系统的可靠性了。首先, 需要得到所有的运行状态, 这可以通过 Petri 网的可达标识图(reachable marking graph)得到。通过 Petri 网的可达标识图可以分析这个网系统的状态变化情况和变迁的发生序列, 从而得知网系统的有关性质。可达标识图的构造算法在文献[1]中有详细的描述, 在此不做介绍, 只在文中最后给出一个例子(见图 2)。可以看出, 图中的每一个结点对应系统中的一个运行状态, 完整的图就是系统的全部运行状态。在得到了系统的所有运行状态之后, 就可以运用前面描述的求解单个状态可靠性的方法求出系统每个状态的可靠性。

求解系统的可靠性还需要知道每个运行状态的稳

定概率 $P(M_i)$ 。当系统中含有选择结构时,可以对系统进行分解和重构,用多个子 Petri 网来描述选择结构。先对每个子 Petri 网用对应的同构马尔可夫链(MC)来求解,再依据选择结构的概率进行重构得出 $P(M_i)$ 。当然, $P(M_i)$ 也可以通过 Petri 网模拟程序动态模拟系统的运行而得到,这也是用 Petri 网来描述基于组件的软件系统的优点所在。下面给出通过马尔可夫方程求解系统各状态的稳定概率的方法。

在所描述的模型中,变迁 t_i 的平均时延为负指数分布。由于负指数分布具有无记忆的性质,如果 \sum 是一个有界的随机 Petri 网,那么 \sum 的可达标识图 $RG(\sum)$ 同构于一个有限的马尔可夫链(MC)。该马尔可夫链的状态空间就是 \sum 的可达标识集 $R(M_0)$ 。设 $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n] (n = |T|)$ 。 $R(M_0)$ 是 \sum 的可达标识集。设 $|R(M_0)| = r$, 那么 r 阶矩阵 Q 称为 \sum 的概率转移矩阵。

$Q = [q_{ij}]_{r \times r}$, 其中 $q_{ij} =$

$$\begin{cases} \lambda_k, & \text{若 } i \neq j, \text{ 且存在 } t_k \in T \text{ 使得 } M_i[t_k > M_j \\ 0, & \text{若 } i \neq j, \text{ 且不存在 } t_k \in T \text{ 使得 } M_i[t_k > M_j \\ -\sum_{M_i[t_k > M_j} \lambda_k, & \text{若 } i = j \end{cases}$$

通过概率转移矩阵,可以求出马尔可夫链上 r 个状态(对应 \sum 的 r 个可达标识)的稳定状态概率。马尔可夫链(MC)的稳定状态概率可以用一个 r 维向量 $\Pi = [\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_r]$ 表示($r = |R(M_0)|$), 其中 π_i 表示标识 M_i 的稳定状态概率, r 维向量 Π 满足下列方程组:

$$\Pi Q = 0 \text{ 且 } \sum_{i=1}^r \pi_i = 1$$

其中 Q 是概率转移矩阵,通过解上面 $r+1$ 个方程的方程组,可以求出 r 个向量 Π 。很显然, $\pi_i = P(M_i)$ 。

在得到了系统所有的运行状态和稳定概率之后,可以用加权的方法求出系统的整体可靠性^[6]。若用 $R(S)$ 表示系统整体可靠性,对任意 $M_i \in R(M_0)$, 设该状态下 M_i 系统的可靠性为 $R(M_i)$, 该运行状态的稳定概率为 $P(M_i)$, 则系统的可靠性可以很容易地由

下面的公式计算得到: $R(S) = \sum_{i=0}^k R(M_i) \times P(M_i)$,

其中 $\sum_{i=0}^k P(M_i) = 1$ 。

上述方法得出的可靠性是一个软件系统动态运行状态下的可靠性,能够很好地反应运行状态下软件系

统结构的可靠性。

3 原形系统及实例研究

已初步实现了基于组件随机 Petri 网概率迁移图的软件可靠性分析工具 SPNCSR(Stochastic Petri Net for Component-based Software Reliability), 其外观如图 1 所示。

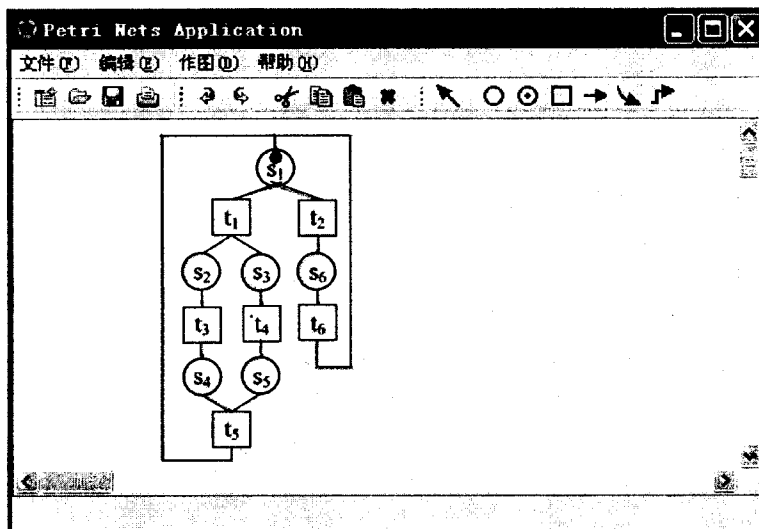


图1 SPNCSR 应用程序外观

考虑图 1 所描述的一个简单组件基本网系统 $\sum = (S, T; F, M, SR, TP, TF, \lambda)$, $|S| = 6$, s_2, s_4 与 s_3, s_5 是为了提高系统容错性而设计的并行结构, $M_0 = (1, 0, 0, 0, 0, 0)$ 。由算法得到的可达图如图 2 所示, 其中既有串联运行状态也有并联运行状态。在已知各组件及其被调用接口可靠性 $R(s_i) \times F(s_i) = r_i$ 的前提下, 可计算出各个系统各个运行状态的可靠性:

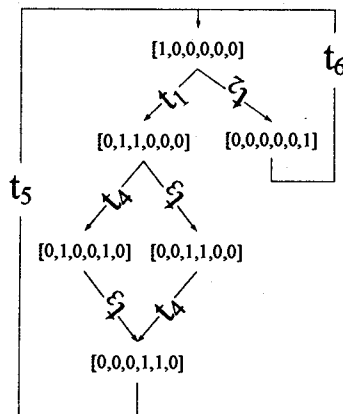


图2 SPN 对应的可达图

$$\begin{aligned} R(M_0) &= r_1; R(M_1) = 1 - (1 - r_2)(1 - r_3) = \\ &= r_2 + r_3 - r_2 r_3; R(M_2) = 1 - (1 - r_2)(1 - r_4) = r_2 \\ &+ r_4 - r_2 r_4; R(M_3) = 1 - (1 - r_3)(1 - r_4) = r_3 + r_4 \\ &- r_3 r_4; R(M_4) = 1 - (1 - r_4)(1 - r_5) = r_4 + r_5 - \end{aligned}$$

$$r_4 r_5; R(M_5) = r_6.$$

若通过马尔可夫方程已知系统各状态的稳定概率, $P(M_i) = p_i$, 其中 $\sum_{i=0}^k p_i = 1$, 则系统的可靠性为:

$$\sum_{i=0}^k P(M_i) * R(M_i) = r_1 * p_1 + (r_2 + r_3 - r_2 r_3) * p_2 + (r_2 + r_4 - r_2 r_4) * p_3 + (r_3 + r_4 - r_3 r_4) * p_4 + (r_4 + r_4 - r_4 r_5) * p_5 + r_6 * p_6.$$

4 结 语

在软件系统设计的早期对系统的可靠性进行分析和预测是十分必要的。通过分析基于组件的软件系统特征和可靠性因素,指出了一种能够对运行状态下的软件系统可靠性进行分析的方法。首先对软件系统组件间的关系进行随机 Petri 网建模,然后利用 Petri 网的基本性质对软件系统的结构和运行特征进行分析。通过 Petri 网的可达标识图算法得到系统所有的运行状态,并计算出每个状态的可靠性和稳定概率,最后得到系统总体的可靠性。该模型关注于系统动态运行过程中的可靠性跟踪。文中提出的计算方法能够简单有效地计算出系统的可靠性,能够在软件设计的早期对软件系统的可靠性进行分析预测,也能够在软件系统运行期间对软件系统的可靠性进行分析评估,是指导软件系统结构的分析设计,提高软件系统性能的有效

(上接第 4 页)

此外,基于互信息的配准方法在配准之前作高斯滤波可提高配准精度;文中的算法则不需要。

(3)多模图像的配准。

由表 3 可见,将文中配准法应用于多模图像的配准时,误差基本不变。参考文献[3]的方法对于 CT 图像与 MRI 的配准会产生较大的误差,而文中的配准法则不会,因为只要是同一个人的图像,变换到物理空间时轮廓就一定是相同的。

(4)相似性测度随迭代步数的收敛。由图 1、图 2 和图 4 中的收敛图可以看出,基于互信息的配准算法的收敛图有更明显的震荡。

3 结束语

根据医学图像差异程度的不同,采用文中提出的方案实施医学图像配准,时间花费一般是几秒,同时用基于互信息的配准方法来同文中的方法在单模和多模两方面作比较。发现采用这两种不同的方法,得到的配准精度没有明显的不同,但在图像配准速度方面,文中的配准方法比基于互信息的配准法的配准速度提高

方法。

参考文献:

- [1] 毛晓光,邓勇进.基于构件软件的可靠性通用模型[J].软件学报,2004,15(1):27-32.
- [2] 吴哲辉. Petri 网导论[M].北京:机械工业出版社,2006.
- [3] 林 闯. 随机 Petri 网和系统性能评价[M]. 第 2 版.北京:清华大学出版社,2005.
- [4] 张友生,李 雄.基于 Petri 网的软件体系结构可靠性分析[J].计算机工程与应用,2006,42(25):70-73.
- [5] 李光远,陈咏章.用随机 Petri 网对构件化软件可靠性进行早期评估[J].计算机工程与应用,2005,41(29):84-87.
- [6] Grunske L. Early quality prediction of component - based systems - A generic framework[J]. The Journal of Systems and Software,2007,80:678-686.
- [7] Reussner R H, Schmidt H W, Poernomo I H. Reliability prediction for component - based software architectures[J]. The Journal of Systems and Software,2003,66:241-252.
- [8] Balsamo S, Marco A D, Inverardi P, et al. Model - based performance prediction in software development: a survey[J]. IEEE Transactions on Software Engineering,2004,30(5):295-310.
- [9] Goseva - Popstojanova K, Trivedi K S. Architecture - based approach to reliability assessment of software systems[J]. Performance Evaluation,2001,45(2-3):179-204.

了几十倍。提出的配准方法,由于相似性测度的计算式只涉及到逻辑以及加法运算,因而具有计算量少、速度快的优点。同时,由于选取了外轮廓,因此可实现配准自动化,确保配准精度,并避免了局部极值问题。此方法可广泛的应用于单模和多模医学图像的配准,对硬件的计算性能要求较低,具备临床推广价值。

参考文献:

- [1] Josien P W, Pluim J B, Maintz A, et al. Mutual - Information - Based Registration of Medical Images: A Survey[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging,2003,22(8):986-1004.
- [2] Zitova B, Flusser J. Image registration methods: a survey[J]. Image and Vision Computing,2003,21:977-1000.
- [3] 周永新,罗述谦.基于形状特征点最大互信息的医学图像配准[J].计算机辅助设计与图形学学报,2002,14(7):654-658.
- [4] Hill D L G, Batchelor P G, Holden M, et al. Medical Image Registration[J]. Phys. Med. Biol,2001,46(7):1-45.
- [5] 罗述谦,李 响.基于最大互信息的多模医学图像配准[J].中国图象图形学报,2000,5(7):551-558.