基于 HTCPN 的胃癌诊疗路径建模与应用*

田 燕[1], 张 婷[1], 吴洋东[2], 张新刚[1]
(1. 南阳师范学院 计算机与信息技术学院, 河南 南阳 473061; 2. 南阳医学高等专科学校 一附院, 河南 南阳 473058)

摘 要: 为建立随病情发展而变化、满足患者体质和需求的诊疗路径,采用分层赋时着色 Petri 网(HTCPN)进行胃癌诊疗建模分析。利用 Petri 网时间分析算法和成本分析算法,对并行方案评估对比,获得最终临床路径。通过模拟不同身体状况、不同需求的患者,自动生成了各阶段诊疗方案,并与真实病历基本吻合,可以为胃癌诊疗提供有效的决策支持。

关键词: 诊疗路径; 分层赋时着色 Petri 网; 胃癌; Petri 网经济成本; 需求驱动
中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)02-458-04
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.02.038

Modeling and application of clinical pathway based on HTCPN for stomach cancer

TIAN Yan[1], ZHANG Ting[1], WU Yang-dong[2], ZHANG Xin-gang[1]
(1. *Computer & Information Technology Academy*, *Nanyang Normal University*, *Nanyang Henan* 473061, *China*; 2. *The First Hospital*, *Nanyang Medical College*, *Nanyang Henan* 473058, *China*)

Abstract: In order to establish the clinical pathway that can vary with conditions and satisfy patient's needs, modeling of clinical pathway based on HTCPN for stomach cancer is proposed. The algorithms about time and cost on Petri net can evaluate the parallel clinical schemes. The clinical pathway is finally achieved in this way. In accordance with diverse patients' cases (varying with conditions and requirements), several clinical schemes are generated automatically. Because each scheme matches well with relevant medical card, HTCPN can provide effective supports for stomach cancer treatments.

Key words: clinical pathway; hierarchical timed colored Petri net(HTCPN); stomach cancer; economic cost based on Petri nets; requirement-driven

诊疗路径以循证医学和指南为基础,针对同种疾病建立标准化的诊疗模式和诊疗程序,能够规范诊疗行为,提高诊疗效果,降低医疗成本。诊疗路径的成功开发和实施有利于减少同病种的诊疗差异,最大程度地提高其诊疗效果[1]。

国外学者对诊疗路径的建模做了相关研究。Abidi 等人[2]建立的语义 Web 模型实现了异构领域知识和操作知识的合成,并进一步研究了面向服务架构的以患者个体为中心的诊疗路径建模的相关技术;Hurley 等人[3]抽取诊疗路径的实践知识融入到 Abidi 提出的模型,利用本体实现了诊疗路径的结构和基本功能;项目 PARAD IGMA(participative approach to disease global management)把诊疗路径本体划分成检查、诊断、治疗等阶段,根据病种不同生成不同的诊疗路径[4]。

国内学者阮莹等人[5]通过研究既有诊疗日志,归纳整理出诊疗活动之间的因果关系、并行关系和选择关系,提出了诊疗流程挖掘算法,生成了基于流程挖掘的临床路径;赵艳丽等人[6]利用 Petri 网对复杂病种建立临床路径模型,实现了对诊疗状态、信息流转及诊疗活动间的关系的可视化监控,并基于仿真结果给出资源配置建议以优化临床路径实施效果。

以上研究取得了一定成果,但是也存在以下不足:a)现存研究主要从概念角度描述诊疗路径,进入实施的诊疗路径大多局限于情况稳定、变化少的病种,复杂病种的诊疗路径与实践脱节严重,可操作性不强,实施困难,比如肿瘤病种的内科治疗,由于其放疗、化疗方案多、副作用多、并发症多,所以依靠现有的建模方法进行建模很难进入临床实施阶段;b)适用对象主要是理想化患者,路径过于单一僵化,较少考虑患者的个体差异、病情的发展和难以预测性,一成不变的路径难以符合病情发展引起的诊疗方案变化的需求;c)医患双方缺乏互动,没有考虑患者生存质量、情感意愿、经济状况等,制订的路径难以符合个体真实需求。针对以上研究和不足,本文提出分层赋时着色 Petri 网(HTCPN)建模,根据治疗效果、生存质量、时间成本和经济成本,生成符合患者体质与需求的诊疗路径[7]。

1 HTCPN 概述

经典 Petri 网具有成熟的数学分析技术,可以用直观的图形表示跳转多变的工作流系统,在处理并发、并行、同步、异步和随机事件时具有较强的描述能力[8,9]。但是经典 Petri 网在实际应用时存在一定的局限性。一方面对复杂系统建模时,描述形式单一,模型庞大,尤其是在进行大规模系统建模时难以胜任;另一方面,经典 Petri 网没有时间概念,增加了后期分析和评估的难度,不利于系统流程的再造和优化。

收稿日期: 2012-07-03; **修回日期:** 2012-08-13 **基金项目:** 河南省基础与前沿技术研究资助项目(122300410315,122300410306,112300410235);河南省教育厅自然科学研究资助项目(2011B520030);南阳师范学院科研项目(STP2009001)

作者简介: 田燕(1979-),女,河南新野人,讲师,硕士,主要研究方向为动态工作流建模、软件工程(ttianyan@126.com);张婷(1985-),女,河南南阳人,助教,硕士,主要研究方向为数据挖掘与工作流建模、软件工程;吴洋东(1975-),男,河南方城人,主治医师,硕士,主要研究方向为临床肿瘤学、医学信息学;张新刚(1979-),男,河南漯河人,讲师,硕士,主要研究方向为计算机网络安全.

研究者通过对经典 Petri 网理论进行扩展,提出了一系列高级 Petri 网,包括分层 Petri 网、时间 Petri 网和着色 Petri 网,HTCPN 是它们的组合体。分层是指在进行复杂系统建模时,通过自顶向下、逐步细化或者自底向上、逐步组合的方法得到整个系统的完整描述,可以解决经典 Petri 网建模庞大的问题[10,11];时间主要是指为一些托肯加上时间戳的属性,由时间来触发变迁的发生,由变迁产生托肯的延迟等,以更好描述时间相关的流程[12];着色则是为属性相同的托肯染上同一种颜色以区分不同类别的托肯[13]。在实际应用时,人们通常利用 HTCPN 进行复杂系统的建模与分析[14,15]。

2　基于 HTCPN 的诊疗路径建模

本文选择胃癌为诊疗路径建模对象,提出基于 HTCPN 的诊疗路径模型。我国胃癌的发病率在各类肿瘤中居首位,国家暂时没有制订胃癌(内科)的诊疗路径。本文建模时重点研究内科治疗环节,涉及到外科治疗部分依照国家卫生部 2011 年颁发的卫办医政发〔2011〕88 号文件中的胃癌(外科)临床路径。

胃癌的诊疗涉及到化验室、CT 检查室、胃镜室、B 超室、病理科、放射科等多个不同的检查科室,以及肿瘤内科、肿瘤外科、放疗科等多个科室医生、护士的共同诊疗及护理。为了建模和后期分析的方便,根据胃癌病症和诊疗的规律,将胃癌诊疗过程大约划分为检查、初始治疗、未接受术前治疗的术后治疗、接受术前治疗的术后治疗、辅助治疗、随访、姑息治疗等七个子过程。在实际治疗时,患者可能会进行多个阶段的连续治疗,也可能会在治疗一段时期后出院,让身体恢复到一定程度再择期入院,诊疗路径应能够接受患者的这种可随时进入随时离开、可随时持续诊疗的实际情况。为此,专门设计一个标记,记录患者在诊疗过程中所处的阶段,阶段标记初值为“检查”,此后每一个诊疗阶段结束后都要根据患者状况,设置进入下一阶段的标记,以控制流程的跳转和衔接。

根据胃癌《NCCN 胃癌临床实践指南》2011 中国版,以及中华医学会编著的《临床诊疗指南—肿瘤分册》整理得到胃癌的基本诊疗流程如图 1 所示,主要包括:

a)接收确诊为胃癌的患者入院。

b)实施必要的相关检查,设置下一阶段诊疗标记,若肿瘤分期为 M1,直接转入姑息治疗,否则进入初始治疗。

c)根据肿瘤分期实施对应的初始治疗,可供选择的方案包括手术、术前化疗、术前放化疗等,实施完毕根据治疗情况及肿瘤分期设置下一阶段诊疗标记。

d)依据诊疗标记进入以下三个分支阶段之一:接受过术前治疗的术后治疗、未接受过术前治疗的术后治疗、辅助治疗,治疗结束后重新设置下一阶段诊疗标记,若肿瘤分期发展为 M1,转入姑息治疗,否则进入随访。

e)根据情况定期随访,实施相关检查,若有复发,进入姑息治疗,未复发则一直随访,直至患者终止随访或亡故。

f)姑息治疗,根据患者情况实施下列方案之一:最佳支持治疗、化疗、手术、临床实验等。

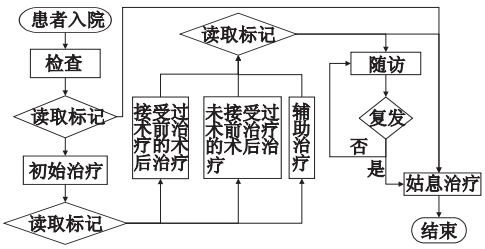

图1　胃癌诊疗流程

由于晚期胃癌的致死率很高,大量进入姑息治疗的患者后期的治疗基本都是最佳支持治疗直至亡故,只有少量进入姑息治疗后恢复较好的患者会从“检查”子阶段开始,重新进入整个诊疗流程,本系统将这部分病人暂视为新病人对待。

2.1　赋时

胃癌诊疗流程中,许多流程有时间限制,例如术前化疗的周期为 2 ~ 3 个疗程,每个疗程 3 ~ 5 天不等。为此,定义了多个时间约束来控制诊疗系统的流转,具体如下:

a) t_{i_start}, t_{i_end}。定义一个变迁开始或结束的绝对时间。通常用于计算某一变迁距离当前时间的差值,例如患者的 T、N、M 分期或者血常规检查超过一定时间则需要重新分期或检查。

b) $t_{i_start} \xrightarrow{[T_{\min}, T_{\max}]} t_{i_end}$。定义一个变迁发生的最短时间和最长时间约束。例如对于 FOLFOX4 化疗方案,最快 2 天完成,最慢 3 天完成,低于阈值,对患者身体损害太大,超过阈值则化疗效果不够理想,不利于患者的术后康复。

c) $t_{i_start} \xrightarrow{[T_1, T_2]} t_{i_end}$。定义一个变迁发生的绝对时间区间。例如空腹血糖检查大约都在上午 9 点之前完成,对于临床患者可以设置绝对时间区间为 6 ~ 10 点。

d) $t_{i_start} \xrightarrow{[T_{\min}, T_{\max}]} t_{j_start}$。定义上一个变迁开始到下一个变迁开始的时间区间约束。例如,由于人体肿瘤细胞的分裂周期变化决定了术后第一次化疗开始与第二次化疗开始的时间区间为 21 ~ 28 天。

2.2　着色

通过对不同的托肯和变迁着色可以描述更加丰富的对象及状态。胃癌诊疗路径中设置了多个颜色集,下面是几个主要的颜色集定义。

1)患者身体状况颜色集

colset condition = product $T * N * M *$ HEALTH * RESECTABLE

患者身体状况包括肿瘤分期(T、N、M)、患者健康状况、肿瘤可否切除等,这几项数据决定了诊疗方案的选择。

2)诊疗路径阶段标记颜色集

colset MARK = product Mark_ID * Mark_NAME * Mark_PERFORMER * Mark_DETAIL

记录患者在诊疗过程中所处的阶段,包括治疗阶段的 ID 编号、名称、执行者等,阶段标记决定了诊疗路径的走向。

3)诊疗方案颜色集

colset scheme = product SCHEME_ID * SCHEME_TYPE * SCHEME_DETAIL

主要记录患者某阶段采用的诊疗方案 ID,所属类别如放疗、化疗、方案的具体描述等。在实际应用时,将方案设置成可编辑权限,医生可以针对特殊情况作适当调整。

4)诊疗效果颜色集

colset effect = product RECIST * WHOQQL

胃癌的治疗效果主要考察患者肿瘤体积的大小变化,同时还要关注肿瘤患者的生存质量,特别对于无法手术的患者,生存质量成为评估治疗效果的主要标准之一。本系统选择国际公认的新评估标准 RECIST 评估胃癌疗效,选择世界卫生组织出台的 WHO-QQL-100 量表对胃癌患者的生存质量进行评分,综合评估胃癌的诊疗效果。

5)诊疗费用颜色集

colset cost = product cost_ examination * Western * radiotherapy * Treatment * tcm * other

主要记录患者诊疗过程中发生的费用,包括检验与检查费、西药费、放疗费、治疗费、中药费、其他费用等,以便后期进行统计。

2.3　分层

由图 1 可以看出,胃癌诊疗过程非常复杂,为此,本文选择

自顶向下、逐步细化的分层法来进行胃癌临床路径的建模仿真。经过消除冗余、简化得到胃癌诊疗路径 Petri 网如图 2 所示。

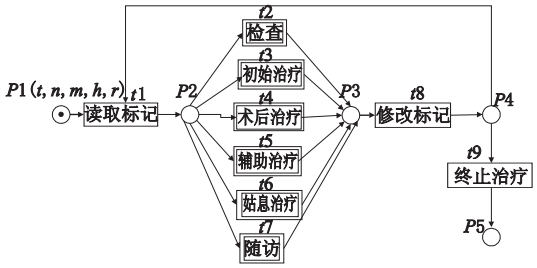

图2　胃癌诊疗路径Petri网

图 2 将各个阶段设置成选择结构，将两类术后治疗合并，由阶段标记控制 Petri 流向，简化了胃癌诊疗流程。图 2 中五个非基本变迁需要进一步细化，通过简化和消除冗余，得到初始治疗阶段的 Petri 子网如图 3 所示。

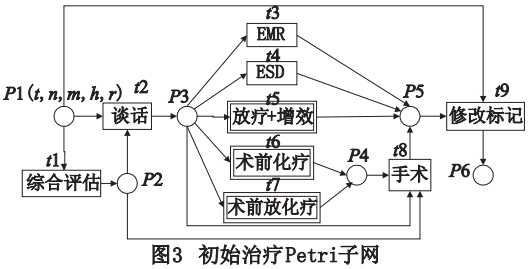

图3　初始治疗Petri子网

其中非基本变迁化疗细化后如图 4 所示。

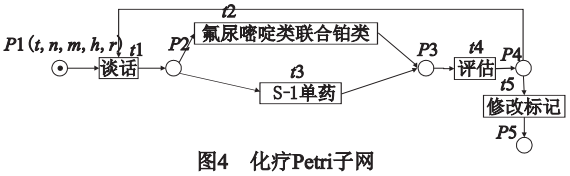

图4　化疗Petri子网

用同样的方法可以得到各个阶段和各个非基本变迁的 Petri 子网结构。

3　可达测试与分析

可达性测试用于验证 Petri 网的活性，发现并排除死锁。基本的可达测试包含有界测试和活性测试。由于胃癌临床路径的复杂性，如果要构造整体可达图，算法的复杂度将是指数级的；由于前期是分层建模，因此可以对基于非基本变迁的顶层诊疗路径网和各个子网分别进行可达分析，测试各个流程是否合理，从而判断整个诊疗路径的合理性。其中对胃癌诊疗路径、初始治疗阶段 Petri 子网的可达测试结果如图 5、6 所示。

图5　胃癌诊疗路径可达图

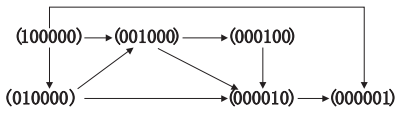

图6　初始治疗可达图

用同样的方法对其他各个子网进行测试，由测试结果判定诊疗路径网有界，不存在死锁，流程合理。

4　需求驱动的诊疗方案生成

4.1　诊疗阶段控制

诊疗路径的阶段标记主要宏观控制诊疗过程的流向，对每一个新患者阶段标记均初始化为检查分期，每一个阶段的诊疗结束后计算出要跳转的下一阶段的名称，患者进入下个阶段治疗前首先检查阶段标记，根据阶段标记进入相应诊治流程。阶段跳转通过计算机自动控制，患者无法干预，除非患者中途放弃治疗，对于放弃治疗超过一年的患者视为新患者，系统重新为其初始化一个新的阶段标记，未超过一年则依然保留原始标记。

阶段控制的描述如下：

a) 阶段标记 mark 初始化为“检查”，开始诊治标记 sz 初始化为“1”。

b) 接收患者 patient 新入院或进入下一个阶段诊治，sz = “0”。

c) 读取 mark 指向的诊治阶段，由此进入对应路径。

d) 完成该阶段诊治活动，记录和更新相关数据。

e) 如果 $M = m1$ 设置 mark = “姑息治疗”，否则按既定顺序设置 mark。

f) 设置 sz = “1”，等待进入下一个阶段诊治。

g) 重复步骤 b) ~ f) 直至 mark 为“随访”或“姑息治疗”。

h) 如果 mark = “随访”，按规定时间重复“随访”，如果复发，设置 mark = “姑息治疗”，否则继续重复“随访”，直至失去随访。

i) 如果 mark = “姑息治疗”，对患者行“姑息治疗”，定期评估，部分患者转入步骤 b)。

4.2　最适合诊疗方案选择

患者进入既定诊治阶段后，主要包括两类选择与跳转，一类是无选择跳转，如 Tis 或 Tla 分期、身体状况差的患者直接行内镜下粘膜切除术，这一类跳转按既定顺序执行即可；另一类是多重选择跳转，如对于一名 R0 切除、分期为 T3、N0 的患者，术后治疗大约有两种方案供选择，即化放疗结合和化疗，其中化放疗又分为氟尿嘧啶类联合化疗或 S-1 单药，在实际选择时，不仅要考虑方案本身的治疗效果、副作用、出现并发症的几率，还要考虑个体差异、患者生存质量以及经济承受能力等。对于大部分患者而言，疗效好、生存质量好是第一位的，然后会考虑住院时间和经济成本，患者或家属可以参与方案的选择与制订，疗效好、满足患者意愿的方案就是最适合的诊疗方案。

本节重点论述第二种选择的处理方法。系统需首先计算出相关数据，然后进行对比分析，做出最终选择。

4.2.1　*诊疗方案选择实例*

下面以术后化疗阶段（未接受过术前化疗）为例来说明最佳诊疗方案的生成过程：

a) 接收进入术后化疗阶段（未接受过术前化疗）的患者 patient。

b) 读取 patient 分期、身体健康状况等数据。

c) 获取流程自动生成的并行方案，这些方案是经过临床应用且专家论证疗效相当的，一般有 1 ~ 5 个。

d) 对各种方案进行评估、预测，包括治疗效果、生存质量、副作用、并发症、时间、费用。

e) 患者根据系统提供的选项，按优先级选择对治疗的个人趋向，如患者甲依次选择不想掉头发、最短住院天数、最低费用等。

f) 系统依据选项提供最佳方案。

g) 根据既定方案进行一个疗程的治疗。

h) 本疗程结束后评估。

i) 如果评估好，继续执行满 6 ~ 8 次化疗和或放疗结束；如果复发，转入复发治疗；如果生存质量评分差，根据患者意愿转入步骤 c)（去除当前方案）或者直接转入最佳支持治疗。

j) 转入随访阶段。

其中步骤 d) 涉及到的评估依据前面提到的 RECIST 和 WHOQQL-100 评估。

4.2.2　诊疗方案性能评估

由于系统提供的诊疗方案都是经专家论证疗效比较好的,在疗效相当的前提下,应尽量缩短诊疗周期、住院天数以及经济成本。诊疗路径模型的时间、成本估算,不考虑肿瘤并发症、突发事件、患者终止诊疗等特殊事件的处理。

系统采用 HTCPN 建模,模型主要包括串行结构、选择结构、并行结构和循环结构。设某结构由 n 个变迁 $t_1, t_2, \cdots, t_n$ 组成,这 n 个变迁的执行时间和经济成本为 n 个互相独立的随机变量 T_i 和 C_i,且分别服从参数为 $\left(\frac{1}{\alpha_1}, \frac{1}{\alpha_2}, \cdots, \frac{1}{\alpha_n}\right)$,$\left(\frac{1}{\beta_1}, \frac{1}{\beta_2}, \cdots, \frac{1}{\beta_n}\right)$的指数分布,则当结构为串行、选择、并行、选择时,其等效变迁的执行时间[16,17]和经济成本分别为

$$T=\begin{cases}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{\alpha_i} & \text{(serial structure)}\\ \sum_{i=1}^{n}\frac{\gamma_i}{\alpha_i} & \text{(selection structure, } P(t_i)=\gamma_i,\ \sum_{i=1}^{n}\gamma_i=1)\\ \sum_{i=1}^{n}\frac{1}{\alpha_i}-\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\frac{1}{\alpha_i+\alpha_j}+\sum_{i=1}^{n-2}\sum_{j=i+1}^{n-1}\sum_{k=j+1}^{n}\frac{1}{\alpha_i+\alpha_j+\alpha_k}+\cdots+ & \\ (-1)^{n-1}\frac{1}{\sum_{i-1}^{n}\alpha_i} & \text{(parallel structure)}\\ \frac{1}{\alpha_1}\times N & \text{(loop structure, } t_1=t_2=\cdots=t_n\text{, Cycle Count}=N)\end{cases} \tag{1}$$

$$C=\begin{cases}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{\beta_i} & \text{(serial structure)}\\ \sum_{i=1}^{n}\frac{\gamma_i}{\beta_i} & \text{(selection structure, } P(t_i)=\gamma_i,\ \sum_{i=1}^{n}\gamma_i=1)\\ \sum_{i=1}^{n}\left|\frac{1}{\beta_i}\right|-\sum_{i=1}^{n}\sum_{j>i}\left|\frac{1}{\beta_i}\cap\frac{1}{\beta_j}\right|+\sum_{i=1}^{n}\sum_{j>i}\sum_{k>j}\left|\frac{1}{\beta_i}\cap\frac{1}{\beta_j}\cap\frac{1}{\beta_k}\right|+ & \\ (-1)^{n-1}\left|\frac{1}{\beta_1}\cap\frac{1}{\beta_2}\cap\cdots\cap\frac{1}{\beta_n}\right| & \text{(parallel structure)}\\ \frac{1}{\beta_1}\times N & \text{(loop structure, } t_1=t_2=\cdots=t_n\text{, Cycle Count}=N)\end{cases} \tag{2}$$

5　案例分析

本章模拟不同身体状况的患者进行分析,图 7 是其中 5 名患者的诊疗路径。

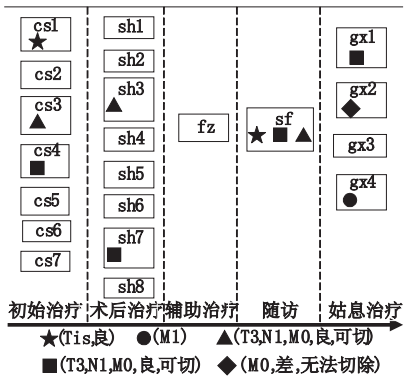

图7　诊疗路径仿真结果

由图 7 可以看出,在每一阶段,随着病情的发展,都有不同的诊治方案,整个路径是动态变化的。其中涉及到疗效相当的并行方案时,对方案的生存质量、时间、经济成本进行评估,依据评估结果和患者意愿,最终选定方案,具体如表 1 所示。由表 1 可以看出,即使初始身体状况相同的患者,由于病情发展的不同、患者意愿及个体差异,最后选定的方案也各不相同。经比对,诊疗方案与实际病历基本吻合,达到了诊疗路径建模的目的。

表 1　并行方案评估与选定表

患者	身体状况	方案	患者意愿	评估	选定
●	M1	gx1,gx4	排斥化疗		gx4
▲	T3,N1,M0,良,肿瘤可以切除	cs3,cs4,cs5	及早治疗	$T_{cs3_start} > T_{cs3_start} > T_{cs3_start}$	cs3
▲	T3,N1,M0,良,肿瘤可以切除,R0	sh3,sh4	(疗效/费用)高者优先	$(e/c)_{(sh3)} > (e/c)_{(sh4)}$	sh3
▲	T3,N1,M0,良,肿瘤可以切除,R0	sh3(1),sh3(2)	经济成本低、住院时间短	$C_{sh3(1)} \approx C_{sh3(2)}$ $T_{sh3(2)} > T_{sh3(2)}$	sh3(2)
■	T3,N1,M0,良,肿瘤可切	sh3,sh4	恐惧手术		sh4
◆	M0,差,肿瘤无法切除	cs6,cs7	生存质量高	$W_{CS7} > W_{CS6}$	cs7

6　结束语

本文利用分层赋时着色 Petri 网对胃癌诊疗路径进行建模。建模时遵循病情发展规律对诊疗过程分层设计,并设置阶段标记;定义时间约束,对患者身体状况、诊疗方案、疗效、费用着色。系统改进了 Petri 网的时间分析算法,提出了 Petri 网的成本分析算法,并基于以上算法定量评估对比并行诊疗方案。系统从患者需求出发,以提高诊疗效果和患者生存质量为目标,生成随病情发展而变化、符合患者需求的临床诊疗路径,并与实际病历基本相符,验证了临床路径的准确性和有效性,可以为临床医生提供有效的决策支持,系统的建模和分析方法可以为复杂病种的建模提供参考。

参考文献:

[1] 韩仁东,李书章,杨宏桥,等. 基于多 agent 的临床路径仿真建模方法[J]. 系统仿真学报,2010,22(7):1561-1565.

[2] ABIDI S S R, CHEN H. Adaptable personalized care planning via a semantic Web framework[C]//Proc of the 20th International Congress of the European Federation for Medical Informatics. Maastricht: IOP Press,2006:226-229.

[3] HURLEY K F, ABIDI S S R. Ontology engineering to model clinical pathways: towards the computerization and execution of clinical pathways[C]//Proc of the 20th IEEE International Symposium on Computer-Based Medical Systems. Washington DC: IEEE Computer Society,2007:536-541.

[4] Di LEVA A, OCCHETTI D, REYNERI C. The PARADIGMA project: an ontology based approach for cooperative work in the medical domain[C]//Proc of EMOI-INTEROP Conference. 2004:126-129.

[5] 阮莹,苏强,李飞飞,等. 基于流程挖掘的临床路径设计[J]. 计算机工程,2010,36(4):271-272,275.

[6] 赵艳丽,江志斌,李娜. 基于分层赋时着色 Petri 网的临床路径建模[J]. 上海交通大学学报,2010,44(2):252-258.

[7] BRAGATO L, JACOBS K. Care pathways: the road to better health services[J]. Journal of Health Organization and Management, 2003,17(3):164-180.

[8] CHEAH J. Development and implementation of a clinical pathway program in an acute care general hospital in Singapore[J]. International Journal for Quality in Health Care,2000,12(5):403-412.

[9] Van der ASLST W M P. The application of Petri nets to workflow management[J]. Journal of Circuits,Systems and Computers,1998, 8(1):21-66.

[10] VASILIS G, ACHILLES K, PANAYOTIS P. Comparative study and categorization of high-level Petri nets[J]. The Journal of Systems and Software,1998,43(2):133-160.

[11] CHAO Ou-yang, WINARJO H. Petri-net integration-an approach to support multi-agent process mining[J]. Expert Systems with Applications,2011,38(4):4039-4051.

(下转第 464 页)

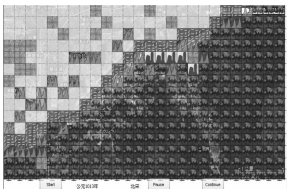

图5 (k=9, p=1.2时)五代窑址演变模拟结果

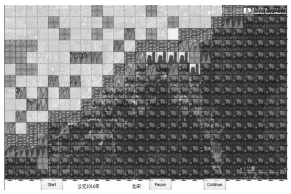

图6 (k=9, p=0.8时)北宋窑址演变模拟结果

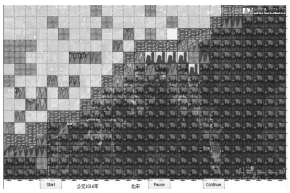

图7 (k=9, p=0.4时)北宋窑址演变模拟结果

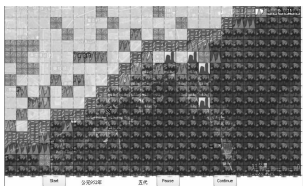

图8 (k=7, p=0.8时)五代窑址演变模拟结果

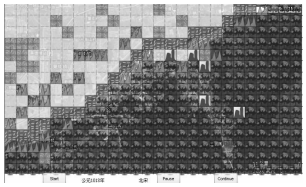

图9 (k=7, p=0.4时)北宋窑址演变模拟结果

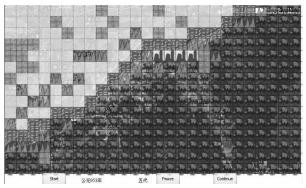

图10 (k=6, p=0.8时)五代窑址演变模拟结果

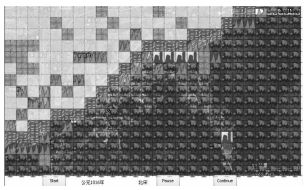

图11 (k=6, p=0.4时)北宋窑址演变模拟结果

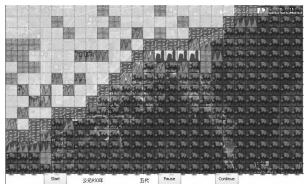

图12 (k=6, p=1.2时)五代窑址演变模拟结果

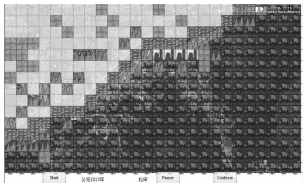

图13 (k=6, p=0.8时)北宋窑址演变模拟结果

得来,常用来描述空间的自相关性,其计算公式为

$$I=\frac{n}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ji}}\times\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}(x_i-\bar{x})(x_j-\bar{x})}{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2} \tag{7}$$

其中:n 是参与分析的空间单元数;x_i 和 x_j 分别表示某属性特征在空间单元 i 和空间单元 j 的观测值;W_{ij} 是研究范围内空间单元 i 与 j 的空间相邻权重矩阵,如相邻则为 1,不相邻则为 0。本文采用 Moran's I 指数进行模型检验,表 1 结果检验后如表 2 所示。

从表 2 中不难发现,当 $K=7$ 时得到的结果(图 3、4)和(图 8、9)与实际情况吻合最好,这表明候选目标的选取应与该研究区域窑址数量成两倍左右关系,过高易产生过多的窑址,过低又可能丢失窑址;另外,尽管图 3、4 和图 8、9 的 Moran's I 指数相同,但演变过程是从前往后的,因此应把两个朝代模拟结果图片联系起来,结合专家推断湖田窑与杨梅亭窑于五代开始兴烧,延续至北宋以后,得出图 8、9 优于图 3、4。五代概率阈值高于北宋概率阈值符合梯度选址的实际情况,地理条件最为便利的地点(即转换概率阈值最大的)首先被选做窑址,而后因为最优点已被用做窑址,所以在下一朝代只能选地理条件相对便利的地点(即转换概率阈值较大的)做窑址。

表 2 Moran's I 指数对比

Moran's I index	年代		主要参数值				
	五代	北宋					
实际值	0.1736	0.1740	K 值	概率阈值 P			
模拟值	0.1754(图 3)	0.1754(图 4)	7	五代	1.2	北宋	0.8
	0.2342(图 5)	0.2342(图 6)	9	五代	1.2	北宋	0.8
	0.2342(图 5)	0.2342(图 7)	9	五代	0.8	北宋	0.4
	0.1754(图 8)	0.1754(图 9)	7	五代	0.8	北宋	0.4
	0.2335(图 10)	0.2444(图 11)	6	五代	0.8	北宋	0.4
	0.2335(图 12)	0.2335(图 13)	6	五代	1.2	北宋	0.8

4 结束语

本文尝试利用 PSO 算法在空间上能快速搜索和寻优的特点,结合 CA 模型对景德镇南河流域窑址景观在五代至北宋这段历史时期的演变进行了模拟,对比分析了不同 K 值和概率阈值下的模拟情况,最终确定了适合的取值,在此取值下,模拟结果得到的 Moran's I 指数与实际情况下的 Moran's I 指数比较接近,证明模拟的空间格局与实际情况吻合较好。说明该模型能解决 GIS 空间数据缺失下的景观演变问题。

参考文献:

[1] GALE S, OLSSON G, TOBLER W R. Cellular geography[M]//Philosophy in Geography. Boston: D. Reidel Publishing Company, 1979:379-386.

[2] LIU Xiao-ping, LI Xia, LIU Lin, *et al*. A bottom-up approach to discover transition rules of cellular automata using ant intelligence[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2008,22(11): 1247-1269.

[3] 杨青生,黎夏. 基于遗传算法自动获取 CA 模型的参数——以东莞市城市发展模拟为例[J]. 地理研究,2007,26(2):229-237.

[4] 黎夏,叶嘉安. 知识发现及地理元胞自动机[J]. 中国科学 D 辑:地理科学,2004,34(9):865-872.

[5] 吴志诚,肖绚. 基于二维概率元胞自动机的 HBV 动力学模型[J]. 计算机工程与应用,2008,44(4): 201-203.

[6] 黎夏,刘小平,李少英. 智能式 GIS 与空间优化[M]. 北京:科学出版社,2010.

[7] 周成虎,孙战利,谢一春. 地理元胞自动机研究[M]. 北京:科学出版社,2001.

[8] 冯永玖,童小华,LIU Yan,等. 城市形态演化的粒子群智能随机元胞模型与应用——以上海市嘉定区为例[J]. 地球信息科学学报,2010(1).

[9] 景德镇市地方志办公室. 中国瓷都·景德镇市瓷业志[M]. 景德镇:方志出版社,2004.

[10] 陆琳,冯青,汪和平,等. 景德镇窑外形演变历史的研究[J]. 中国陶瓷,2008(2):51-53.

(上接第 461 页)

[12] 童隽. 基于时间 Petri 网的工作流建模及应用[D]. 金华:浙江师范大学,2010.

[13] XIAO Zhi-jiao, ZHONG Ming. A method of workflow scheduling based on colored Petri nets[J]. Data & Knowledge Engineering, 2011,70(2):230-247.

[14] 李海凌,史本山,刘克剑. 基于 Petri 网的建设工程项目实施阶段资源建模与仿真[J]. 计算机应用研究,2011,28(12): 4593-4596.

[15] 韩立岩,刘慧,韩璐. 基于多层次 Petri 网的复杂产品分布协同研发体系设计方法[J]. 系统工程与电子技术,2011,33(6):1276-1282.

[16] 景熠,王旭,李文川. 广义随机 Petri 网在生态产业园区性能分析中的应用[J]. 计算机应用研究,2011,28(6):2133-2136.

[17] 王永磊. 基于 Petri 网的工作流模型在物流管理系统中的应用[D]. 成都:西南财经大学,2008.