软件学报 ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software,2016,27(7):1757−1771 [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004834]

E-mail: jos@iscas.ac.cn
http://www.jos.org.cn
Tel: +86-10-62562563

ProMiner:系统性质驱动的双向一致性检验框架*

葛徐骏[1], 王 玲[1], 徐立华[1], 郭 建[2], 朱惠彪[2]

[1](华东师范大学 计算机科学技术系,上海 200241)

[2](上海市高可信计算重点实验室(华东师范大学),上海 200062)

通讯作者: 徐立华, E-mail: lhxu@cs.ecnu.edu.cn, http://www.ecnu.edu.cn

摘 要: 在模型驱动软件开发过程中,基于模型的测试方法往往用于检验软件代码针对软件模型的一致性以确保软件质量.然而,随着当今软件系统规模的不断扩大,相应的软件开发过程也变得越来越灵活,代码有时会先于模型被修改,以更忠实地体现系统功能和实现机制.传统的基于模型的测试方法只能检测代码之于模型的一致性而不能反作用于模型层面,模型的修改者只能人为地评估修改的正确性,大大降低了效率并增加了系统的潜在隐患.为此,对传统基于模型的测试方法的一致性检验进行了扩展,实现了一致性检验框架 ProMiner,通过抽取表达模型与代码的不一致的系统性质来自动定位模型中与实际运行系统不匹配的部分,并将其表示为可直接用于模型检测的线性时序逻辑(LTL)表达式,以支持软件模型和代码间双向的一致性检验.实验结果表明,ProMiner 可有效查找软件模型和代码间的不一致并生成可直接检测模型的系统性质,从而实现了自动化的模型与代码间的双向一致性检测,不仅提高了一致性检测的有效性,而且大大减少了人力开销.

关键词: 一致性检验;模型检测;基于模型的测试;线性时序逻辑

中图法分类号: TP311

中文引用格式: 葛徐骏,王玲,徐立华,郭建,朱惠彪.ProMiner:系统性质驱动的双向一致性检验框架.软件学报,2016,27(7):1757−1771. http://www.jos.org.cn/1000-9825/4834.htm

英文引用格式: Ge XJ, Wang L, Xu LH, Guo J, Zhu HB. ProMiner: Bi-Directional consistency checking framework based on system properties. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2016,27(7):1757−1771 (in Chinese). http://www.jos.org.cn/1000-9825/4834.htm

ProMiner: Bi-Directional Consistency Checking Framework Based on System Properties

GE Xu-Jun[1], WANG Ling[1], XU Li-Hua[1], GUO Jian[2], ZHU Hui-Biao[2]

[1](Department of Computer Science and Technology, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

[2](Shanghai Key Laboratory of Trustworthy Computing (East China Normal University), Shanghai 200062, China)

Abstract: Model-Driven development is currently a highly regarded software development paradigm among software developers and researchers, and model-based testing techniques are usually applied during the development to ensure the quality of software systems. With the growing size and complexity of software systems, maintaining the consistency between software models and their implementation become more and more challenging. While traditional model-based testing focuses on ensuring the software implementation comply with its designed model, this work addresses particularly the situation where the implementation is modified while software models are left outdated due to workarounds or other unexpected changes during development. The paper presents an

* 基金项目: 上海市自然科学基金(13ZR1413000); 核高基重大专项(2014ZX01038-101-001); 国家自然科学基金(61502170, 91118008); 国家基金委国际合作项目(中丹)(61361136002); 国家基金委创新研究群体项目(61321064)

Foundation item: Natural Science Foundation of Shanghai (13ZR1413000); National Science and Technology Major Project (2014ZX01038-101-001); National Natural Science Foundation of China (61502170, 91118008); NSFC Projects of International Cooperation and Exchanges (61361136002); Science Fund for Creative Research Groups of the National Natural ScienceFoundation of China (61321064)

收稿时间: 2014-08-14; 修改时间: 2014-11-04, 2015-01-27; 采用时间: 2015-03-11

automated consistency checking framework, ProMiner, which extends traditional model-based testing with mining software properties that represent the identified inconsistencies as linear temporal logic (LTL). Experiments show that this extended consistency checking technique effectively helps software designer to narrow down the specific locations of software models that need to be updated with respects to its running implementation.

Key words: consistency checking; model checking; model-based testing; linear temporal logic

大型的软件系统由于对系统安全性和可靠性有较高要求,往往选择模型驱动[1]的软件开发方法[2],即,软件代码遵循被验证过的软件模型定义实现,因此,软件实现与其相对应的模型之间的一致性及其检测始终应贯穿于软件开发的整个过程.由于软件模型一般情况下反映了系统需求,上述一致性检测方法往往假设模型的正确性,采用基于模型的测试方法(model-based testing)[3],即:先从模型中生成抽象测试用例(abstract test cases),再将测试用例具体化后运行于代码,通过检查测试用例是否全部通过来评估软件与代码的一致性.

但是,随着软件规模的不断复杂化、多样化,软件的开发流程也变得越来越灵活.而实际开发中产生的需求变更、反向工程、项目重构等特殊要求,事实上导致了代码先于模型被修改.另外,在高可信、高安全软件系统中,需要对软件系统中某些关键性部分加以形式化的验证.该过程需要从对应的代码中抽取形式化模型,而这一过程往往又只能靠人工或半自动方法完成,并不能保证最终模型与代码的一致性.上述情况下,需要同时考量软件模型的更新,保证软件模型与实际运行代码的一致.

目前,对上述问题的解决方法大致可以分为如下 4 类.

(1) 人工审查:主要依靠人工审核,适应范围广.这种方式的检查结果受人为因素影响较大,而且审查过程比较繁琐,工作量大;

(2) 元模型法[4]:自然的扩展语言,通过形式化元模型来减少不确定性,通过修改或者扩展元模型达到更容易进行一致性检测的目的.但是,这种方法对选择的语义有着严格的约定;

(3) 约束法:强化元语言,提供更好的约束,通过拥有更好的约束来减少不确定性,例如扩展 OCL;或其他的约束描述语言,比如图形一致性条件(graphical consistency conditions,简称 GCC).但是,这种方法实现起来较为困难,通常需要访问一些不易提供的元数据;

(4) 形式化表示法[5]:最常见的方法,一致性检查相对容易实现,同时可以提供一致性管理框架.将模型转换到一些形式化表示中,要求所选择的形式化表示要有好的工具支持,有可能执行效率不高和工具集成比较困难.上述方法对比基于模型的测试方法,虽然可以一定程度上避免代码先于模型改变造成的问题,但往往难以做到通用化或自动化.

为了全面、有效地发掘软件模型和代码中潜在的不一致问题,本文对传统的基于模型的测试方法进行扩展,提出了基于系统性质的一致性检测技术(extended consistency checking),并实现了一致性检验框架 ProMiner,以达到如下几点要求:

(1) 同时考虑模型需要遵从实际运行系统代码而更新的情况;

(2) 准确地定位不一致所在,并将结果以合理的形式表示;

(3) 结果可以对修改后的模型作机械化的校验,以减少人为因素;

(4) 检验过程本身要尽可能地自动化并在较短的时间内完成.

ProMiner 对传统的基于模型的测试方法进行扩展,抽取代表软件模型与实际运行代码不一致的系统性质,选取线性时序逻辑(linear temporal logic,简称 LTL)[6,7]表达体现,可以直接用于模型检测[8,9],帮助定位模型中的不匹配部分,并且在后续对模型的修改过程中继续检查修改是否成功地修正了不一致问题.ProMiner 无需程序员人工进行模型与代码的一致性评估,可以有效地减少不必要的工作量以及安全隐患的人为因素.图 1 展示了 ProMiner 所支持的两种一致性检验流程,ProMiner 在其中分别扮演了基于模型测试与获取系统性质的角色.

为了验证 ProMiner 的有效性,我们将其运用于对安全性要求较高的实际工业界项目——多功能智能卡项目,该项目为工业界 ISO-7816 标准的一个实现,展示该方法在实际开发中的应用和效果.同时,我们也通过为两个 Event-B 示例模型编写代码并使用 ProMiner 进行 LTL 生成,以进一步地对实验进行补充,从而探讨 ProMiner

在实践中的作用.我们发现:ProMiner 能在较短的时间内找到超过 90%的不一致,并且其生成的 LTL 公式确实能够有效帮助开发人员校验模型的修改.在第 3 节、第 4 节中,我们将具体描述 ProMiner 的实现架构和实验情况.

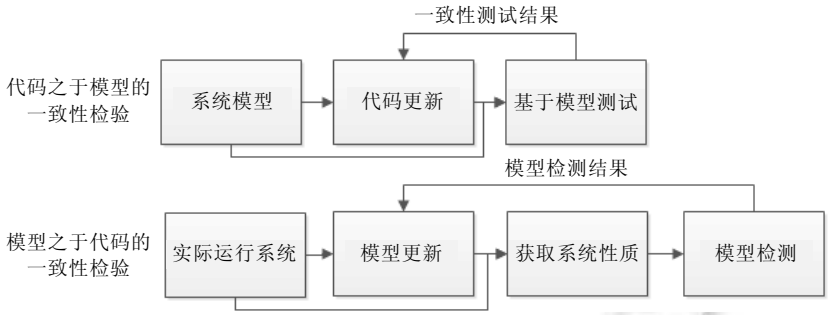


Fig.1 Two different processes for consistency checking

图 1 两种不同的一致性检验流程

1 技术概览

ProMiner 实现了代码与系统模型间双向的一致性检验,不但对于系统代码进行基于模型的测试方法,同时可以基于实际系统实现对系统模型进行一致性检验.与传统的基于系统模型的一致性检验方法相比,ProMiner 在测试的基础上将代码与模型的不一致性质表达为 LTL 形式,以供模型更新时检验.

ProMiner 现阶段实现于形式化建模语言 Event-B[10]和其开源 IDE Rodin[11]之上.Event-B 模型包含了自动机(machine)、场景(context)、证明义务(proof obligations)及精化(refinement),其核心为基于状态迁移系统的抽象自动机.该自动机对动态系统行为的抽象可表示 $Machine:=\langle State,Event\rangle$,也可以包括一些描述系统性质的不变式或断言谓词.

- *State* 状态为一组代表系统状态的 *Variable* 对一个值空间的满射,形为 $State:=\{var1=value1;var2=value2;\ldots\}$,*var* 为变量名,*value* 为取值;
- *Event* 事件为一组代表系统状态迁移的迁移,*Event* 可表示为 *Event*:=any (*var*) where (*condition*) then (*action*) end,意为对参数集 *var*,在前置条件集 *condition* 下可执行 *action*;特别地,对每个 Event-B 模型需要一个特别的 $INITIALIZATION\in Event$,表示模型的初始化.

另外值得指出的是:我们提出的一致性检验方法并不局限于特定的语言,ProMiner 也可以扩展于其他能够表达抽象状态机的形式化语言.

1.1 基本流程

如上所述,ProMiner 既包括了传统的基于模型的测试方法,又包括了我们所扩展的模型之于实际运行系统代码的反向一致性检测.同时,在迭代式软件开发过程中,由于模型和代码的版本持续不断地发生变化,该一致性检测过程也是持续进行的,或者说一致性检测流程会随着软件版本的迭代而多次进行.

图 2 为 ProMiner 工作原理的基本流程图.

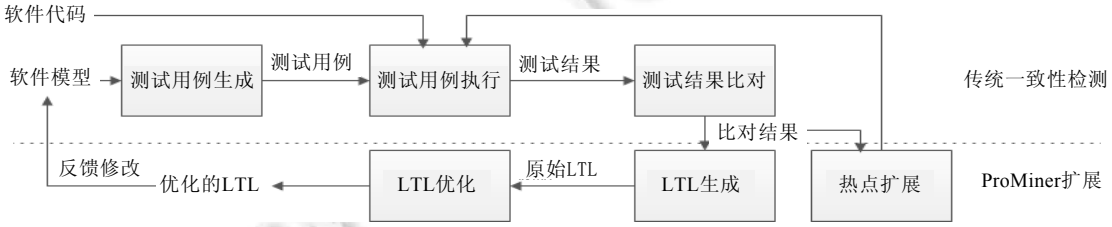


Fig.2 ProMiner overview

图 2 ProMiner 的基本流程

ProMiner 既包括了传统基于模型的一致性检验方法,又包括了生成 LTL 系统性质的扩展.其组件主要包括:测试用例生成器、测试用例执行插件、结果比对器、热点扩展器、LTL 生成器.首先,ProMiner 根据软件模型生成测试用例;然后,在代码层面加以执行.如果模型先于代码修改,则生成基于模型测试的测试报告;否则,生成表达模型与代码不一致所在的 LTL 公式并加以简化.对于某些复杂的功能和可能出现不一致的代码片段(我们定义为“热点”,即:其不一致产生的可能性和重要性都较高,需要进一步深入分析),可以允许使用者利用热点扩展功能产生更多的测试用例以加强检验过程的可靠性.在每一轮 LTL 生成之后,用户可以通过将 LTL 公式用于模型检查工具以帮助修正自己的模型中的不一致.该过程可能需要多次迭代,以保证所有的不一致最终都能被修正.本节后续部分将详细讨论其中每一步.

为了更好地展示 ProMiner 的工作原理,我们这里使用一个简单的电热水壶系统作为例子.该系统将一个热水壶抽象为以下状态:盖子的开闭、电源的开闭、水的高度,而盖子与电源的打开/关闭以及添水/倒水作为其可用的事件.另外,其必须满足在无水或盖子打开时不得打开电开关作为安全不变式.一个形式化描述为:

Machine:=*WaterBoiler*

State:={*cap*∈{*open*,*close*},*switch*∈{*on*,*off*},*water_height*∈{0,1,2,3}};

Event:={*INITIALIZATION*,*cap_open*,*cap_close*,*switch_on*,*switch_off*,*water_add*(*int*),*water_pour*(*int*)};

Invariants:={!(*switch*=*on* and *water_height*=0)};

其中,*INITIALIZATION* 事件后,*cap*=*open*,*switch*=*off*,*water_height*=0;*water_pour*/*water_add* 的参数取值为{1,2,3},且需要前置条件 *cap*==*open*;*switch_on* 的前置条件为检查 *water*!=0.

1.2 测试用例生成与热点扩展

传统的基于模型的测试方法最基本的两个步骤便是测试用例的生成和执行,对于继承了其特点的 ProMiner,这两个步骤同样将为后续步骤提供基本的数据支持.

ProMiner 针对 Event-B 模型生成抽象测试用例.Event-B 模型是对被建模系统的状态迁移的行为描述,ProMiner 生成的每个测试用例即对应于模型中定义的一条执行路径,以 *TestCase*=*list*(⟨*INITIALIZATION*,*state*⟩,⟨*event*,*state*⟩,⟨*event*,*state*⟩,…)的形式记录,即,一组由⟨触发事件,系统到达状态⟩二元组组成的线性表.

以前文所述热水壶系统为例,ProMiner 生成的测试用例可以是:

TestCase=*list*(⟨*INITIALIZATION*,{*cap*=*open*,*switch*=*off*,*water_height*=0}⟩,
⟨*water_add*(3),{*cap*=*open*,*switch*=*off*,*water_height*=3}⟩,
⟨*cap_close*,{*cap*=*close*,*switch*=*off*,*water_height*=3}⟩,
⟨*switch_on*,{*cap*=*close*,*switch*=*on*,*water_height*=3}⟩.

该用例描述了模型层可能的一条执行路径即系统经历的一系列触发事件及其导致的状态变化:⟨初始化事件,初始状态⟩,⟨倒满水,水高变为 3⟩,⟨关壶盖,壶盖状态变为关⟩,⟨打开电源开关,电源状态变为开⟩.

ProMiner 的自动化测试用例生成器是基于开源工具 Event-B MBT[12]开发的,对系统状态迁移提供不同路径覆盖方式,如全路径遍历、全迁移覆盖、有限路径长度覆盖等.其中,全路径遍历是指遍历所有可能的路径,全迁移覆盖是指覆盖所有的迁移状态,有限路径长度覆盖是指覆盖指定的路径长度.默认方案为全迁移覆盖,因为通常情况下,对全迁移的覆盖已经足够测试模型定义的所有可能行为了,也可由用户自己决定路径覆盖方式以寻找时间和覆盖度的平衡点.与 Event-B MBT 不同的是,为了实现双向一致性检验,ProMiner 测试用例不但记录执行路径中状态迁移的触发事件,更重要的是将每一状态迁移后的系统到达状态都记录下来,并同时规范测试用例的表达方式,即图 3 所述的 xml 格式.

另外,虽然在模型规模较小时遍历所有实际的参数并不会有太大的影响,但当参与事件的参数较多且取值范围较大时,覆盖全部参数取值会导致路径爆炸.默认情况下,Event-B MBT 只会取参数取值范围中第 1 个可枚举值.例如,热水壶例子中的 *water_add*/*water_pour* 的可选参数为{1,2,3},测试生成时只取值 1,而这显然会造成测试精确度的损失,导致部分可能产生不一致的路径由于参数取值的缺失而不被覆盖.ProMiner 则通过与用户交互和测试结果反馈,对这些潜在的易出现不一致的“热点”进行扩展.通过对系统中的这些热点信息覆盖生成

更多的测试用例,覆盖更多的路径,这也是 ProMiner 为了平衡基于模型的测试中对模型路径覆盖率和时间效率的关系所作的一个改进.

```
⟨test_case 1⟩
...
⟨event name="water_add"⟩
⟨value⟩1⟨/value⟩
⟨event⟩
⟨state⟩
⟨variable name="cap" value="open"/⟩
⟨variable name="switch" value="off"/⟩
⟨variable name="water_height" value=1/⟩
⟨state⟩
...
```

Fig.3 The format of test cases

图 3 测试用例格式

ProMiner 定义的热点主要集中在两个区域:

- 在下文测试结果比对过程中已经确认出现不一致的事件及其导致的状态变化.

为了做到精确定位,热点扩展器将通知测试用例生成器对这些区域生成更多测试用例.例如:若进行 *water_add* 操作时,当参数仅取 1 时,检测出了不一致的存在,则在下一轮迭代生成测试用例时,会将参数的整个取值范围即{1,2,3}都加入取值范围(但是在取值范围超过 5,如 1,...,100 时,用户可以选择随机策略或者全选策略).

- 用户自定义的热点事件.

测试用例生成器会对这些自定义区域生成额外的测试用例,用以帮助找到更多不一致.

生成的测试用例将以增量的方式在原有的测试用例基础上扩大热点事件的参数取值范围,以生成更多的测试用例,再次进行执行和结果比对.而在得到结果后,用户可以选择是否需要再次进行扩展.故其与测试生成步骤将产生一个持续化的回环,允许多次迭代.同时,我们也认识到:现阶段,热点扩展器虽然能够提高 ProMiner 对系统性质抽取的精确度和可信度,但需要通过与用户互动运作,因而会增加用户一定的工作量.因此,现阶段其被作为一个可选用部件,可以根据具体情况决定是否使用该功能.

1.3 测试用例的执行

ProMiner 提供了一套生成基本的运行环境的框架(由于实验项目,目前只提供了 C++支持),可以读入模型中生成的测试用例,模拟该用例执行过程,并将运行的结果以与输入的测试用例相同的 xml 格式输出,其基本执行流程如图 4 所示.通常来说,基于模型的测试方法在执行时需要将抽象测试用例在待测系统的代码层面加以具体化,即:将模型中的 Event 和 State 与代码层面的若干函数调用和代表系统状态的变量的值相联系,从而使得抽象测试用例在代码层可执行并可监控.由于这种抽象到具体的关系本身是不可控的,而软件工程师采用的开发方式也不尽相同,在执行这些抽象测试用例时是需要一定人工操作的.用户在扩展 ProMiner 的这一功能时,主要需编写一部分代码定义模型中的 *State* 与代码中的变量的对应关系,以及模型中的 *Event* 与代码中的函数或执行片段的对应关系,形如:

```
…
map⟨string,string⟩PRunner::state(){
…
if (water_boiler.get_cap_state()==CAP_OPEN)
state["cap"]="open";
else
state["cap"]="close";
```

```
…
}
…
voidPRunner::run_event(string next_event) throws Exception {
if …
else if (next_event==“cap_open”){water_boiler.cap_open();}
…
}
```

定义的是模型中 *cap* 开关状态与代码中 *water_boiler* 对象中 *cap* 字段的对应关系,以及模型中 *cap_open* 事件与代码中 *water_boiler* 对象中 *cap_open*()方法的对应关系.

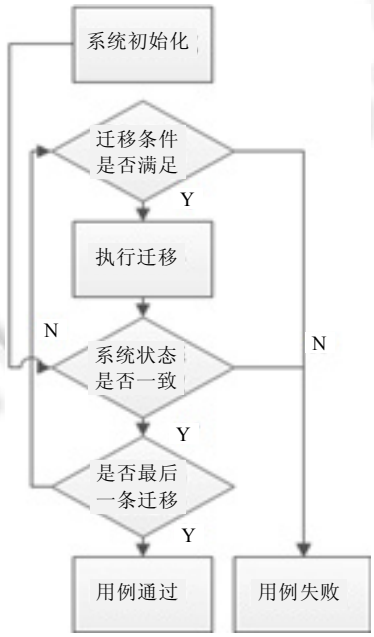


Fig.4 The execution flow of test cases

图 4 测试用例执行

ProMiner 根据测试用例依次从代码中直接调用用户所绑定的函数,并检查是否有异常产生(主要为了检查前置条件是否满足和其他运行时错误)或者在每次调用了某个 *event* 之后检查是否出现了不符合预期的 *State* 值.执行每一步之后,都会将该步所绑定的触发事件与到达状态作为执行结果保存,对应为测试用例中的一个迁移,故执行结果输出的 xml 可以与输入的测试用例相对应且反映代码层的行为.这种插件化的扩展方式是 ProMiner 在减少用户负担和灵活性上的折衷方案.

1.4 测试结果的自动比对

ProMiner 的比对器自动地对测试用例生成器中产生的测试用例及其执行结果进行比较.比对器的输入为原始的测试用例和测试用例的执行结果,如果在上一步的测试用例执行中出现了模型与代码的不一致的情况时,两者将会出现不一致.ProMiner 的不一致检测主要就是基于这些不一致的判定和分类进行的.

ProMiner 的比对器服务于双向的一致性检验.当用于基于模型的测试方法时,与传统测试方法相类似,ProMiner 找出测试用例与执行结果不一致的部分,并根据这些不一致生成测试报告.测试报告中给出了测试用例的通过情况以及不一致出现的位置,即,在哪个测试用例的哪个迁移上.代码更新时,则可以根据该报告找出

需要修改的地方,并且复用上一步中产生的测试用例,重复进行自动化测试以检验更新后的代码是否与模型一致.本文中,由于我们主要介绍 ProMiner 对传统测试方法的扩展,故对测试报告及其应用部分暂不作为重点.

作为对上述传统测试方法的扩展,ProMiner 比对器的特别之处在于其还可以用于模型之于代码的一致性检验.由于测试用例及其结果都是对系统状态迁移的路径覆盖,每个测试用例或执行结果相当于一个由迁移(边)和状态(点)构成的线性拓扑结构.所以当不一致产生时,基于模型的测试用例与其在代码层面的线性执行结果是有所不同的,两者可能出现其中某个状态变量赋值不同或者由于在测试执行时测试用例失败造成某个迁移根本无法执行的情况(如图 4 所示).

因此,ProMiner 比对器就是对测试用例和执行结果进行比较,将比对结果分类来反映软件模型与实际运行代码的系统结构的不一致.其自动化比较算法如下(这里,测试用例与执行结果由于格式相同统称为 *TestSuite*):

```
define Step pair(Event,State)
define TestCase list(Step1,Step2,…)
define TestSuite list(TestCase1,TestCase2,…)
initializeMismatch={}; conditionMismatch={}; stateTransitionMismatch={};
procedure testResultCompare(TestSuiteTSModel,TestSuiteTSCode)
foreach TestCaseTCModel in TSModel and TestCaseTCCode in TSCode do
foreach Step SModel in TCModel and Step SCode in TCCode do
if (SModel.event==Initialize and SCode.event==Initialize and SModel.state!=SCode.state) then
initializeMismatch.addMismatch(SCode.state);   //初始化不一致
else if (SCode==null) then   //在上一步基于模型的测试中,执行结果只会比测试用例短,如图 2 所示
conditionMismatch.addMismatch(SModel.event,lastStep.state);   //迁移条件不一致
else if (SModel.state!=SCode.state) then
stateTransitionMismatch.addMismatch(lastStep.state,SModel.event,SCode.state);   //状态改变不一致
end
lastStep=SModel
end
end
end procedure
```

现阶段,ProMiner 定义并寻找 3 类不一致的可能发生.注意:这里假定模型需要根据代码更改,且由于测试用例执行的特点(出错后停止执行)模型与代码在不一致出现的上一步 *lastStep* 是必然相同的.

- 初始化不一致.在初始化后模型与代码 *State* 不同:

$$(Model::INITIALIZATION \Rightarrow Model.state=state1)\&(Code::INITIALIZATION \Rightarrow Code.state=state2)\&(state1!=state2);$$

初始化变量不一致是由变量的初始值设定不同造成的,例如在热水壶系统中,如果代码在初始状态下 *cap==close*,那么就会与模型发生不一致.这类不一致相对比较简单.

- 条件不一致.*Event* 在代码中条件不满足:

$$\exists event \in Event \vdash (lastStep.state \in Model::event.condition)\&!(lastStep.state \in Code::event.condition);$$

条件不一致是由代码和模型中某个迁移的执行条件不同而造成的,在特定系统状态下,如果该类不一致存在会导致某些在模型中允许进行的迁移无法在代码层进行.例如在热水壶系统中,如果代码中除了像模型一样在 *switch_on* 操作前检查 *water_height*!=0,还额外地规定了 *water_height* 必须等于 3(亦即水满才能打开).那么在上一步测试用例执行过程中,可能会出现 *water_height*==1 的前提下执行了 *switch_on* 的操作,根据 ProMiner 的测试用例运行机制,该次测试用例执行会中止,从而检查出测试结果与原始测试用例的不同.类似的条件不满足的错误都会被归为此类别.

- 状态改变不一致.*Event* 的执行效果不同:

$$\exists event \in Event \vdash (lastStep.state \& Model.execute(event) \Rightarrow Model.state = state1) \&$$
$$(lastStep.state \& Code.execute(event) \Rightarrow Code.state = state2) \& (state1 != state2);$$

执行结果不一致是由于迁移本身行为上有不同而导致的,这个不一致会导致系统在某特定状态下执行某特定迁移后,造成系统状态变化出现不一致.简单地讲,就是某一步 *Event* 的运行结果不同.例如在热水壶系统中,代码层可能出现了这样的不一致:无论参数是多少,每次都会注满水或倒光水,即 *water_add*/*water_pour* 的参数无效,每次执行后 *water_height* 要么为 0,要么为 3.根据我们自己的开发经验,这种不一致可能是三者中最为普遍的.

另外值得解释的是:由于测试用例并不直接从代码中生成,故总是存在着代码对模型的额外组件不一致.即,代码中实现了建模时根本没有包括在内的组件.ProMiner 现阶段暂时未处理此类情况.在以后的研究中,我们会考虑通过结合模型中生成的测试用例和直接从代码中提取的测试用例来覆盖这类不一致.

1.5 LTL的转译

ProMiner 将比对结果的不一致转换为形式化表达方式,以帮助自动化验证模型的修改.目前,ProMiner 选用了 LTL 线性时序逻辑公式作为不一致的表达形式,其可以作为模型检测工具 ProB[13]**的系统性质表达方法,进而可以利用生成的 LTL 帮助用户自动化地验证更新后的模型是否满足之前的不一致性质.

比对器将测试用例及其执行结果的不一致以对象方式记录在内存中,即,二者出现不同时的触发事件与其可能到达状态.针对上文定义的 3 种不一致情况,ProMiner 所生成的 LTL 的结果为以下形式(具体实例参见表 1).

Table 1 Results from LTL optimization

表 1 LTL 生成结果示例

	原始LTL	优化后的LTL
初始化不一致	$G([INITIALIZATION] \Rightarrow X\{cap=close \& switch=off \& water\_height=0\})$	$G([INITIALIZATION] \Rightarrow X\{cap=close \& switch=off \& water\_height=0\})$
条件不一致	$G!(\{cap=open \& switch=on \& water\_height=3\} \Rightarrow e(switch\_on)) \& G!(\{cap=open \& switch=off \& water\_height=3\} \Rightarrow e(switch\_on))$	$G!(\{cap=open \& water\_height=3\} \Rightarrow e(switch\_on))$
状态改变不一致	$G(\{cap=open \& switch=on \& water\_height=0\} \& [water\_add(1)] \Rightarrow X\{cap=open \& switch=on \& water\_height=3\}) \& G(\{cap=open \& switch=on \& water\_height=0\} \& [water\_add(2)] \Rightarrow X\{cap=open \& switch=on \& water\_height=3\}) \& G(\{cap=open \& switch=on \& water\_height=3\} \& [water\_pour(1)] \Rightarrow X\{cap=open \& switch=on \& water\_height=0\}) \& G(\{cap=open \& switch=on \& water\_height=3\} \& [water\_pour(2)] \Rightarrow X\{cap=open \& switch=on \& water\_height=0\}) \& G(\{cap=open \& switch=off \& water\_height=0\} \& [water\_add(1)] \Rightarrow X\{cap=open \& switch=off \& water\_height=3\}) \& G(\{cap=open \& switch=off \& water\_height=0\} \& [water\_add(2)] \Rightarrow X\{cap=open \& switch=off \& water\_height=3\}) \& G(\{cap=open \& switch=off \& water\_height=3\} \& [water\_pour(1)] \Rightarrow X\{cap=open \& switch=off \& water\_height=0\}) \& G(\{cap=open \& switch=off \& water\_height=3\} \& [water\_pour(2)] \Rightarrow X\{cap=open \& switch=off \& water\_height=0\})$	$G(\{cap=open \& water\_height=0\} \& [water\_add(1)] \Rightarrow X\{cap=open \& water\_height=3\}) \& G(\{cap=open \& water\_height=0\} \& [water\_add(2)] \Rightarrow X\{cap=open \& water\_height=3\}) \& G(\{cap=open \& water\_height=3\} \& [water\_pour(1)] \Rightarrow X\{cap=open \& water\_height=0\}) \& G(\{cap=open \& water\_height=3\} \& [water\_pour(2)] \Rightarrow X\{cap=open \& water\_height=0\})$

- 初始化不一致

$$G([INITIALIZATION] \Rightarrow X\{SCode.state\}).$$

当比对时发生初始化不一致时,为了表达“模型初始化后的状态变化应该和代码初始化后的赋值一致”,ProMiner 记为上述 LTL 公式,意为总是在 *INITIALIZATION* 后,可推测出下一个状态为 *SCode.state*.

- 条件不一致

** ProB 使用了 LTL 的一个方言 LTLe 作为其验证公式.LTLe 在 LTL 的基础上扩展了对 *Event* 的支持.ProMiner 在上述翻译规则中使用到了 LTLe 的扩展部分.参见 http://www.stups.uni-duesseldorf.de/ProB/index.php5/LTL_Model_Checking

$$G!(\{lastStep.state\}\Rightarrow e(event)).$$

当比对时发生条件不一致时,由于前提条件不满足,*event* 根本不会执行,故不存在后续状态.为了表达“模型在特定条件下不可执行某个事件”,ProMiner 记为上述 LTL 公式,意为总是不能在 *lastStep.state* 条件下执行 *event*.

- 状态改变不一致

$$G(\{lastStep.state\}\&[event]\Rightarrow X\{SCode.state\}).$$

当比对时发生状态改变不一致时,模型与代码执行事件后的后续状态是不同的.为了表达“模型在执行某个事件后应该与代码执行该事件后的状态改变相一致”,ProMiner 记为上述 LTL 公式,意为总是在 *lastStep.state* 状态下且执行 *event* 后,可推测出下一个状态为 *SCode.state*.

其中,*SCode* 和 *lastStep* 出自上述比对算法的伪代码,*SCode.state* 指代代码在当前 *event* 行后的 *state* 赋值,*lastStep.,state* 指代 *event* 发生前 *state* 的赋值(由于不一致的 *event* 发生前代码与模型仍然是一致的,故上一步的状态两者是相同的).我们未考虑模型在不一致事件发生后的状态,因为生成的 LTL 要表达的是模型“应该改成什么样”而非“之前错在了哪里”.

比对器产生的每个不一致都会如上转换为一个 LTL 公式,作为最终整个表示所有不一致的 LTL 的一个子公式.当多个子公式被生成时,使用&符号将它们连接,可参见表 1 查看生成的 LTL 的示例.但仅仅通过直接转译得到的 LTL 公式由于未经过任何处理,可能导致冗余,影响它的可读性并降低模型检测时的执行效率,故实际使用时必须考虑将其优化.

1.6 LTL的合并优化

ProMiner 通过抽取系统性质反映模型与代码的不一致,但经过上一步骤转译的 LTL 公式在实际使用时往往会冗余,导致在使用模型检测工具时将花费过多的时间.事实上,LTL 模型检测的时间复杂度为 $O(|M|\times 2^f)$[8],其中,M 为模型的状态规模,f 为 LTL 的逻辑长度.显然,指数级时间复杂度在公式规模过大时将导致 ProB 的运行时间过长,因为在生成上述的 3 种 LTL 公式时,由于每个 *state* 是由多个变量构成的,另外,*event* 也可以接受多个参数,每个变量和参数都可以有一定的取值范围,故 LTL 在生成时,生成的 LTL 的规模对应于所有涉及到变量的笛卡尔积.

仍然以热水壶系统为例,假定在代码中 *water_add*/*water_pour* 的行为与模型出现不一致,无论参数取值多少,每次都会注满水或倒光水(为了更好地演示优化算法,这里先设定 *switcher=on* 时也可以倒水),属于上文所述的状态改变不一致.ProMiner 因为记录了每个变量在每次状态迁移后值的变化情况,转译出来的系统性质过长,见表 1.然而,系统中有 3 个变量,而这个不一致仅与 *water_height* 有关,加上 *water_add*/*water_pour* 操作本身要求 *cap=open*,理想状况下,最终生成的 LTL 公式只应包括 *water_height* 和 *cap* 而不包括 *switch*.然而,由于 ProMiner 从最初的测试用例生成开始就会记录下每个变量在每次事件发生后值的变化情况,最终依照上述步骤所生成的 LTL 公式仍然会带有其他实际上与该不一致无关的变量.换言之:与不一致毫无关系的变量 *switch* 的值也会被带入结果中,导致 LTL 子公式的数量加倍,并且每个子公式多带了一个无效变量.

而实际项目中随着变量的增多,无效变量也会随之增多,子公式则相应地以笛卡尔积的规模增加.为解决这一问题,ProMiner 的优化器通过以下 3 个步骤自动合并多个冗余的 LTL 公式并且删去无关的变量.

1. 获取所有变量的取值空间.

通过遍历原始测试用例得到.由于 ProMiner 测试用例生成时未必会覆盖整个模型的取值空间,可能会比原始模型的取值空间要小.

2. 根据 *Event* 将 LTL 子公式分成若干子集.

如前所述,比对器已将不一致分为了 3 类.在此基础上,由于 *Event* 是不一致产生的核心,多个 LTL 子公式可能源于同一个不一致,优化器继续根据每个 LTL 子公式对应的 *Event* 再次分类,遍历每类不一致下所有的 LTL 子公式,然后将 *Event* 名加参数作为键,将这些子公式存于哈希中.在上文 *water_add*/*water_pour* 的例子中,不一致将都被归入状态改变不一致,但分属 *water_add*(1),*water_add*(2),*water_pour*(1),*water_pour*(2)这 4 个不同子集

(当参数为 3 时,并不会发生不一致).

3. 遍历所有上一步骤中不一致 LTL 的子集以得到所有变量的取值空间.

每个未优化的 LTL 中包含的状态中每个变量的值都是有一个取值范围的,它会比步骤 1 的取值空间更小,比如例子中 $cap\in\{open\}$,$switch\in\{on,off\}$,$water\_height\in\{0,3\}$,*water_add*/*water_pour* 的参数 $height\in\{1,2\}$.

4. 在每个子集中,利用遍历法检查其中变量是否满足下述的条件,对满足条件的子公式进行合并并删去无效变量.
   - *State* 中含有某变量取值覆盖其整个取值空间;且若该不一致类型是上述的状态改变不一致,则该变量自身的值在迁移发生前后不发生改变.

这意味着该参数本身并不影响该 LTL 公式所描述的语义.例如,在例子中未经优化得到的 LTL 子式中,*switch* 的取值为{*on*,*off*},而且操作本身并未改变 *switch* 的值,也就是说,*switch* 并未影响该变量,故可以将{*switch*==*on* & *variable*1 & *variable*2 &…& *variable n*}和{*switch*==*off* & *variable*1 & *variable*2 &…& *variable n*}这两个子公式合并为{*variable*1 & *variable*2 &…& *variable n*},将子公式数量减半.同时,将该变量从最终结果中剔除.另外,对条件不一致而言,由于不用考虑变量在 *Event* 后的变化,其实更加简单,直接考察是否有变量的取值覆盖第 1 步中得到的整个取值空间即可;

- 利用表达式简化变量

ProMiner 目前支持赋值操作、取反操作、简单的数学运算等.比如扩展前述的不一致,假定代码中 *water_add* 仍然对参数有效,而 *water_pour* 无论参数为多少每次都会倒光水,从而无论 water_height 为 2 还是 3,在 *water_pour*(1)后,*water_height* 均会变为 0,那么可以将两个 LTL 子式 $G(\{cap==open\&water_height=2\}\&[water_pour(1)]\Rightarrow X\{cap==open\&water_height=0\})$和 $G(\{cap==open\&water_height=3\}\&[water_pour(1)]\Rightarrow X\{cap==open\&water_height=0\})$合并为

$$G(\{cap==open\&water\_height\in\{2,3\}\}\&[water\_pour(1)]\Rightarrow X\{cap==open\&water\_height=0\}).$$

值得注意的是:上述的优化过程事实上是“有损”的,因为虽然被舍弃掉的不必要的变量本身与不一致无关,但其实经过优化之后,“该变量与该不一致无关”的语义本身也会从结果的 LTL 中被剔出;而且优化过程本身也是有额外时间消耗的.故:目前 ProMiner 在实际处理 LTL 的生成和优化时,出于效率考虑,会由用户决定是否需要对结果进行优化.

ProMiner 生成的 LTL 始终是以 *event* 为核心的,故在 LTL 的生成/简化操作之后得到的最终结果正反映了代码层中表达 *event*(相当于函数或代码片段)的前后置条件的语义.3 种不一致中,条件不一致反映的是前置条件语义,初始化和状态改变不一致反映的是后置条件语义.而 LTL 简化的本质就是从松散的测试结果抽取的原始 LTL 的基础上,进一步提炼出能够准确表达 *event* 前后置条件语义的 LTL 公式.我们未来的工作中会继续优化该提炼手段,以使之更加精确.这样生成的 LTL 不但可以帮助模型检测,还可以进一步在此基础上挖掘出给用户的一些可能的修改建议.

2 系统原型

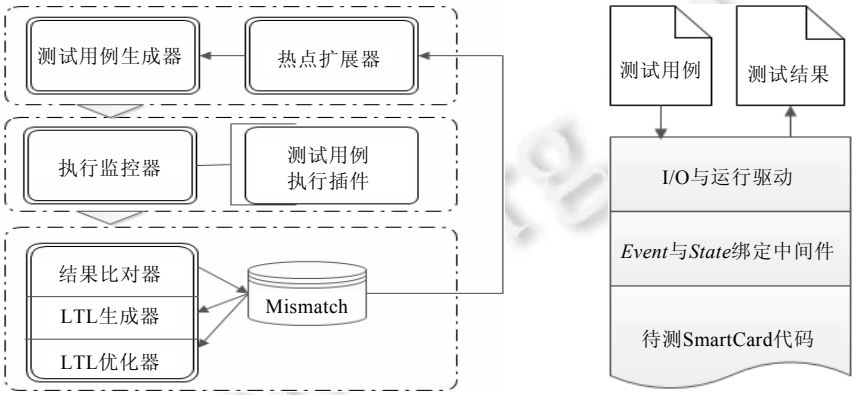
在上一节,我们介绍了 ProMiner 的组件结构以及工作流程,本节将从系统实现的角度介绍其原型,并介绍 ProMiner 在多功能智能卡项目中的应用.

图 5 是 ProMiner 总体的结构图:各个组件与图 1 所示的流程图是相对应的,但实现上并非每个流程都对应单独的一个模块,而是大致分为 3 个相互可独立工作的松散结构,各个组件之间仅通过 xml 文件(测试用例及生成结果)交互以降低耦合性并增加架构的灵活性.

- 测试用例生成器基于上文提到过的开源工具 Event-B MBT[12],输入原始模型并输出测试用例.热点扩展器是测试用例生成器的扩展,如第 1.4 节所述,它将根据结果比对器的工作结果和用户的一些自定义热点通知测试用例生成器增量生成测试用例;
- 执行监控器本身仅作为具体测试用例执行插件的一个容器运作,为其提供测试用例,接受测试结果并

输出测试结果与其他组件交互,具体的执行插件需要根据具体的待测代码编写.其关键是如何将模型中的 *Event* 和 *State* 与代码中的相关函数和变量得到有效的对应,每个 *Event* 都被注册了一个相关函数,而该函数将调用代码中改变系统状态的一些函数;而每个 *State* 中的 *Variable* 则使用一些表达式与代码中某些特定的全局或是重要对象的变量相联系,当代码中变量修改时,将捕捉到这些变化.可参见第 1.2 节;

- 结果比对器、LTL 生成器、LTL 优化器三者在实现中处于同一个模块.它们共用内存中的 Mismatch 对象集合作为数据的存储区.结果比对器主要负责写,LTL 生成器和优化器可根据每次的结果生成相应的 LTL.三者共用同一个模块,主要是出于执行效率的考虑.



(a) ProMiner 的架构 (b) 测试执行插件

Fig.5

图 5

3 实验分析

为分析基于系统性质的一致性检验方法的有效性,我们考察实际软件多功能智能卡系统,将 ProMiner 对其文件系统的模型与代码进行一致性检验.该系统符合 ISO-7816 标准,使用 Event-B 作为建模语言,C++作为编码语言.鉴于项目的安全要求,部分具体功能和实现细节不再详尽描述,部分建模信息可参考文献[14,15].除此之外,为了更好地分析 ProMiner,我们也对以下几个示例模型以及其对应的代码部分进行了属性抽取和模拟实验:上文作为例子的热水壶 Water Boiler 模型以及一个自动电梯 Lift 的模型.

3.1 多功能智能卡系统

在该多功能智能卡系统中,文件系统对其安全性和稳定性起着关键性作用.相对于其他文件系统而言,对用户的操作权限设计方面有更严格的要求.在实际开发环境中,代码编写与形式化建模分属两个不同的团队,工作时间与地点都不一样,很难保证工作流程按照预期进行.建模过程中模型经过 5 层精化,而代码则前后主要共经历了 10 次迭代过程.在整个开发过程中,有效保持模型与代码间的一致性则显得尤为重要.ProMiner 产生的 LTL 能够直接被 ProB 使用,帮助定位模型需要更新的部分,并且用于检验每次修改后的模型是否有效处理了这些不一致部分.由于模型本身在经历 5 层精化后 *event* 及其参数的数量快速增加,导致模型路径以指数级速度增加,使得测试用例生成时间超出可接受范围,因此,我们主要在模型的前两层模型的基础上进行实验.

在测试用例生成过程中,我们选取了默认的全迁移覆盖策略以及用户定义的热点扩展.由于访问权限是智能卡文件系统最重要的关键性质,包含该性质的所有 *event* 都被定义为需要扩展生成测试用例的热点,共产生抽象测试用例 761 条,覆盖了所有与访问权限参数直接相关的迁移.对每条结果,我们都使用了 LTL 优化,最终,这些 LTL 在 ProB 上的运行时间均<1s,并未对系统开发时间造成太大影响.

在上述 10 次代码迭代的过程中,ProMiner 对模型和代码进行不一致检验,共找到 55 个模型与源码发生不一致的情况.例如:

- 初始环境下,用户对文件的访问权限的不一致定义;
- 文件创建的操作结果的不一致,代码中增加了文件创建后的访问权限,使其对某类用户可见;
- 用户进行删除操作时对用户权限判断条件的不一致.

然而,与不断更新的代码相比较,模型最终实际更新部分有 60 处.ProMiner 未找到的 5 处不一致,经检查主要是受限于基于模型的测试方法本身,即,代码中实现了建模时根本没有包括在内的组件.例如:代码实现过程中增加定义了不同的用户访问权限类别,超出了模型对权限变量的取值范围,所以测试用例无法覆盖到这部分代码,进而导致不一致检验的遗漏.我们计划在后续研究中,考虑从代码层面定义需扩展热点,进而生成测试用例以覆盖这部分的不一致.

3.2 模拟实验

除了智能卡系统之外,我们主要为两个不同的示例模型编写了对应的代码,并在其上实践了 ProMiner.如后文表 2 所示,Water Boiler 即我们在上文中作为例子的热水壶模型,这里不再赘述.Lift 是一个简单的电梯系统的模型,其中定义了电梯的升/降、开/关以及相应的用户控制功能.

在模拟实验中,首先根据现有模型实现代码,并首先通过基于模型的测试以保证两者的一致性;然后,为了模拟出现不一致的情况,人为地注入不一致,再通过ProMiner检验其一致性并生成LTL.为了尽量做到客观,人为注入不一致时,我们首先针对每个系统建立变化库,即,能够反映合理需求变化的代码并将若干这样的变化编号保存;其次,每次实验过程中,从变化库中选取上述会产生不一致的变化,以 10%的概率插入原代码.对每组模型与代码,我们都进行 10 次这样的不一致注入.

与智能卡一样,模拟实验中,生成的测试用例数量是恒定的.当然,在实际操作中,由于 ProMiner 可能会需要多次迭代,每次会对模型修改,故测试用例数量可能发生改变,本次实验中尚未遇到这样的情况,我们在未来的工作中会考虑更加复杂的情况及相关的应对方法.

3.3 结 论

通过上述实验,我们得到了如表 2 所示的实验结果.

Table 2 Experimental results

表 2 实验结果

实验系统	测试用例数	不一致总数	找到的不一致
SmartCard	761	60	55
Water Boiler	18	21	18
Lift	56	29	29

在实验中,我们总结出下面几点关于 ProMiner 的问题:

(1) 流程中的时间瓶颈为测试用例生成;

(2) ProMiner 可承受的模型规模与代码行数无关,与模型中 *event* 和参数的数量有关;

(3) 存在 ProMiner 找不到不一致,即代码超越模型定义的部分.

第 1 个问题的产生是因为状态图的构建和路径覆盖问题本身的复杂性;第 2 个问题则是因为模型路径的多少其实是由 *event* 和参数决定的,路径对于最终产生的测试用例数的影响是指数级的,在 *event* 中,无论经历多么复杂的操作,耗费时间仍然只是线性的;对于第 3 个问题,目前我们仍然没有特别好的解决方案,未来将考虑在代码层扩展热点以暴露出模型中根本未定义这一功能.

另外,对前两个问题造成的当模型过大导致时会使测试生成时间过长的问题,我们目前的建议是在模型规模比较庞大时使用比较高的精化层次,或者尽可能地在建模时就将整个系统切分为几个组件部分建模.当然,这样做是有代价的,前者增加了模型的颗粒度,因而无法利用 LTL 来检查精化度较高的模型层次;后者增加了建模

的复杂度.但这么做一方面可以使 ProMiner 的适用性大为增强,另一方面使得工程本身变得更加灵活和易于管理.具体的取舍视实际情况有所不同,我们将在后续的工作中尽可能地优化相关问题.

4 相关工作

基于模型的测试方法的研究目前更多地集中在诸如 UML 这样工业界更为流行的、但并非完全形式化的语言上.例如,李宣东、王林章等人对 UML 活动图提出了基于路径覆盖生成测试用例的方法.ProMiner 目前主要支持形式化语言 Event-B,他们在 UML 这种半形式化/图形化的建模语言中的研究是值得借鉴的.另外,他们在文献[16]中提出了将 UML 状态机语义用于模型检验的方法,这与我们使用 ProB 对 Event-B 进行模型检验是类似的.我们在未来的工作中会考虑在李宣东等人研究的基础上,进一步将 ProMiner 中提出的扩展的一致性检验框架用于 UML 这样被更多开发者使用的建模语言上.

对系统性质的抽取一直是业界的热点问题,但人们往往关注于系统的某个特定方面,而非模型与代码的一致性.例如:微软实验室开发的工具 Tark[17]能分析序列化的数据集合文件,例如系统执行路径和系统日志等,并将其转换为 LTL 的一个子集.该 LTL 更多地是在表达系统状态迁移序列的组合形式.而我们对 LTL 的抽取是在测试用例和其执行结果的基础上完成的,这一点有相似之处,但我们的 LTL 系统性质更加关注于两者间的迁移或迁移条件的不一致所在.

同样来自微软实验室的 Daikon[18]使用动态执行结合对关键变量监控的手段来挖掘系统的不变式.这些不变式本身可以用来作系统分析,应用于代码层本身,如单元测试用例筛选、代码重构检查等.不变式以形如 $x!=0$, $y>x$ 等方式表达.其动态执行过程与我们的测试用例执行本身存在某些相似性,而我们更多的是生成反映不一致的动态性质而非简单的不变式.

Su 和 Gabel 也在系统性质挖掘方面做过一系列研究[19,20].文献[19]介绍了 Deja Vu,可以用来检测不同软件代码版本之间的不一致所在.Su 等人使用了自动化的手段检测一系列自定义的不一致情况是否存在.文献[20]介绍了他们在反向工程中抽取时序逻辑系统性质的方法和相关项目.他们同样用了测试手段来总结 Java 程序中时序化的函数调用性质.其方法同样具有参考价值,但更多的是在代码的版本间对某些特定问题的性质进行抽取,并不主要关注模型与代码的一致性.

5 结束语

作为对传统基于模型的一致性检验方法的扩展,本文提出了一种基于系统性质的一致性检测方法,并开发了其原型框架 ProMiner.在支持传统的基于模型的自动化测试方法的同时,又能在模型需要随实际运行系统而更新的特定条件下,做到对模型之于代码的一致性检测.

ProMiner 一方面是现有的基于模型的测试方法的一个实现,另一方面也对基于模型的测试方法本身做出扩展.ProMiner 的自动化特性可以保证用户以较小的代价来完成基于模型的测试.我们的热点扩展方法可以对基于模型测试中的一些关键点进一步挖掘以产生更多的测试用例,这使得测试过程变得更加可信和有效.

ProMiner 对 LTL 性质的抽取和优化本身是一个独创的方法.ProMiner 将测试用例与测试执行的比对结果分成 3 类并且在该原始 LTL 上进一步优化提取出能反映模型与代码不一致的 LTL 公式.抽取的 LTL 公式除了可以作为后续的模型检测的输入,也可以用于对模型与代码的进一步分析.另外我们也发现:其实,类似的方法对许多诸如对模型精化过程的检测、对一些模型或代码的转换工作等也可以起到很好的效果.在未来的工作中,我们将继续探讨其可能性.另外,目前阶段,ProMiner 仍然处于原型工具阶段,尚有很多不足之处,我们也将在未来的工作中对其本身进行以下几个方面的改进:

(1) 使用更加自动化的热点扩展功能,以优化覆盖效率并减少人为工作;

(2) 引入随机性和副作用概念,以对系统中的随机或是外来要素更好地加以处理;

(3) 如第 2 节最后所述,在生成 LTL 的基础上,对用户的修改方案自动化地提出建议.

致谢 最后,感谢在我们的工作中给予帮助和提供建议的所有同行.

References:

[1] Duan YC, Gu YQ. A multi-dimensional separation of concerns approach for model driven process framework modeling. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2006,17(8):1707−1716 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/1707.htm [doi: 10.1360/jos171707]

[2] Schmidt DC. Guest editor's introduction: Model-Driven engineering. Computer, 2006,39(2):25−31. [doi: 10.1109/MC.2006.58]

[3] Dias Neto AC, Subramanyan R, Vieira M, Travassos GH. A survey on model-based testing approaches: A systematic review. In: Proc. of the 1st ACM Int'l Workshop on Empirical Assessment of Software Engineering Languages and Technologies: Held in Conjunction with the 22nd IEEE/ACM Int'l Conf. on Automated Software Engineering (ASE 2007). ACM Press, 2007. 31−36. [doi: 10.1145/1353673.1353681]

[4] Liu H, Ma ZY, Shao WZ. Progress of research on metamodeling. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2008,19(6):1317−1327 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/1317.htm [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.01317]

[5] Wang J, Li XD. Preface to special issue on formal methods and tools. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2011,22(6): 1121−1122 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/4036.htm [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.04036]

[6] Huth M, Ryan M. Logic in Computer Science: Modelling and Reasoning About Systems. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 175−186.

[7] Tao QM, Zhao C, Guo L. Proving soundness of program transformations in optimizing compilation based on temporal logic. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2009,20(8):2074−2086 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/3378.htm [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03378]

[8] Clarke EM, Grumberg O, Peled D. Model Checking. Cambrige: The MIT Press, 1999. 35−50.

[9] Lin HM, Zhang WH. Model checking: Theories, techniques and applications. Acta Electronica Sinica, 2002,30(Z1):1907−1912 (in Chinese with English abstract).

[10] Abrial JR. Modeling in Event-B: System and Software Engineering. Cambrige: Cambridge University Press, 2010. 176−188.

[11] Abrial JR, Butler M, Hallerstede S, Hoang TS, Mehta F, Voisin L. Rodin: An open toolset for modelling and reasoning in Event-B. Int'l Journal on Software Tools for Technology Transfer (STTT), 2010,12(6):447−466. [doi: 10.1007/s10009-010-0145-y]

[12] Dinca I, Ipate F, Mierla L, Stefanescu A. Learn and test for Event-B—A Rodin plugin. In: Proc. of the Abstract State Machines, Alloy, B, VDM, and Z. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. 361−364. [doi: 10.1007/978-3-642-30885-7_32]

[13] Leuschel M, Butler M. ProB: A model checker for B. In: Proc. of the FME 2003: Formal Methods. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. 855−874. [doi: 10.1007/978-3-540-45236-2_46]

[14] Zhang Y, Guo J, Zhu XR, Wang WJ, Zhu JY, Tang JH, Chen JN. Modeling and development of multi-application smart cards based on Event-B. Computer Engineering and Science, 2014,36(10):1943−1951 (in Chinese with English abstract).

[15] Zhang Y, Guo J, Zhu XR. Application of model-based development method in multi-application smart cards. Netinfo Security, 2013,(156):75−79 (in Chinese with English abstract).

[16] Zhou Y, Zheng GL, Li XD. An operational semantics for UML state machines in model checking context. Acta Electronica Sinica, 2003,31(Z1):2091−2095 (in Chinese with English abstract).

[17] Lo D, Ramalingam G, Ranganath VP, Vaswani K. Mining quantified temporal rules: Formalism, algorithms, and evaluation. In: Proc. of the 16th Working Conf. on Reverse Engineering (WCRE 2009). IEEE, 2009. 62−71. [doi: 10.1109/WCRE.2009.42]

[18] Ernst MD, Perkins JH, Guo PJ, McCamant S, Pacheco C, Tschantz MS, Xiao C. The Daikon system for dynamic detection of likely invariants. Science of Computer Programming, 2007,69(1):35−45.

[19] Murray G, Barton ES. Scalable and systematic detection of buggy inconsistencies in source code. ACM Sigplan Notices, 2010, 45(10):175−190. [doi: 10.1145/1869459.1869475]

[20] Gabel M, Su Z. Testing mined specifications. In: Proc. of the ACM SIGSOFT 20th Int'l Symp. on the Foundations of Software Engineering. ACM Press, 2012. 4. [doi: 10.1145/2393596.2393598]

附中文参考文献:

[1] 段玉聪,顾毓清.多维关注分离的模型驱动过程框架设计方法.软件学报,2006,17(8):1707−1716. http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/1707.htm [doi: 10.1360/jos171707]

[4] 刘辉,麻志毅,邵维忠.元建模技术研究进展.软件学报,2008,19(6):1317−1327. http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/1317.htm [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.01317]

[5] 王戟,李宣东.形式化方法与工具专刊前言.软件学报,2011,22(6):1121−1122. http://www.jos.org.cn/1000-9825/4036.htm [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.04036]

[7] 陶秋铭,赵琛,郭亮.基于时序逻辑证明编译优化程序变换的保义性.软件学报,2009,20(8):2074−2086. http://www.jos.org.cn/1000-9825/3378.htm [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03378]

[9] 林惠民,张文辉.模型检测:理论、方法与应用.电子学报,2002,30(Z1):1907−1912.

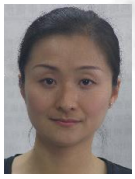
[14] 章玥,郭建,朱晓冉,王文君,朱晶洋,汤家华,陈峻念.基于 Event-B 方法的多应用智能卡的建模与开发.计算机工程与科学,2014,36(10):1943−1951.

[15] 章玥,郭建,朱晓冉.基于模型的开发方法在多应用智能卡中的应用.信息网络安全,2013,(156):75−79.

[16] 周颖,郑国梁,李宣东.面向模型检验的 UML 状态机语义.电子学报,2003,31(Z1):2091−2095.

葛徐骏(1989－),男,江苏兴华人,硕士,主要研究领域为软件测试与验证.

王玲(1989－),女,硕士,主要研究领域为软件测试与验证.



徐立华(1979－),女,博士,副教授,CCF 会员,主要研究领域为软件分析与测试,形式化方法.

郭建(1969－),女,博士,副教授,CCF 会员,主要研究领域为可信计算,模型检查,程序分析与验证.

朱惠彪(1967－),男,博士,教授,博士生导师,CCF 会员,主要研究领域为高可信计算,形式化方法.