

3.4 实验3:可伸缩性

在第3个实验中,我们利用本文的方法分别为5个元模型生成一组模型(不包括其他约束).对于每一个元模型,我们会生成5个模型,其文件大小从1MB到5MB发生变化.对于每一个模型,我们都生成5次以便获取平均执行时间(单位:s).这5个元模型分别是JavaSource,extlibrary,BibTex,PetriNet和TextualPathExp.其中,extLibrary是EMF工具中的标准案例项目Extended Library Model Example中使用的元模型,JavaSource和PetriNet与实验1中使用的元模型相同,它们与BibTex,TextualPathExp一起都来自ATL转换数据库.

对于每一个模型,为了控制模型的大小,其元素和关系数量都是固定值.对于每个元模型下相应的5个模型,元素范围约束和关系范围约束的变化比例是一致的.例如,假设生成第1个模型 M_1 时,我们使用了两个范围约束 ra_1 和 rb_1 .在生成第2个模型 M_2 时,如果 $k \cdot ra_1 = ra_2$,那么 $rb_2 = k \cdot rb_1$.实验3的结果见表5.

Table 5 Result of experiment 2 (s)
表 5 实验 2 的结果 (秒)

Size	1MB	2MB	3MB	4MB	5MB
JavaSource	3.94	13.84	34.49	63.68	98.05
extlibrary	1.94	7.26	16.36	29.12	39.86
BibTex	5.74	27.50	74.42	141.48	214.44
PetriNet	6.56	18.28	41.63	75.31	119.4
TextualPathExp	71.86	320	812.09	1 776.68	2 800.35

对于JavaSource模型,消耗的时间在3.94s~98.05s之间.对于extlibrary模型,消耗的时间在1.94s~39.86s之间.对于BibTex模型,消耗的时间在5.74s~214.44s之间.对于PetriNet模型,消耗的时间在6.56s~119.4s之间.对于TextualPathExp模型,消耗的时间在71.56s~2800.35s之间.

实验2的性能曲线如图7所示.在图7中,我们还列出了每条曲线拟合的函数.对于JavaSource模型,其性能曲线服从函数 $y=5.789x^{2.2792}$;对于extlibrary模型,性能曲线服从函数 $y=3.7502x^{2.0197}$;对于BibTex模型,性能曲线服从函数 $y=1.9556x^{1.9096}$;对于PetriNet模型,性能曲线服从函数 $y=5.9807x^{1.8124}$;对于TextualPathExp模型,性能曲线服从函数 $y=68.936x^{2.297}$.

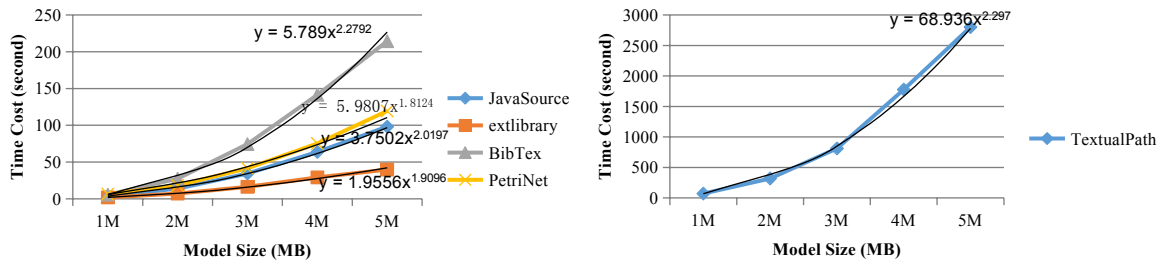


Fig.7 Performance curves of experiment 2
图 7 实验 2 的性能曲线

从这个实验中,我们可以得到下面3个结论.

- 1) 当模型的大小呈线性增长时,消耗的时间服从幂函数 $y=kx^p$;
- 2) 指数 p 的变化范围在1.8124~2.297之间,其平均近似值为2.06.对于不同元模型,指数变化不大;
- 3) 对于不同的元模型,系数 k 剧烈变化,这就意味着,系数 k 受元模型复杂性影响较大.

理论上讲,本文方法的性能也会受到要生成的模型复杂性的影响.在今后的工作中,将研究本文方法性能和元模型的复杂性以及模型之间的关系.

4 相关工作

目前存在一些关于模型生成(或元模型实例生成)的研究工作,可以分为3种技术路线:基于求解的方法、基

于算法的方法和基于图形语法的方法.前两种方法在本文开始部分已经提到.本节将比较已有的研究工作.

基于求解器方法的基本思想如下:(1) 将元模型和约束转换成一组不变式,这些不变式可以被模型检查器、约束求解器或者 SAT/SMT 求解器所接受;(2) 使用上述求解器求解不变式,并获得一个解;(3) 把得到的解转换成模型.

Alloy^[13]是一个成熟的针对关系模型证明器.Anastasakis 等人讨论了如何把一个 UML 类图转换成 Alloy 语言^[17],他们提出一些转换规则,能够把 UML 类图和部分 OCL 约束映射到 Alloy 中.Sen 等人提出了一个基于 Alloy 的工具^[14],该工具能够生成可以测试模型转换的输入模型.McQuillan 等人提出一种用于度量面向对象系统的元模型^[18].用户可以使用该元模型定义一些度量指标(即一个度量模型),之后这些度量指标可以被转换成 Alloy 语言,并检测度量指标的有效性(如果有效,Alloy 可以找到一个符合该度量模型的实例).

Apt^[19]等人提出了一种模型约束求解器——ECL¹PS^s.Cabot 等人^[20]提出了一种将 OCL 约束下的 UML 模型转换成 ECL¹PS^s 的方法.他们的方法都基于 EMFtoCSP^[12],并用于生成模型转换的测试输入^[15].

Soeken 等人^[21,22]也提出一种使用 SAT 求解器验证 OCL 约束下的 UML 模型的方法,他们使用 bit-vector(位向量)来编码元模型和约束.

不难看出,基于求解器的方法比本文的方法更加灵活,因为它们可以处理更多的约束条件.它们适用于模型验证和白盒测试.然而在第 3 节中我们已经通过实验证明:与本文的方法相比,基于求解器的方法不能高效地生成较大规模的模型.这使得它们无法很好地支持模型转换的性能测试.

除此之外,还有很多基于算法的方法.

Mougenot 等人^[23]提出了一种基于 Boltzmann 算法^[24]的大模型生成器.首先,他们将元模型转换成树的规约,其中,类是节点,聚合引用是边.该方法还支持聚合引用的多重性约束.之后,他们调用 Boltzmann 方法生成一个符合规范的有效树.该方法执行效率很高,但却没有讨论如何生成非聚合关系.此外,该方法也没有考虑语义约束.因此,他们的方法可能生成一个无效的模型,例如一个包含循环继承的类图.

Brottier 等人^[25]提出了一种用于测试模型转换的模型生成算法.该算法能够依照一定的覆盖准则和组合策略,将一组给定模型片段复合成完整的模型.但他们没有讨论如何生成初始的模型片段.相比于该工作,本文的方法更具有可配置性,考虑到了更多的约束条件,从而确保了生成模型的正确性.

Ehrig 等人介绍了一种基于图语法的模型生成方法^[26].该方法将元模型和约束编码成一组图转换规则,并通过执行这些规则生成一个模型.然而,在图转换中最常进行的操作是图模式匹配,这是一个 NP 完全问题,也是图转换的性能瓶颈.因此,这种基于图语法的模型生成方法也不可能高效地生成大规模的模型.

5 总结与展望

本文主要工作包括:(1) 提出了一种随机、高效、正确、可配置的模型生成算法,在合理的时间内能够生成符合语法、语义和范围约束的模型;(2) 进行了两个实验,验证了本方法的高效性.

在未来的工作中,我们计划从以下两个方面改进本文的方法:(1) 尝试处理更多种类的约束(尤其是语义约束);(2) 探索并行模型生成算法,以便更好地利用多核计算机.此外,我们还会进行更加系统的实验评估,以便分析本文方法的性能与元模型的复杂度以及将要生成的模型之间的精确关系.

此外,在本文方法的基础上,我们还将研究如何基于随机模型生成技术构造更加复杂但高效的模型生成方法,以便支持复杂的 OCL 约束.同时,还将探索如何利用本文方法实现对模型转换的随机测试.

References:

- [1] Zhang J, Lin Y, Gray J. Generic and domain-specific model refactoring using a model transformation engine. In: Beydeda S, Book M, Gruhn V, eds. Proc. of the Model-Driven Software Development. Berlin: Springer-Verlag, 2005. 199–217. [doi: 10.1007/3-540-28554-7_9]
- [2] Straeten R, Jonckers V, Mens T. A formal approach to model refactoring and model refinement. Software & Systems Modeling, 2007,6(2):139–162. [doi: 10.1007/s10270-006-0025-9]

- [3] Hemel Z, Kats LC, Visser E. Code generation by model transformation. In: Vallecillo A, Gray J, Pierantonio A, eds. Proc. of the Theory and Practice of Model Transformations. Berlin: Springer-Verlag, 2008. 183–198. [doi: 10.1007/978-3-540-69927-9_13]
- [4] Prout A, Atlee JM, Day NA, Shaker P. Semantically configurable code generation. In: Czarnecki K, Ober I, Bruel JM, Uhl A, Völter M, eds. Proc. of the Model Driven Engineering Languages and Systems. Berlin: Springer-Verlag, 2008. 705–720. [doi: 10.1007/978-3-540-87875-9_49]
- [5] Xiong Y, Liu D, Hu Z, Zhao H, Takeichi M, Mei H. Towards automatic model synchronization from model transformations. In: Proc. of the 22nd IEEE/ACM Int'l Conf. on Automated Software Engineering. New York: ACM Press, 2007. 164–173. [doi: 10.1145/1321631.1321657]
- [6] Hermann F, Ehrig H, Orejas F, Czarnecki K, Diskin Z, Xiong Y. Correctness of model synchronization based on triple graph grammars. In: Whittle J, Clark T, Kühne T, eds. Proc. of the Model Driven Engineering Languages and Systems. Berlin: Springer-Verlag, 2011. 668–682. [doi: 10.1007/978-3-642-24485-8_49]
- [7] Song H, Huang G, Chauvel F, Xiong Y, Hu Z, Sun Y, Mei H. Supporting runtime software architecture: A bidirectional-transformation-based approach. *Journal of Systems and Software*, 2011,84(5):711–723. [doi: 10.1016/j.jss.2010.12.009]
- [8] Object Management Group. OMG object constraint language (OCL) specification, Version 2.3.1. 2012. <http://www.omg.org/spec/OCL/2.3.1>
- [9] He X, Zhang T, Ma ZY, Shao WZ. Randomized model generation for performance testing of model transformations. In: Chang CK, Gao Y, Hurson A, Matskin M, McMillin B, Okabe Y, Seceleanu C, Yoshida K, eds. Proc. of the Annual Int'l Computer, Software & Applications Conf. IEEE Computer Society, 2014. 11–20. [doi: 10.1109/COMPSAC.2014.103]
- [10] Xiong Y, Hu Z, Zhao H, Song H, Takeichi M, Mei H. Supporting automatic model inconsistency fixing. In: Proc. of the 7th Joint Meeting of the European Software Engineering Conf. and the ACM SIGSOFT Symp. on the Foundations of Software Engineering. New York: ACM Press, 2009. 315–324. [doi: 10.1145/1595696.1595757]
- [11] Object Management Group. OMG meta object facility (MOF) core specification, Version 2.4.1. 2011. <http://www.omg.org/spec/MOF/2.4.1>
- [12] Pérez CAG, Buettner F, Clarisó R, Cabot J. EMFtoCSP: A tool for the lightweight verification of EMF models. In: Proc. of the Formal Methods in Software Engineering: Rigorous and Agile Approaches (FormSERA). New York: IEEE, 2012. 44–50. [doi: 10.1109/FormSERA.2012.6229788]
- [13] Jackson D, Schechter I, Shlyakhter I. Alcoa: The Alloy constraint analyzer. In: Proc. of the Int'l Conf. on Software Engineering. New York: ACM Press, 2000. 730–733. [doi: 10.1109/ICSE.2000.870482]
- [14] Sen S, Baudry B, Mottu JM. On combining multi-formalism knowledge to select models for model transformation testing. In: Proc. of the Int'l Conf. on Software Testing, Verification, and Validation. New York: IEEE, 2008. 328–337. [doi: 10.1109/ICST.2008.62]
- [15] González CA, Cabot J. Attest: A white-box test generation approach for ATL transformations. In: France RB, Kazmeier J, Breu R, Atkinson C, eds. Proc. of the Model Driven Engineering Languages and Systems. Berlin: Springer-Verlag, 2012. 449–464. [doi: 10.1007/978-3-642-33666-9_29]
- [16] Wu H, Monahan R, Power JF. Metamodel instance generation: A systematic literature review. Technical Report, arXiv: 1211.6322, 2012. <http://arxiv.org/abs/1211.6322v2>
- [17] Anastasakis K, Bordbar B, Georg G, Ray I. On challenges of model transformation from UML to Alloy. *Software & Systems Modeling*, 2010,9(1):69–86. [doi: 10.1007/s10270-008-0110-3]
- [18] McQuillan JA, Power JF. A metamodel for the measurement of object-oriented systems: An analysis using Alloy. In: Proc. of the Int'l Conf. on Software Testing, Verification, and Validation. New York: IEEE, 2008. 288–297. [doi: 10.1109/ICST.2008.58]
- [19] Apt KR, Wallace M. *Constraint Logic Programming Using ECLiPSe*. New York: Cambridge University Press, 2007.
- [20] Cabot J, Clarisó R, Riera D. Verification of UML/OCL class diagrams using constraint programming. In: Proc. of the Int'l Conf. on Software Testing Verification and Validation Workshop. New York: IEEE, 2008. 73–80. [doi: 10.1109/ICSTW.2008.54]
- [21] Soeken M, Wille R, Kuhlmann M, Gogolla M, Drechsler R. Verifying uml/ocl models using boolean satisfiability. In: Preas K, ed. Proc. of the Design, Automation & Test in Europe Conf. & Exhibition (DATE). New York: IEEE, 2010. 1341–1344. [doi: 10.1109/DATE.2010.5457017]

- [22] Soeken M, Wille R, Drechsler R. Encoding OCL data types for SAT-based verification of UML/OCL models. In: Gogolla M, Wolff B, eds. Proc. of the Tests and Proofs. Berlin: Springer-Verlag, 2011. 152–170. [doi: 10.1007/978-3-642-21768-5_12]
- [23] Mougnot A, Darrasse A, Blanc X, Soria M. Uniform random generation of huge metamodel instances. In: Paige RF, Hartman A, Rensink A, eds. Proc. of the Model Driven Architecture-Foundations and Applications. Berlin: Springer-Verlag, 2009. 130–145. [doi: 10.1007/978-3-642-02674-4_10]
- [24] Duchon P, Flajolet P, Louchard G, Schaeffer G. Boltzmann samplers for the random generation of combinatorial structures. In: Proc. of the Combinatorics, Probability and Computing. New York: Cambridge University Press, 2004. 577–625. [doi: 10.1017/S0963548304006315]
- [25] Brottier E, Fleurey F, Steel J, Baudry B, Le Traon Y. Metamodel-Based test generation for model transformations: An algorithm and a tool. In: Proc. of the Int'l Symp. on Software Reliability Engineering. New York: IEEE, 2006. 85–94. [doi: 10.1109/ISSRE.2006.27]
- [26] Ehrig E, Küster JM, Taentzer G. Generating instance models from Meta models. Software & Systems Modeling, 2009,8(4): 479–500. [doi: 10.1007/s10270-008-0095-y]



何曛(1983—),男,北京人,博士,讲师,CCF 专业会员,主要研究领域为模型驱动工程,模型转换,元建模,代码生成.



麻志毅(1963—),男,博士,副教授,CCF 高级会员,主要研究领域为软件工程与支撑环境,软件建模技术,面向对象技术.



李文峰(1996—),男,学士,主要研究领域为软件工程.



邵维忠(1946—),男,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为软件工程环境,面向对象方法,软件复用,软件构件技术.



张天(1978—),男,博士,副教授,主要研究领域为软件工程.



胡长军(1963—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为高性能计算,数据工程,领域软件工程.