

Techne^[35]语言,除了包括目标和任务等常规模型元素外,Qureshi 等人还考虑了上下文和资源约束.虽然建模语言的语义丰富,但是操作相对复杂.Cheng 等人^[6]提出一种目标建模方法来构建动态适应系统的需求,同时考虑与需求相关的不确定性.它引入一种威胁模型来描述不确定性的原因及其对需求的影响.然而该方法局限于对需求不满足情况下解决方案的描述,未能用于运行时的自适应配置.Arcaini 等人^[7]提出通过 MAPE-K 回路构建自适应机制,并对自适应行为进行形式化规约,以验证行为的有效性和正确性.但是该自适应机制采用线性时序逻辑,不能适用于求解非功能需求满足性的问题.Baresi 等人^[8]提出 FLAGS 模型,它在 KAOS 模型的基础上扩展了自适应目标和自适应对策,通过将需求看作具有活性的运行时实体来触发自适应过程.当目标不被满足时,会触发自适应对策,目标模型会随即做出相应修正,以保证系统目标能得以实现.基于模糊目标的自适应机制能够准确地刻画自适应需求和在需求不满足时的系统对策,同时它还提供了良定的形式化描述.但其形式化只用于对目标和对策进行规约描述,而没有实现运行时的自适应过程.Mendonça 等人^[9]基于模糊逻辑提出根据上下文和可靠性变化求解配置选项的框架,其中,可靠性需求通过模糊逻辑进行量化,可选配置通过目标模型进行识别.但是该框架会受到推理规则精度和规模的限制.

在自适应决策实现方面,现有的方法主要有两种思路,即方程计算和命题推理.基于计算的自适应决策主要是利用方程计算得出优化的配置结果,以满足系统的目标.Angelopoulos 等人^[10]提出基于模型预测控制的决策方法,建立了需求和可选自适应决策之间的动态联系.该方法通过控制器对可选配置进行优化求解,以保证需求得以满足.然而该方法依赖于系统的动态数学模型,需要精确的领域知识作为基础,对于模型参数比较敏感,所以其应用条件相对严格.Esfahani 等人^[11]提出 POISED 框架,该方法在不确定上下文中,通过系统的全局优化配置来提高系统的质量属性.该方法利用概率评估不确定性带来的影响,利用对不同配置在目标函数下的表现来确定最优化的解决方案.虽然 POISED 的普适性更强,但是它是一种基于架构的方法,当有多组质量属性需要被提高时,该方法的复杂性也会随之提高.基于推理的自适应决策主要是利用逻辑推理得出优化的配置结果,以满足系统需求,典型的工作为基于目标模型的推理.Wang 等人^[12]提出了一种监测和诊断系统功能需求的框架,监测组件通过对需求的前置条件和后置条件的真值判断生成日志数据.诊断组件利用这些数据分析得出失效的需求,这一分析过程转化为命题满足性问题,并通过 SAT 求解器实现.为实现自适应决策,Wang 和 Mylopoulos 在后续工作^[13]中给出了解决方案,其主要思想仍然是基于目标贡献关系的推理,对所有目标配置进行评估,并确定决策配置.基于目标推理的方法与系统需求是紧密相关的,因此它可以高效地解决多目标决策问题,并且考虑到目标之间的权衡.但是,由于推理需要依托于目标模型,导致其可解决的问题种类是有限的.

在自适应系统需求在线验证方面,现有的工作比较多元化,相关工作主要包括两个方面:其一是系统的形式化建模,即找到一种方法刻画系统行为;其二是性质描述,即找到一种方法描述待验证需求.Goldsby 等人^[14]提出 AMOEBA-RT 方法,通过运行时监测和验证技术确保动态适应系统的需求得以满足.AMOEBA-RT 采用线性时序逻辑对程序层的自适应需求进行描述,并给出相应的模型检验类的实现代码.它能够根据人们对于程序的认识,合理地描述自适应需求,但其模型检验仅处于代码设计阶段.关于基于线性时序逻辑进行需求验证的问题,Zhao 等人^[36]给出了一种解决方案,他们使用线性时态逻辑描述自适应软件系统以及验证性质,并通过标签转移系统的分析工具 LTSA 得出验证结果.Filieri 和 Tamburrelli^[15]提出了一种通过模型检验来验证自适应系统可靠性需求的方法,该方法利用离散时间马尔可夫链作为系统模型并将需求表达为逻辑公式,这对本文决策方法的提出有很大的启发.Epifani 等人^[16]基于需求验证的思想在迭代模型驱动开发方向上进行了基础性研究,该方法通过对开发后系统的需求验证来判断系统的行为是否满足了设计决策,并根据结果来指导后续开发过程.这是需求验证在软件开发过程中应用的范例.Calinescu 等人^[17]介绍了自适应系统需要具有运行时量化验证的能力,这也成为后续自适应系统运行时需求验证方向的思想基础,该工作较为系统地介绍了验证的关注点以及验证过程中的形式化和量化思路.Ghezzi 和 Sharifloo^[18]提出一种基于模型的方法来验证软件产品线中的量化非功能需求,该方法基于特征模型,通过需求验证,对软件产品线的设计方案进行评估分析.这一方法也是需求验证的典型应用之一.此外,Iftikhar 和 Weyns^[19]提出 ActivFORMS 方法,以确保自适应目标的在线验证并且可以根据目标的变化对系统进行调整.其与本文的不同之处在于,该工作是将功能需求的验证与自适应机制相结合,而本文是将非功能需求的验证引入到自适应

机制中。

上述工作对本文思想的形成都有启示意义。与这些工作相比,在建模方面,VADEM 方法从目标建模的角度出发建立自适应机制,并在目标模型中融入 MAPE-K 控制机制,有简便、易行的建模原则和模型语义,且便于生成行为模型,进而用于支持运行时的非功能需求验证和系统行为分析。虽然系统行为模型可以从体系结构的基础上进行构建,但是目标模型将用户需求和系统任务紧密联系在一起。同时,以目标模型为出发点,能够使需求工程阶段的模型对设计决策产生指导价值,这也是模型驱动的意义所在。在自适应决策实现方面,VADEM 方法从目标模型出发,可以对多种需求进行描述。决策结果通过贝叶斯推理得出,是一种基于不确定性量化推理的过程。在需求的在线验证方面,VADEM 的主要特点在于构造具有可变结构的行为分析模型,并用这些可变结构表示系统的可选配置。VADEM 方法展示了需求验证过程在优化决策中的作用。

8 结束语

VADEM 方法基于需求验证实现自适应软件系统运行时的优化决策,以保证系统的决策配置能够满足特定的非功能需求。优化决策的过程是通过在系统分析模型中的不同结构和参数配置下,对相关需求进行验证来完成的。该方法也是一种模型驱动的方法,涉及到的若干模型相互关联。

本文工作的主要意义在于:

(1) 自适应目标模型提供了一种构建自适应机制的思路,有别于现有的其他基于目标模型建立自适应机制的方法,它用简单的建模元素和语义显示化描述了自适应机制,并用于构造自适应行为模型。

(2) 通过目标的形式化和目标满足过程的仿真,将目标模型转换为行为模型,使得需求模型能够对系统运行时的行为分析提供指导。这使需求模型不再单纯地成为用于捕获和描述用户期望的概念模型,而可以进一步用于系统运行时的行为描述。这也符合自适应系统需要运行时模型(models@runtime)的思想。

(3) 标记目标模型描述了同一个任务在不同上下文和不同配置中的可靠性规约,这是基于验证的自适应决策方法的关键前提。这一想法在自适应决策与重配置的研究方面还缺乏关注和讨论。

(4) 虽然自适应系统的需求工程领域中有大量关于需求验证的工作,但是并没有将需求验证作为自适应优化决策的方法,这也是本文的核心思想。需求验证过程和自适应决策过程是紧密相关的,需求验证即是为了说明系统的配置能否满足需求,而自适应决策过程就是为了确保需求的满足。

未来的研究工作中,我们主要关注两个方向。其一是在不确定性情况下对系统进行需求验证,比如非确定性存在的情况下,自适应系统应如何决策并确保决策配置满足某些特定非功能需求。另一个关注方向是需求模糊化给自适应系统带来的灵活性和弹性,尤其是能否通过量化验证的方法来衡量模糊需求对系统弹性到底带来多大益处。当然,自适应系统领域还有很多其他研究问题有待深入探索和解决。

References:

- [1] Cheng BHC, Lemos R, Giese H, Inverardi P, Magee J. Software engineering for self-adaptive systems: A research roadmap. In: *Software Engineering for Self-Adaptive Systems I*. LNCS 5525, Springer-Verlag, 2009. 1–26. [doi: 10.1007/978-3-642-02161-9_1]
- [2] Salehie M, Tahvildari L. Self-Adaptive software: Landscape and research challenge. *ACM Trans. on Autonomous and Adaptive Systems*, 2009,4:1–42. [doi: 10.1145/1516533.1516538]
- [3] Siadat SH, Song M. Understanding requirement engineering for context-aware service-based applications. *Journal of Software Engineering & Applications*, 2012,5(8):536–544. [doi: 10.4236/jsea.2012.58062]
- [4] Yang ZQ, Li Z, Jin Z, Chen YC. A systematic literature review of requirements modeling and analysis for self-adaptive systems. In: *Proc. of the 20th Int'l Working Conf. on Requirements Engineering: Foundation for Software Quality (REFSQ 2014)*. 2014. 55–71. [doi: 10.1007/978-3-319-05843-6_5]

- [5] Qureshi NA, Jureta IJ, Perini A. Towards a requirements modeling language for self-adaptive systems. In: Proc. of the 18th Int'l Working Conf. on Requirements Engineering: Foundation for Software Quality (REFSQ 2012). 2012. 263–279. [doi: 10.1007/978-3-642-28714-5_24]
- [6] Cheng BHC, Sawyer P, Benecomo N, Whittle J. A goal-based modeling approach to develop requirements of an adaptive system with environmental uncertainty. In: Proc. of the 12th Int'l Conf. on Model Driven Engineering Languages and Systems (MODELS 2009). 2009. 468–483. [doi: 10.1007/978-3-642-04425-0_36]
- [7] Arcaini P, Riccobene E, Scandurra P. Modeling and analyzing MAPE-K feedback loops for self-adaptation. In: Proc. of the 10th Int'l Symp. on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems (SEAMS 2015). 2015. 13–23. [doi: 10.1109/SEAMS.2015.10]
- [8] Baresi L, Pasquale L, Spoletini P. Fuzzy goals for requirement-driven adaptation. In: Proc. of the 18th Int'l Conf. on Requirements Engineering (RE 2010). 2010. 125–134. [doi: 10.1109/RE.2010.25]
- [9] Mendonça DF, Ali R, Rodrigues GN. Modelling and analysing contextual failures for dependability requirements. In: Proc. of the 9th Int'l Symp. on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems (SEAMS 2014). 2014. 55–64. [doi: 10.1145/2593929.2593947]
- [10] Angelopoulos K, Papadopoulos AV, Souza, VES, Mylopoulos J. Model predictive control for software systems with CobRA. In: Proc. of the 11th Int'l Symp. on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems (SEAMS 2016). 2016. 35–46. [doi: 10.1145/2897053.2897054]
- [11] Esfahani N, Kouroshfar E, Malek S. Taming uncertainty in self-adaptive software. In: Proc. of the 19th ACM SIGSOFT Symp. and the 13th European Conf. on Foundations of Software Engineering (ESEC/FSE 2011). 2011. 234–244. [doi: 10.1145/2025113.2025147]
- [12] Wang Y, McIlraith SA, Yu Y, Mylopoulos J. Monitoring and diagnosing software requirements. Automated Software Engineering, 2009,16(1):3–35. [doi: 10.1007/s10515-008-0042-8]
- [13] Wang Y, Mylopoulos J. Self-Repair through reconfiguration: A requirements engineering approach. In: Proc. of the 26th IEEE/ACM Int'l Conf. on Automated Software Engineering (ASE 2009). 2009. 257–268. [doi: 10.1109/ASE.2009.66]
- [14] Goldsby HJ, Cheng BHC, Zhang J. AMOEBA-RT: Run-Time verification of adaptive software. In: Models in Software Engineering. LNCS 5002, Springer-Verlag, 2008. 212–224. [doi: 10.1007/978-3-540-69073-3_23]
- [15] Filieri A, Tamburrelli G. Probabilistic verification at runtime for self-adaptive systems. In: Assurances for Self-Adaptive Systems. LNCS 7740, Springer-Verlag, 2013. 30–59. [doi: 10.1007/978-3-642-36249-1_2]
- [16] Epifani I, Ghezzi C, Mirandola R, Tamburrelli G. Model evolution by run-time parameter adaptation. In: Proc. of the 31st Int'l Conf. on Software Engineering (ICSE 2009). 2009. 111–121. [doi: 10.1109/ICSE.2009.5070513]
- [17] Calinescu R, Ghezzi C, Kwiatkowska M, Mirandola R. Self-Adaptive software needs quantitative verification at runtime. Communications of the ACM, 2012,55(9):69–77. [doi: 10.1145/2330667.2330686]
- [18] Ghezzi C, Sharifloo AM. Model-Based verification of quantitative non-functional properties for software product lines. Information & Software Technology, 2013,55(3):508–524. [doi: 10.1016/j.infsof.2012.07.017]
- [19] Iftikhar MU, Weyns D. ActivFORMS: Active formal models for self-adaptation. In: Proc. of the 9th Int'l Symp. on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems (SEAMS 2014). 2014. 125–134. [doi: 10.1145/2593929.2593944]
- [20] Brun Y, Serugendo GDM, Gacek C, Giese H, Kienle H, Litoiu M, Muller H, Pezze M, Shaw M. Engineering self-adaptive systems through feedback loops. In: Software Engineering for Self-Adaptive Systems I. LNCS 5525, Springer-Verlag, 2009. 48–70. [doi: 10.1007/978-3-642-02161-9_3]
- [21] Yang Z, Jin Z. Modeling and specifying parametric adaptation mechanism for self-adaptive systems. In: Proc. of the 1st Asia Pacific Requirements Engineering Symp. (APRES 2014). 2014. 105–119. [doi: 10.1007/978-3-662-43610-3_9]
- [22] Yu E. Towards modelling and reasoning support for early-phase requirements engineering. In: Proc. of the 3rd IEEE Int'l Symp. on Requirements Engineering (ISRE 1997). 1997. 226–235. [doi: 10.1109/ISRE.1997.566873]
- [23] Mckinley PK, Sadjadi SM, Kasten EP, Cheng BHC. Composing adaptive software. Computer, 2004,37(7):56–64. [doi: 10.1109/MC.2004.48]

- [24] Sun J, Liu Y, Dong JS, Pang J. PAT: Towards flexible verification under fairness. In: Proc. of the 21st Int'l Conf. on Computer Aided Verification (CAV 2009). 2009. 709–714. [doi: 10.1007/978-3-642-02658-4_59]
- [25] Lapouchnian A, Liaskos S, Mylopoulos J, Yu Y. Towards requirements-driven autonomic systems design. ACM SIGSOFT Software Engineering Notes, 2005,30(4):1–7. [doi: 10.1145/1083063.1083075]
- [26] Jung HW, Kim SG, Chung CS. Measuring software product quality: A survey of ISO/IEC 9126. IEEE Software, 2004,21(5):88–92. [doi: 10.1109/MS.2004.1331309]
- [27] Immonen A, Niemela E. Survey of reliability and availability prediction methods from the viewpoint of software architecture. Software and Systems Modeling, 2008,7(1):49–65. [doi: 10.1007/s10270-006-0040-x]
- [28] Cheung RC. A user-oriented software reliability model. IEEE Trans. on Software Engineering, 1980,6(2):118–125. [doi: 10.1109/TSE.1980.234477]
- [29] Souza VES, Lapouchnian A, Mylopoulos J. System identification for adaptive software systems: A requirements engineering Perspective. In: Proc. of the Int'l Conf. on Conceptual Modeling (ER 2011). 2011. 346–361. [doi: 10.1007/978-3-642-24606-7_26]
- [30] Ali R, Dalpiaz F, Giorgini P. A goal-based framework for contextual requirements modeling and analysis. Requirements Engineering, 2010,15(4):439–458. [doi: 10.1007/s00766-010-0110-z]
- [31] Baier C, Katoen JP. Principles of Model Checking. Cambridge: MIT Press, 2008. 780–787.
- [32] Forejt V, Kwiatkowska M, Norman G, Parker D. Automated verification techniques for probabilistic systems. In: Formal Methods for Eternal Networked Software Systems. LNCS 6659, Springer-Verlag, 2010. 53–113. [doi: 10.1007/978-3-642-21455-4_3]
- [33] Kwiatkowska M, Norman G, Parker D. Stochastic model checking. In: Proc. of the Int'l Conf. on Formal Methods for Performance Evaluation. 2007. 220–270. [doi: 10.1007/978-3-540-72522-0_6]
- [34] Hinton A, Kwiatkowska M, Norman G, Parker D. PRISM: A tool for automatic verification of probabilistic systems. In: Proc. of the 12th Int'l Conf. on Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems. 2006. 441–444. [doi: 10.1007/11691372_29]
- [35] Jureta IJ, Borgida A, Ernst NA, Mylopoulos J. Techne: Towards a new generation of requirements modeling languages with goals, preferences, and inconsistency handling. In: Proc. of the 18th IEEE Int'l Conf. on Requirements Engineering (RE 2010). 2010. 115–124. [doi: 10.1109/RE.2010.24]
- [36] Zhao Y, Li Z, Shen H, Ma D. Development of global specification for dynamically adaptive software. Computing, 2013,95(9): 785–816. [doi: 10.1007/s00607-013-0295-3]



杨卓群(1988 -),男,山东济南人,学士,主要研究领域为需求工程,自适应软件系统,自适应算法.



金芝(1962 -),女,博士,教授,博士生导师,CCF 会士,主要研究领域为需求工程,知识工程,人工智能.