arXiv:2512.22889v1 [cs.FL] 28 Dec 2025

拓扑功能模型的时空视角

Maria Spichkova

计算技术学院，皇家墨尔本理工大学，墨尔本，澳大利亚
maria.spichkova@rmit.edu.au

摘要。 系统属性的空间和时间方面对许多类型的系统都至关重要。在这篇短文中，我们介绍了 TopFunST 框架，用于分析系统特征之间的拓扑依赖关系，同时涵盖空间和时间方面。TopFunM 基于拓扑功能模型（TFM）语言的扩展版本。TFM语言描述了系统功能特征之间的拓扑关系，使人们不仅能够分析系统功能、特征交互和功能循环结构，还能分析空间和时间方面；但后者此前尚未纳入考量。本文提出了这一问题的解决方案。

关键词： 软件工程、形式化方法、拓扑依赖关系

1 引言

模型驱动软件开发（MDSE）为软件工程师带来诸多益处：既能尽早分析系统的核心属性，也能应用基于模型的测试方法。然而，模型驱动软件工程的成功与有效性在很大程度上取决于模型的质量及其适用性。通常，模型是对系统的抽象，旨在聚焦于相应开发阶段需要分析的系统属性。因此，模型的目标并非在相应抽象层次上呈现系统，而是隐藏系统及其环境的复杂性 [12]。然而，如果这种抽象遗漏了关键信息，模型就会变得毫无用处，甚至带来危险：工程师可能会据此预期系统具备某些属性，而这些属性并不符合实际开发中的系统。另一方面，如果模型的抽象程度不够，就可能变得难以阅读。模型的易理解性和可读性与准确性和可预测性同样至关重要。

在本文中，我们分析系统特征之间的拓扑依赖关系。为此，我们将拓扑功能模型（TFM）的语言扩展到了时空方面。TFM描述系统功能特征之间的拓扑关系，从而能够分析系统功能和功能循环结构，参见 [4]。TFM的输入是系统的非正式规范（例如，功能需求规范）。模型本身用图论术语表示是一个有向图，其节点表示系统的功能特征，而有向边表示这些特征之间的拓扑关系。一些研究重点关注将TFM应用于统一建模语言（UML），例如 [3,7]。然而，上述方法均未涵盖任何时空方面。我们的工作弥补了TFM的这一局限性。

我们介绍了TopFunST框架，该框架基于TFM语言的扩展版本。TopFunST旨在分析系统特征之间的拓扑依赖关系（其中组件成为时空对象），同时涵盖空间和时间方面。

2 背景

系统属性的时空方面发挥着重要作用。因此，此类系统的适当模型必须表示时空方面，同时支持形式化规约与验证。FO-CUSST 框架 [10, 11] 有助于开发易于理解的规约，展示了其适用于 [8, 9]中概述的规约与证明方法。FOCUSST 语言受 FOCUS [2], 这一用于交互式系统形式化规约与开发的框架启发。两种语言中的规约都基于流的概念。FOCUSST 规约是定时自动机的一种特殊形式，我们将其称为定时状态转换图 （TSTD）。

TSTD既可以用图形形式描述，也可以用文本形式描述。TSTD的输入动作可以表示为系统输入流的一组当前时间区间。输出动作可以表示为输出流的一组相应时间区间。除了能够在语言中表示时间属性之外，该框架还支持定义一种特殊类型的组件，用于描述能够在空间中实际改变其位置的真实对象，即所谓的时空对象，这为创建涵盖时空属性的拓扑功能模型提供了适当基础。

虽然我们当前的工作基于 TSDT 和 TFM，但还有许多其他方法致力于描述时空属性。例如，Pek 等人 [5] 提出了时空框架 SpaTiaL，以与机器人无关的方式统一面向对象的机器人任务的规范、监控和规划。Barbosa 等人 [1] 和 Santos 等人 [6]开展了机器人运动规划和时空机器人规划方面的研究。Yan 等人 [14] 提出使用信号时序逻辑进行时空分析，该逻辑专注于时间序列信号系统。Viseras 等人 [13] 提出了一种在时空约束下进行多机器人信息收集的方法。

3 形式模型

TopFunST 通过加入时空方面以及与业界当前所用方法之间的映射，扩展了 TFM语言。TopFunST 中用于建模系统行为的核心工件是功能特征。我们将功能特征定义为一个元组 F:

$$F = \langle Id, A, R, Obj, Pre, Post, Prov, Exec, D, T, Loc \rangle$$

其中
– Id 是动作标识符/标签；– A 是与执行该动作的时空对象 Obj 关联的动作；– R 是受该动作影响的对象集合；

– *Pre* 是该动作的前置条件集合 $\{pr1,...,pr_m\}$；– *Post* 是该动作的后置条件集合 $\{ps1,...,ps_m\}$；– *Prov* 是为动作提供一组特定对象的组件集合；– *Exec* 是执行具体动作的组件集合。– *D* 是一个二元组（ *Dmin*,*Dmax* ），表示动作的最短和最长持续时间（类似于最好和最坏情况执行时间的概念，用于分析实时系统的时序行为）；– *T* 表示时间约束，例如该动作应重复的频率（如果该动作需要按周期执行）；– *Loc*表示动作的空间方面/约束。

从需求工程的角度来看，功能特征可以视为用例中的一个事件。用例可以定义为一个元组用例：

$$UseCase = \langle Act, UCPre, Events, Alt \rangle$$

其中
– 参与者 是参与者集合（相对于所指定的系统而言为外部）；– 用例前置条件 是用例的前置条件集合；– 事件是按顺序排列、用于呈现事件流的列表 $[E1,...,E_n]$，其中每个事件E_i 由其编号/标识i 及事件的文字描述指定；– 备选流 是呈现备选流的列表，其中的分支对应于事件 列表中的相应事件编号/标识；

因此，事件 和备选流 对应于有向图中所有可能路径的子集，该有向图描述了特征之间的所有因果关系；而用例前置条件 则指定了相应操作所需的全部初始前置条件。
在 TFM 中，因果关系（CER）表示为有向图节点之间的有向边。这些关系也可以用邻接（关联）$n \times n$矩阵的形式指定，其中n是拓扑空间中以节点表示的功能特征数量。如果存在一条从某个节点x指向某个节点y的边，则矩阵元素$m_{x,y}$为 1，否则为 0。这使得能够高效分析模型并识别子图，这对分析子系统至关重要。此外，这也为分析不期望的特征交互奠定了坚实基础，从而排除执行动作a可能导致意外执行动作b的情况。

示例：我们通过一个场景来说明 TopFunST 的核心特征：自主机器人协同工作，安全地抬起运载车，并将其从位置L_1 运送至位置L_2。时空对象集合由三个元素组成：两个机器人R_1 和R_2, ，以及一辆运载车C:

$$\{R_1, R_2, C\}.$$

对于这个由两台机器人组成的系统，（外部）参与者将是一台起重机，它会将运载车放置到L_1。
表1展示了系统的功能特征，其中 $i \in \{1,2\}$ 和 $[C]$ 表示可选（取决于约束）的情况。*TC* 表示时间约束。$D_{Rmovement}$ 描述了移动速度的可接受最小值和最大值。

表1. 使用 TopFunST 的系统规范

Id	A	R	Obj	Pre	Post	Prov	Exec	D	T	Loc
a	移动	R_i, [C]	R_i	移动可能位置已更新				$D_{Rmovement}$	TC	L_1
b	移动	R_1, R_2, C	C	可能携带	位置$U\ pdated$			$D_{Rmovement}$	TC	$L_1, L2, L3$
c	携带	R_1, R_2, C	R_1, R_2	可能携带	位置$U\ pdated$			$D_{Rmovement}$	TC	$L_1, L2, L3$
d	打开夹爪$\backslash R_i$		R_i	夹爪闭合	夹爪打开			$D_{Gopening}$	T	L_i
e	关闭夹爪R_i		R_i	夹爪打开	夹爪闭合			$D_{Gopening}$	T	L_i

参考文献

1. Barbosa, F.S., Karlsson, J., Tajvar, P., Tumova, J.: 用于满足时间和空间约束的机器人运动规划的形式化方法。载于：定时系统的形式化建模与分析。第1–14页。Springer（2021） 2. Broy, M., Stølen, K.: 交互系统的规范与开发：聚焦于流、接口和精化。Springer（2001） 3. Donins, U., Osis, J., Slihte, A., Asnina, E., Gulbis, B.: 迈向拓扑类图作为平台无关模型的精化。载于：MDA/MDSD。第79–88页（2011） 4. Osis, J., Donins, U.: 拓扑 UML 建模：一种改进的领域建模与软件开发方法（2017） 5. Pek, C., Schuppe, G.F., Esposito, F., Tumova, J., Kragic, D.: SpaTiaL：使用时空逻辑规范对机器人任务进行监控和规划。Autonomous Robots **47**(8), 1439–1462（2023） 6. Santos, J.M., Krajn´ık, T., Duckett, T.: 面向移动机器人的长期自主性的时空探索策略。Robotics and Autonomous Systems **88**, 116–126（2017） 7. ˇSlihte, A.: 拓扑功能模型工具的实现。RTU 科学期刊。计算机科学 **41**(1), 68–75（2010） 8. Spichkova, M.: 嵌入式实时系统的规范与无缝验证：聚焦于 Isabelle。博士论文，慕尼黑工业大学（2007） 9. Spichkova, M., Zhu, X., Mou, D.: 我们真的需要为系统编写文档吗？载于：MODELSWARD（2013） 10. Spichkova, M.: FocusST 的时空特征。arXiv 预印本 arXiv:1610.07884（2016） 11. Spichkova, M., Blech, J., Herrmann, P., Schmidt, H.: 使用 Focus-ST 对安全关键系统的空间方面进行建模。载于：MoDeVVa。第49–58页（2014） 12. Spichkova, M., Zamansky, A.: 面向组合测试设计的以人为中心的框架。载于：ENASE（2016） 13. Viseras, A., Xu, Z., Merino, L.: 在时空机器人间约束下的分布式多机器人信息收集。Sensors **20**(2), 484（2020） 14. Yan, G., Liu, S., Liang, L., Wang, H., Zhu, X., Chen, G., Pan, Y., Huang, H.: 基于信号时序逻辑的机器人轨迹时空信号评估。载于：ARCAI。第801–813页。Springer（2024）