全球实验室中人机协作的安全数字影子

Mohamed Behery, Gerhard Lakemeyer r

基于知识的系统组 (KBSG) 亚琛工业大学{
behery,gerhard}@kbsg.rwth-aachen.de

arXiv:2304.02126v1 [cs.RO] 4 Apr 2023

摘要

全球实验室（WWL）连接流程、产品、公司及其他实体的数字影子（DS），使信息能够跨越公司边界进行交换。由于数字影子是针对特定情境和目的的流程表征，而数字孪生（DT）则提供完整仿真，因此将流程集成到 WWL 中需要创建能够呈现流程不同方面的数字影子。近期，研究人员在 WWL 背景下探讨了用于装配流程的人机协作（HRC），并提出将行为树（BT）作为这些流程的标准任务级表示。我们在以往工作的基础上，提出对可直接集成到这些行为树中的安全功能进行标准化。这项补充将 WWL 用作通信与信息交换平台，使工业界和学术界的从业者能够在 WWL 中交流、复用并试验不同的安全要求与解决方案。

引言

工业机器人流程，尤其是涉及人机交互（HRI）的流程，近年来已广泛应用于许多制造领域和交互范式中（Baier 等，2022年）。尽管这些流程属于动态且对安全要求极高的机器人学应用，但通常采用临时编程，并且往往针对具体情况进行经验验证，尤其是在流程依赖深度学习（DL）应用时。本文提出在 WWL 中为人机交互流程制定标准化的安全功能。采用标准表示方式，既可以重复使用这些功能，也可以生成可复用代码来表示流程中涉及的任务。

先前的研究介绍了生产的数字影子（DS），并提出了标准数字影影子面临的要求与挑战（Bauernhansl、Hartleif 和 Felix，2018年）。进一步研究聚焦于将人机交互装配整合到 WWL 中，并建议使用行为树¨（BTs）（Colledanchise 和 Ogren，2018年）作为这些流程的标准任务级表示（Behery 等人（2023年审稿中））。

版权所有 © 2023年，人工智能促进协会（www.aaai.org）。保留所有权利。

行为树以树结构对机器人的行为建模，其中叶节点表示原子动作和条件，内部节点则用于控制流。执行从对根节点进行滴答开始，该操作会将此滴答 向下传递至叶节点。当一个节点收到滴答时，它会将执行状态返回给其父节点，从而实现实时执行监控以及计划综合与修复。

本文提出使用封装在行为树节点中的标准化、可参数化安全功能。我们提出使用控制屏障函数（CBF）（Ames 等，2019年），并将其与传统¨ ¨行为树（Ozkahraman 和 Ogren，2020年）相结合，构建控制屏障函数行为树（CBF-BT），以保证收敛性和安全性。

本文其余部分的结构如下：下一节将介绍 WWL 中数字影子、行为树和控制屏障函数的背景知识及相关工作。随后，我们将讨论所提出的标准控制屏障函数，以表示人机交互流程中的不同安全方面。最后，本文将总结全文并提出未来工作的建议。

背景与相关工作

WWL 提供了一种基础设施，用于公司内部不同实体之间以及跨越公司边界的实体之间进行通信（Liebenberg 和 Jarke，2020年）。WWL 中的实体通过各自的数字影子来表示；数字影子是针对特定任务和目的，对实体进行的投影，例如流程、机器和产品等。与广泛使用的数字孪生不同，数字孪生表示实体的完整仿真（Liebenberg 和 Jarke，2020年），而数字影子可用于质量预测和计划修复等实时应用（Liebenberg 2021）。先前的研究（Bauernhansl、Hartleif 和 Felix，2018年）提出了数字影子的相关要求，并将其划分为不同的复杂度级别和开发里程碑。

由于机器人学，尤其是人机协作流程，涉及运动控制、感知、规-划和人身安全等多个领域，因此需要将多个数字影子全面集成到 WWL 中。数十年来，人们一直在开发针对不同机器人活动的任务级表示。这些表示通常涉及对领域进行建模，例如规划领域定义语言（PDDL）（McDermott，2003年），开发人员必须对机器人的能力以及世界的初-始状态和目标状态进行建模。

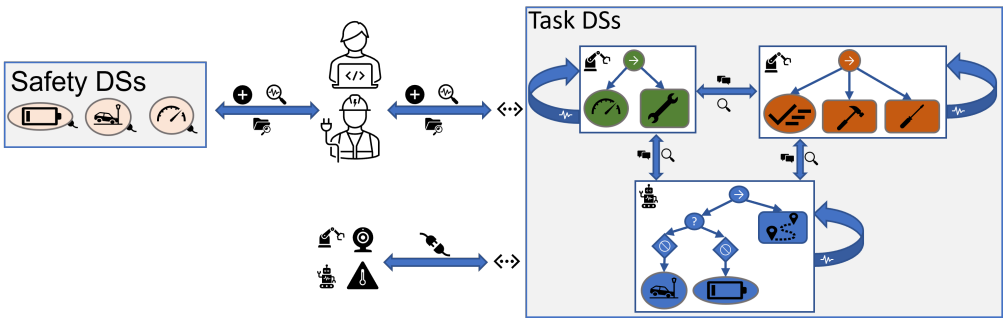


图1：Behery 等人提出的架构（2023年审稿中）集成于 WWL（Liebenberg 和 Jarke，2020年）中。人工操作员可添加、检查并查询不同智能体任务表示的数字影子。他们还可以共享封装了控制屏障函数的条件节点，并将其用于现有行为树。此外，数字影子还可以彼此通信并进行自优化，如 Bauernhansl、Hartleif 和 Felix，2018年所提出的方法。

和目标状态。之后，智能体便可制定计划，从前者到达后者。近期研究展示了这些系统与基于规则的系统之间的组合与转换（Niemueller、Hofmann 和 Lakemeyer，2019年），将目标推理与遥反应式程序结合起来。然而，由于这些范式依赖于问题、领域和机器人描述，因此模块化程度不足，无法实现代码复用与交换。

¨行为树（Colledanchise 和 Ogren，2018年）最近被机器人学界采用，以克服这些问题。其结构允许更改或移除整个树分支，而不影响树的其余部分。与有限状态机或分层任务网络等其他基于图的模型相比，修改树所需的精力和时间更少，因为转换已编码在树结构中，无需在每次更改时显式建模和维护。

最近，这些函数与控制屏障函数相结合，以确保它们能够同时满足目标，使行为树能够在不违反安全¨ ¨规则的情况下，朝着多个给定目标运行（Ozkahraman 和 Ogren，2020年）。控制屏障函数是一种函数h： $R^n \rightarrow R$ 用于根据安全性评估系统状态 x，其中 $h(x) \geq 0$ 意味着 x 是安全状态。它们被封装在行为树的条件节点中，这些节点随后可以选择适当的操作，使机器人保持在安全状态集合内，同时不与先前已满足的条件相矛盾。

将控制屏障函数与预定义 API 结合用作安全领域特定语言

¨ ¨Ozkahraman 和 Ogren（2020年）将控制屏障函数与行为树相结合，以实现具有不同优先级的目标。通过利用树的结构解决目标冲突，使机器人能够优先考虑安全，而非任务执行。我们提议通过 WWL 维护一个包含控制屏障函数的条件节点池，让学术界和工业界的从业者能够跨越公司边界共享和交换标准且明确的安全要求。此前的工作（Liebenberg 2021）讨论并演示了通过 WWL 交换流程领域特定语言，其中流程领域特定语言被用于多个用例中的实时计划修复。

Behery 等人（2023年审稿中）提出将行为树标准化为涉及人机交互的装配流程的任务级数字孪生。行为树的模块化特性允许添加、移除和交换节点、分支以及完整的子树，从而增加新的安全层级（例如，通过前置条件保护动作），或在发生故障时采用替代行为。

我们对 WWL架构的扩展如图1所示，该架构由（Liebenberg 2021；Behery等人（2023年审稿中））提出。除了存储、共享和查询任务级描述外，我们还允许人工操作员交换安全功能，例如检查电池、关节速度，或检查机器人所在单元内是否有人。这些功能均可拥有自己的机器人中间件（例如 ROS）接口，从而读取电池或关节状态等信息，或读取三维点云数据等其他感知信息。它们可以将这些类型输入的主题名称作为参数，并直接连接到相应主题；由于它们是条件节点，其返回状态用于表示系统是否处于安全状态。由于控制屏障函数可以组合，因此可以构成安全分支并添加到行为树中，以增强安全性而不影响树的核心任务。

结论与未来工作

我们建议在基于人机协作的装配流程中使用标准数字影子来保障安全。按照 Ozkahraman 和 Ogren，2020年提出的方法，将封装在行为树条件节点中的控制屏障函数存储起来，可在 WWL 内交换和重复使用这些函数。这些函数可用于基准测试，以评估不同人机协作范式下新提出方法的安全性。仍有一些问题尚待解决，例如如何创建控制屏障函数与感知模块或底层知识库之间的通用抽象编程接口（API）。另一个方向是设计用于定义这些函数及其参数的接口，尤其是涉及训练且需要泛化保证的情形。这与 Behery 等人（2023年审稿中）提出的路线图一致，该路线图旨在实现 WWL 中数字影子的自动注册、修改和优化。

致谢

本研究由德国研究联合会（DFG，德国研究基金会）根据德国卓越战略——生产互联网卓越集群（EXC-2023，项目编号：390621612）资助。本研究还得到欧盟 ICT-48 2020 项目 TAILOR（编号：952215）的支持。

参考文献

Ames, A. D.; Coogan, S.; Egerstedt, M.; Notomista, G.; Sreenath, K.; and Tabuada, P. 2019年. 控制屏障函数：理论与应用。发表于 *2019*年第*18*届欧洲控制会议（*ECC*），3420–3431。IEEE。Baier, R.; Dammers, H.; Mertens, A.; Behery, M.; Gossen, D.; Nouduri, S.; Pelzer, L.; Shahidi, A.; Trinh, M.; Brecher, C.; et al. 2022年. 人机交互分类框架：生产互联网中的应用。发表于 国际人机交互会议，427–454。Springer。Bauernhansl, T.; Hartleif, S.; and Felix, T. 2018年. 生产的数字影子——动态工业环境中实现有效、高效信息供给的概念。*ProcediaCIRP*，72：69–74。Behery, M.; Brauner, P.; Kluge-Wilkes, A.; Baier, R.; Mertens, C., Alexander Brecher; Ziefle, M.; and Lakemeyer, G. 2023年审稿中. 世界实验室机器人装配的数字影子。*ProcediaCIRP*.¨Colledanchise, M.; and Ogren, P. 2018年. 机器人学与人工智能中的行为树。CRC 出版社。ISBN 9780429950902。Liebenberg, M. 2021年. 面向世界实验室的自主智能体：制造业中的人工智能。博士论文，亚琛工业大学。Liebenberg, M.; and Jarke, M. 2020年. 数字影子与信息系统工程：概念与案例研究。发表于 高级信息系统工程国际会议，70–84。Springer。McDermott, D. 2003. PDDL中流程的形式语义。发表于 *ICAPS PDDL*研讨会论文集，101–155。Citeseer。Niemueller, T.; Hofmann, T.; and Lakemeyer, G. 2019年. CLIPS执行器中用于集成规划与执行的目标推理。发表于 国际自动规划与调度会议论文集，第29卷，754–763。¨ ¨ ¨Ozkahraman, O.; and Ogren, P. 2020年. 将控制屏障函数与行为树结合，用于多智能体水下覆盖任务。发表于 *2020*年第*59*届*IEEE*决策与控制会议（*CDC*），5275–5282。IEEE。