软件学报ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW E-mail: jos@iscas.ac.cn

*Journal of Software*, [doi: 10.13328/j.cnki.jos.000000] http://www.jos.org.cn

©中国科学院软件研究所版权所有. Tel: +86-10-62562563

自主移动机器人永恒探索算法的符号化模型检测方法[[1]](#footnote-1)\*

蔡晓伟1,2, 张 民1,2

1(华东师范大学,上海市高可信计算重点实验室,上海 普陀 200062)

2(华东师范大学,计算机科学与软件工程学院,上海 普陀 200062)

通讯作者: 张民, E-mail: zhangmin@sei.ecnu.edu.cn

摘 要: 随着物联网技术的发展,自主移动体(autonomous mobile agents)在网络中的作用也日益重要,利用形式化的方法验证自治移动体行为的正确性逐渐成为新的研究热点.当前主要的验证方法多以初始状态已知为前提且面临状态爆炸问题.本文以自治移动机器人最小探索算法为例,提出自治移动体符号化模型检测方法,该方法不依赖某个具体的初始状态,且适用于不同的调度模型.同时,借助符号化模型检测的高效性,有效避免了状态爆炸问题. NuSMV符号化模型验证工具对机器人探索算法在三种同步模型:完全同步模型（FSYNC,Full-synchronous model）、半同步模型（SSYNC,Semi-synchronous model）、完全异步模型（ASYNC,Asynchronous model）进行建模并利用LTL公式定义算法的性质,最终实现算法的形式化验证. 验证结果表明在假设初始状态未知的条件下依然可验证性质,当不被满足时,实验结果会找到反例.同时,实验数据表明了符号化模型检测对自治移动机器人算法形式化验证的高效性.

关键词: 移动机器人;永恒探索;符号化模型检测;NuSMV;LTL;

中图法分类号: TP311

中文引用格式:蔡晓伟,张民. 自主移动机器人永恒探索算法的符号化模型检测方法. 软件学报.http://www.jos.org.cn/1000-9825/ 0000.htm

英文引用格式:Tsai X., Zhang M. Symbolic Model Checking Approach to Formal Mobile Robots Perpetual Exploration Algorithm. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2016 (in Chinese).http://www.jos.org.cn/1000-9825/0000.htm

Symbolic Model Checking Approach to Formal Mobile Robots Perpetual Exploration Algorithm

TSAI Xiaowei1,2, ZHANG Min1,2

1(Shanghai Key Lab of Trustworthy Computing, ECNU, Shanghai 200062, China)

2(MoE International Joint Lab of Trustworthy Software (ECNU), Shanghai 200062, China)

**Abstract**: With the development of Internet of Things technology, The role of autonomous mobile robots in the network is also increasingly important. Using formal methods to verify the correctness of autonomous mobile behavior has become a new research hotspot. At present, the main verification methods are based on the known initial state and face the state explosion problem.In this paper, the Min-Algorithm of autonomous mobile robot is taken as an example, A symbolic model checking method for autonomous mobile agents is proposed, The method does not depend on a specific initial state and is applicable to different scheduling models. By means of symbolic model detection of high efficiency, avoid the state explosion problem, effectively. Describing mobile robot exploration algorithm in three scheduling models:full synchronization model (FSYNC, Full-synchronous model), semi-synchronous model (SSYNC, Semi-synchronous model), asynchronous model (ASYNC, Asynchronous model) with NuSMV symbolic model validation tool, and using the LTL formula to define the nature of the algorithm and finally implement the formal verification of the algorithm. The results of the verification indicate that the nature is still validated under the condition that the initial state is unknown. When not satisfied, the experimental results will find a counter-example. At the same time, the experimental data show that the symbolic model is effective for the formal verification of autonomous mobile robot algorithm.

**Key words**: Mobile robots; Perpetual exploration; Symbolic model checking;NuSMV;LTL

近年来，人工智能技术和计算技术的快速发展，自主智能移动机器人研究的关注也越来越多. 要求机器人可以通过自身的传感器，如红外传感器、测距仪、测速仪、图像设备等自动获取环境信息，构建环境模型、识别自身位置，并且根据获取的数据信息，按照预先设定的移动算法移动，自主协作完成指定的任务。目前自主机器人的研究中，存在很多研究模型，主要分为两类，连续空间模型和离散空间模型。在离散空间模型中，空间划分为有限数量的位置，离散空间很容易使用图来表示，结点表示空间中机器人可以到达的位置，边表示机器人可以通过的路径。机器人信息采集、空间探索、巡查任务主要使用的是离散空间模型。

离散空间模型中，提出了最小移动算法(the Min-Algorithm)和最大移动算法(the Max- Algorithm)以及相关的性质。在获取上述成果中，使用的是通过手动数学逻辑推演和可能出现的案例进行论证, 这样的证明方法不仅十分繁琐而且很容易出错。近期使用形式化的验证方式已经被实现，Béatrice Bérard使用了DiVinE和ITS工具对最小移动算法在完全同步模型、半同步模型、异步模型分别进行建模，成功验证在完全同步模型、半同步模型下，最小移动算法具备永恒探索性质，而在异步模型下不满足。在Ha Thi Thu Doan使用重写逻辑语言Maude对最小机器人算法在异步模型下进行建模，使用LTL公式描述移动性质，获得相同不满足永恒探索性质的结论，并获取具体的反例状态路径。他们建模主要是在固定环形图的大小、机器人初始位置状态下完成验证建模和验证，解决了初始状态已知情况下，机器人算法是否满足永恒探索性质的验证与分析。

本文中使用NuSMV符号化模型检测方法，对机器人移动算法在完全同步模型、半同步模型、异步模型分别进行建模，LTL公式描述移动机器人在初始位置和永恒探索性质，验证移动算法是否满足永恒探索性质。

移动机器人网络是近几年出现的一种很有研究价值的分布式计算模型。具体是指可以在没有任何中央协调系统的情况下, 机器人自主组织和合作, 完成指定任务. 这种多机器人协作应用系统包括地图绘制、环境监测、危险区域救援、未知环境探索等. 在这些应用场景中，自治机器人移动算法的可靠性是至关重要的.

自治移动机器人移动永恒探索算法相关的文献中通常包括算法正确性的证明。其中, 大多数移动算法是通过手动数学逻辑推演和可能出现的案例进行论证, 这样的证明方法不仅十分繁琐而且很容易出错, 可信度也比较低.

References:

1. Wang Q, Wu SJ, Li MS. Software defect prediction. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2008,19(7):15651580 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/1565.htm
2. Hall T, Beecham S, Bowes D, Gray D, Counsell S. A systematic literature review on fault prediction performance in software engineering. IEEE Trans. on Software Engineering, 2012,38(6):12761304.
3. Yu SS, Zhou SG, Guan JH. Software engineering data mining: A survey. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2012,6(1):131 (in Chinese with English abstract).
4. Radjenovic D, Hericko M, Torkar R, Zivkovic A. Software fault prediction metrics: A systematic literature review. Information and Software Technology, 2013,55(8):13971418.
5. Akiyama F. An example of software system debugging. In: Proc. of the IFIP Congress. 1971. 353359.
6. Halstead MH. Elements of Software Science (Operating and Programming Systems Series). New York: Elsevier Science Inc., 1977.
7. McCabe TJ. A complexity measure. IEEE Trans. on Software Engineering, 1976,2(4):308320.
8. Chidamber SR, Kemerer CF. A metrics suite for object oriented design. IEEE Trans. on Software Engineering, 1994,20(6): 476493.
9. Basili VR, Briand LC, Melo WL. A validation of object-oriented design metrics as quality indicators. IEEE Trans. on Software Engineering, 1996,22(10):751761.
10. Subramanyam R, Krishnan MS. Empirical analysis of CK metrics for object-oriented design complexity: Implications for software defects. IEEE Trans. on Software Engineering, 2003,29(4):297310.
11. Zhou YM, Xu BW, Leung H. On the ability of complexity metrics to predict fault-prone classes in object-oriented systems. Journal of Systems and Software, 2010,83(4):660674.
12. Zhou YM, Leung H, Xu BW. Examining the potentially confounding effect of class size on the associations between object- oriented metrics and change-proneness. IEEE Trans. on Software Engineering, 2009,35(5):607623.
13. Zhou YM, Xu BW, Leung H, Chen L. An in-depth study of the potentially confounding effect of class size in fault prediction. ACM Trans. on Software Engineering and Methodology, 2014,23(1):10:110:51.
14. Zhao YY, Yang YB, Lu HM, Zhou YM, Song QB, Xu BW. An empirical analysis of package-modularization metrics: Implications for software fault-proneness. Information and Software Technology, 2015,57:186203.
15. Yang YB, Zhou YM, Lu HM, Chen L, Chen ZY, Xu BW, Leung H, Zhang ZY. Are slice-based cohesion metrics actually useful in effort-aware post-release fault-proneness prediction? an empirical study. IEEE Trans. on Software Engineering, 2015,41(4): 331357.
16. Sarkar S, Kak AC, Rama GM. Metrics for measuring the quality of modularization of large-scale object-oriented software. IEEE Trans. on Software Engineering, 2008,34(5):700720.
17. Meyers TM, Binkley D. An empirical study of slice-based cohesion and coupling metrics. ACM Trans. on Software Engineering and Methodology, 2007,17(1):2:127.

附中文参考文献:

[1] 王青,伍书剑,李明树.软件缺陷预测技术.软件学报,2008,19(7):15651580. http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/1565.htm

[3] 郁抒思,周水庚,关佶红.软件工程数据挖掘研究进展.计算机科学与探索,2012,6(1):131.

1. \* 基金项目: 国家自然科学基金(00000000, 00000000); 南京大学计算机软件新技术国家重点实验室开放课题(KFKT00000000)

   Foundation item: National Natural Science Foundation of China (00000000, 00000000); State Key Laboratory for Novel Software Technology (Nanjing University)开放课题 (KFKT00000000)

   收稿时间: 0000-00-00; 修改时间: 0000-00-00; 采用时间: 0000-00-00; jos在线出版时间: 0000-00-00

   CNKI在线出版时间: 0000-00-00 [↑](#footnote-ref-1)