

自主机器人的主动观察模式及软件实现架构

肖怀宇, 杨硕, 毛新军

引用本文

肖怀宇, 杨硕, 毛新军. [自主机器人的主动观察模式及软件实现架构](#)[J]. 计算机科学, 2023, 50(9): 90-100.

XIAO Huaiyu, YANG Shuo, MAO Xinjun. [Active Observation Schemes and Software Implementation Architecture of Autonomous Robot](#) [J]. Computer Science, 2023, 50(9): 90-100.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[自主机器人的伴随观察模式及其软件实现框架](#)

Adjoint Observation Schemes and Software Implementation Framework for Autonomous Robots
计算机科学, 2023, 50(7): 1-9. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.221200020>

[知识问答社区及其激励机制的建模与仿真分析](#)

Modeling and Simulation of Q&A Community and Its Incentive Mechanism
计算机科学, 2020, 47(6): 32-37. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.191000088>

[基于特征提取的开源社区Fork摘要自动生成方法](#)

Approach of Automatic Fork Summary Generation in Open Source Community Based on Feature Extraction
计算机科学, 2020, 47(3): 25-33. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.191000087>

[自适应系统软件传感器设计与实现](#)

Design and Implementation of the Software-sensor of Self-adaptive System
计算机科学, 2010, 37(8): 152-155293.

[基于行为检测的机器人安全保护方法](#)

Method for Ensuring Safety of Robot Based on Behavior Detection
计算机科学, 2016, 43(8): 183-189. <https://doi.org/10.11896/j.issn.1002-137X.2016.08.037>

自主机器人的主动观察模式及软件实现架构

肖怀宇^{1,2} 杨 硕³ 毛新军^{1,2}

1 国防科技大学计算机学院 长沙 410073

2 湖南省复杂系统软件工程重点实验室 长沙 410073

3 国防科技大学系统工程学院 长沙 410073

(xiaohuaiyu20@nudt.edu.cn)

摘要 自主机器人运行在开放环境中,对环境信息的感知受限,难以获得有关环境完整、及时的信息。为有效完成任务,自主机器人需要主动地观察环境,即根据任务的需求,自发地决策、调度和执行观察行为,针对性地获取与任务相关的环境信息。主动观察的需求给自主机器人的观察模式以及软件系统构造提出了两方面的挑战:一方面,为支持任务的有效实现,需设计主动的观察模式,从机制层面确保自主机器人能够基于任务需求,观察所需的环境信息;另一方面,主动的观察模式导致自主机器人观察、决策等软构件的功能抽象和数据交互更为复杂,需要针对上层复杂机制的实现设计适配的软件架构。为应对上述挑战,文中将自主机器人的行为定义为任务行为和观察行为两类,针对开放环境中两类典型的环境信息受限场景——片面观察场景和过时观察场景,提出了两类主动观察模式来构建观察行为与任务行为的协同机制,并基于这两类主动观察模式设计了观察行为的决策和调度算法。另外,还设计了一个基于多智能体系统的自主机器人软件架构,实现了所提出的主动观察模式。最后,为验证所提出的主动观察模式的有效性,选取开放环境中一个典型的任务——图书馆服务机器人的图书传送任务开展实验验证。该任务中,自主机器人对图书的位置信息受限,容易导致图书传送任务失败。文中选取当前自主机器人领域主流的反应式观察和伴随观察模式作为对比方法,通过从行为执行过程、行动轨迹和时间消耗3方面进行对比,验证了所提方法的有效性。

关键词: 自主机器人;开放环境;观察行为;主动观察模式;自主机器人软件

中图法分类号 TP311

Active Observation Schemes and Software Implementation Architecture of Autonomous Robot

XIAO Huaiyu^{1,2}, YANG Shuo³ and MAO Xinjun^{1,2}

1 College of Computer Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

2 Key Laboratory of Software Engineering for Complex Systems, Changsha 410073, China

3 College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

Abstract Autonomous robots operate in the open environment, their perception of environmental information is limited, and it is difficult to obtain complete and timely information about the environment. In order to effectively complete tasks, autonomous robots need to actively observe the environment, that is, according to the requirements of tasks, to make decisions, schedule and execute observation behaviors spontaneously, and obtain task-related environmental information. The demand for active observation poses two challenges to the observation scheme of autonomous robots and the construction of software systems. On the one hand, in order to support the effective implementation of tasks, active observation schemes should be designed to ensure that autonomous robots can observe the required environmental information based on task requirements from the mechanism level. On the other hand, the active observation schemes make the function abstraction and data interaction of the software components such as observation and decision-making of autonomous robots more complicated, so it is necessary to design a software architecture suitable for the implementation of the complex mechanism on the upper level. In order to deal with the above challenges, this paper defines the behaviors of autonomous robots as task behaviors and observation behaviors. Two kinds of active observation schemes are proposed to construct a collaborative mechanism between observation behaviors and task behaviors, aiming at the two typical scenes with limited environmental information in the open environment: one-sided observation and outdated observation scenes, and the decision and scheduling algorithms of observation behavior are designed based on these two active observation schemes. In addition, an autonomous robot software architecture based on the multi-agent system is designed to implement the proposed active

到稿日期:2022-12-08 返修日期:2023-04-20

基金项目:国家自然科学基金(62172426)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(62172426).

通信作者:杨硕(yangshuo11@nudt.edu.cn)

observation schemes. Finally, in order to verify the effectiveness of the proposed active observation schemes, a typical task in the open environment: the book transfer task of the library service robot is selected to carry out experimental verification. In this task, the location information of the book is limited by the autonomous robot, which easily leads to the failure of the book transfer task. In this paper, the reactive observation and the accompanying observation schemes of the current mainstream in the field of autonomous robots are selected as the comparison method, and the effectiveness of the proposed method is verified by comparing the behavior execution process, motion trajectory and time consumption.

Keywords Autonomous robot, Open environment, Observation behavior, Active observation scheme, Autonomous robot software

1 引言

近年来,越来越多的自主机器人被应用于人类社会的各类开放服务型领域,与开放环境持续交互,通过自主决策和执行行为完成任务^[1]。开放环境的动态性和部分可观察性导致自主机器人对环境信息的感知受限,从而无法获得有关环境完整、及时的信息,也因此难以决策产生有效的行为实现任务^[2]。例如,在图书馆服务场景下,自主机器人需要根据读者的需求,导航至图书位置为读者取书。然而,该场景下图书位置可能发生变动,自主机器人无法全面、及时地获知目标图书的位置情况,导致决策的行为无法有效传送图书。自主机器人受限的环境信息成为制约任务有效实现的关键因素。

在任务执行过程中,自主机器人通过观察结果来更新环境信息,并基于这些环境信息决策产生行为以完成任务^[3-4]。然而,在大部分工作中,自主机器人采取的观察模式缺乏主动性,即自主机器人在任务过程中无法自发地根据任务需求决策、调度和执行观察行为,难以按需、高效地获得与任务相关的环境信息。同样以图书馆服务场景为例,自主机器人往往在面临图书位置信息缺失而无法完成抓取的情况时,才会触发搜索图书位置的观察行为。这使得自主机器人在片面、过时的环境信息下进行决策,决策出的行为序列难以有效地完成任务。因此,自主机器人需要更加主动地对环境进行观察:即在明确观察动机的前提下,自发地决策、调度和执行观察行为,使自主机器人能够在合适的时机和地点,进行针对性的观察,全面、及时地获取与任务相关的环境信息,减少环境信息受限这一限制性因素对任务实现的影响。

主动观察的上述需求给自主机器人的观察模式和软件架构设计带来了挑战。一方面,主动观察要求自主机器人明确开放环境中会导致环境信息受限的场景。在此基础上,需要进一步明确自主机器人应当观察的目标,以及决策、调度和执行观察行为的时间和地点,这使得自主机器人观察模式的设计变得更加复杂和困难。另一方面,主动的观察模式带来的复杂机制要求自主机器人软件系统提供支持观察、决策等功能的软构件,并支持这些软构件之间的灵活交互,这使得抽象和设计一个有效适配主动观察模式的自主机器人软件架构变得复杂。

针对上述挑战,本文首先分析开放环境下两类典型的、自主机器人环境信息受限的场景,提炼出两类观察的动机:片面观察导致的信息缺失需要自主机器人进行观察;过时观察导致的环境信息与当前环境不一致需要自主机器人进行观察。在此基础上,本文将自主机器人行为明确定义为任务行为和观察行为两类,并提出针对片面观察和过时观察的两类主动

观察模式,显式定义这两类行为间的协同机制,明确了观察行为的观察目标和执行地点。其次,本文基于上述主动观察模式提出了二阶段的观察行为决策算法和在线评估的观察行为调度算法,明确观察行为的产生和执行时机,有效实现观察结果的及时反馈和行为的自适应调整。另外,本文基于多智能体系统设计和开发了一个自主机器人软件架构,用于实现上述主动观察模式。最后,本文设计了一个图书传送实验,分别选取了反应式观察和伴随观察模式进行对比,从行为执行过程、行动路径和时间消耗3方面验证了所提模式的有效性。

本文第2章介绍了相关工作;第3章介绍了自主机器人的主动观察模式以及相关决策和调度算法;第4章介绍了基于多智能体系统的自主机器人软件架构;第5章分析了实验结果;最后总结全文。

2 相关工作

近年来,机器人和软件工程领域涌现出了许多工作,共同致力于提高开放环境下自主机器人任务实现的健壮性和有效性。一方面,机器人研究学者围绕如何增强自主机器人的观察能力,从行为控制方面,研究自主机器人的观察模式;另一方面,软件工程领域从功能抽象、软件构造等角度考虑软件系统对自主机器人观察的支持。本章将从自主机器人的观察模式和软件架构两个方面介绍现有工作进展,并分析和讨论其优势和不足。

2.1 自主机器人的观察模式

2.1.1 领域相关的观察模式

领域相关的观察模式指自主机器人针对具体领域问题,采取的特殊观察模式。在抓取领域中,对物体的抓取高度依赖于环境状态,需要自主机器人对当前环境有一个全面、清晰的认知,并基于该认知进行大量的计算。因此,自主机器人通常遵循着“sense-plan-grasp”^[5-7]的观察模式。在导航领域中,自主机器人需要实时监控环境信息,避免发生碰撞。因此,自主机器人往往采取持续性的观察模式^[8-9]。在搜索领域中,自主机器人需要排除环境中的干扰项,以获得更佳观察视野,自主机器人常常采取“act to see, see to act”^[10]的观察模式。领域相关的观察模式在其专注的领域具有优秀的性能,但是由于其太过聚焦于具体领域的特征,难以泛化到其他问题中。

2.1.2 反应式观察模式

反应式观察模式指自主机器人根据用户设定的规则触发观察的一类观察模式。反应式观察模式被广泛应用于需要应急处理的任务。在陪护任务中^[11],当陪护人员的位置信息丢失时,自主机器人触发观察行为,搜索陪护人员的位置。在导航任务中^[12],当环境模型与感知数据出现偏差时,自主机器

人触发观察行为,观察周围环境修正环境模型。在文献[13]中,当高速移动的物体接近人们时,自主机器人触发观察行为,持续检测和跟踪物体的运动情况,帮助人们安全移动。文献[14]提出了一种基于深度强化学习的反应式观察模式,当自主机器人发现环境中存在未观察的部分时,将会触发环绕四周的观察行为,减少环境的不确定性。ROSPlan^[15]提供了一个实现反应式观察模式的软件框架,开发者可以单独编写观察行为节点,当满足观察行为的触发规则时,自主机器人能够取消当前行为,转而执行观察行为。反应式观察模式能够使自主机器人快速地对环境变化做出反应,具有很强的实时性。但是其缺乏从长远角度考虑观察行为的决策和执行。

2.1.3 主动观察模式

主动观察模式要求自主机器人明确进行观察的目的,进而选定观察的目标,并确定进行观察的时间、地点和方式^[16]。基于主动观察模式的自主机器人进行观察时具有鲜明的自发性。在文献[17]中,为了确保任务的可行性和可信性,自主机器人在行为规划过程中,决策产生观察行为来验证动作的可操作性。在文献[18]中,为提高基于 Planning Domain Define Language 规划系统任务执行的健壮性,自主机器人将会针对动作的前提条件和执行效果决策和执行观察行为。文献[19-20]针对开放环境带来的不确定性问题,提出了伴随观察模式监控任务的执行情况,以确保任务健壮的完成。主动观察模式赋予了自主机器人内在的观察动机,使自主机器人能够根据任务需要,自发地决策、调度和执行观察行为,针对性地获取与任务相关的环境信息。为解决开放环境下自主机器人环境信息感知受限的问题提供了参考方案。

2.2 自主机器人的软件架构

自主机器人的软件架构描述了软件的组成部件以及部件间的交互方式,反映了自主机器人的行为决策逻辑。围绕这一研究课题,逐步形成了审慎式架构和基于行为的架构两类自主机器人软件架构。

2.2.1 审慎式架构

在审慎式架构中,自主机器人将其获取到的环境信息存储到知识库中,并通过推理来决定执行的行为。其软件通常包含传感部件、环境模型部件、规划部件以及执行部件^[4]。审慎式架构使自主机器人能够基于当前信息做出合理的规划,适用于环境建模准确的场景,而这样的要求在真实环境中是难以满足的。因此,大量工作通过扩展审慎式架构来满足实际任务需求。在文献[21]中,在审慎式架构的基础上,增加了学习部件,使自主机器人在任务执行过程中能以符号表示学习到的技能。在文献[22]中,通过将审慎式架构与反应式架构结合,构造自主机器人集群控制软件,以反应性个体的相互作用,从群体层面体现审慎性。虽然审慎式架构被广泛应用于自主机器人软件,但是其观察行为被限制在固定的环节,导致自主机器人难以灵活地执行观察行为。

2.2.2 基于行为的架构

在基于行为的架构中,行为是一个包含了诸多约束、用于实现和维护某一目标的软件模块。基于行为的架构的自主机器人软件呈现出了分布性的特点。与审慎式架构相比,其

不具备中心化的世界模型。Brooks^[23]提出了一个基于行为的层次式架构,用于构造移动机器人软件,通过设置行为层次和引入仲裁机制来协调行为的执行,提高了自主机器人任务执行的反应性和健壮性。自此,大量的工作基于行为的架构设计和开发自主机器人软件。文献[24]基于行为的架构设计无人机控制软件,并基于优先级的方式调度行为,通过设置不同的运行模式,使无人机能够快速适应环境。文献[25]提出了一个基于行为的人形机器人安全部署框架,通过遵循一些通用的指导,将保障机器人安全运行的行为分为覆盖、临时覆盖以及主动覆盖3类,以满足不同情况下的安全需求,有效提高了自主机器人运行的安全性。虽然基于行为的架构具有较强的反应性,但是由于行为之间的独立性过强,从全局的角度看,难以协调观察行为的执行。

3 自主机器人的主动观察模式

开放环境下自主机器人的主动观察模式要求探索会影响自主机器人任务实现的环境信息受限的场景,进而明确观察的动机,并基于该动机明确观察的目标、地点和时机。本章在定义自主机器人系统后,分析图书传送任务下片面观察和过时而观察这两类环境信息受限的场景,明确自主机器人观察的动机。基于上述动机,针对性地提出两类主动观察模式,明确自主机器人观察的目标和地点,并进一步提出了观察行为的决策和调度算法,明确观察行为的产生和执行时机。

3.1 自主机器人系统

定义 1(自主机器人系统) 自主机器人系统可以使用一个元组来描述: $\Sigma = \langle S, K, A, B, \pi_s, \pi_o \rangle$ 。其中, S 表示环境状态的集合, K 表示自主机器人的知识集合, A 表示完成特定任务步骤的任务行为的集合, B 表示获取环境信息的观察行为的集合。两类行为以以行为目标为主要区分,任务行为用于完成某一具体子任务,而观察行为用于获取环境信息。两类行为的详细定义如下。

定义 2(任务行为) 由自主机器人控制效应器和传感器,完成特定任务步骤,实现环境或自身状态转移的一类行为。例如,当自主机器人需要完成传送图书任务时,自主机器人将会决策产生前往目标书架、抓取图书、前往传送目的地以及放置图书等任务行为,这些任务行为控制自主机器人的效应器和感知器,实现某一具体子任务。一个任务行为可以使用一个二元组表示,即 $\alpha = \langle \mu, \xi \rangle$,其中, μ 表示前置条件, ξ 表示执行效果。任务行为的执行可表示为:

$$\exists k \in K: (k \models \alpha(\mu)) \wedge (k' = k \cup \alpha(\xi)) \quad (1)$$

这表示任务行为在执行时,其前置条件 μ 应蕴含于自主机器人知识 k 中;在执行完成后,更新执行效果 ξ ,知识状态从 k 转移到 k' 。

定义 3(观察行为) 由自主机器人控制效应器和传感器来获取特定环境信息的一类行为。同样以传送图书任务为例,当自主机器人因缺乏目标图书位置信息而无法执行抓取图书的任务行为时,自主机器人需要以缺失的图书位置信息为目标,控制效应器和感知器观察环境,获取所需的环境信息。一个观察行为可以使用一个三元组表示,即 $\beta = \langle \rho, \sigma, \tau \rangle$,

其中, ρ 表示触发事件, σ 表示观察目标, τ 表示观察结果。观察行为的执行可表示为:

$$\exists s \in S: (s \vdash \beta(\rho)) \wedge (\beta(\sigma, s) = \tau) \quad (2)$$

这表示, 当环境 s 满足观察行为的触发条件 $\beta(\rho)$ 时, 观察行为基于观察目标 σ 观察环境 s , 并返回观察结果 τ 。

3.2 主动观察模式

本节通过一个常见的图书传送案例探索环境信息受限的场景, 进而明确自主机器人的观察动机。基于该动机, 针对性地构建出自主机器人的主动观察模式, 以明确观察目标和观察地点。

3.2.1 图书传送案例

如图1所示, 图书馆环境开放, 环境随机变化。例如, 图书可能被读者移动到其他位置。在该环境下, 自主机器人需要根据读者需求, 导航至目标图书位置, 抓取图书, 并将其传送到指定位置。



图1 现实的图书馆场景

Fig.1 Realistic library scene

1) 片面观察场景。当自主机器人接收到传送图书的任务时, 自主机器人需要导航到图书所在位置, 抓取图书进而传送图书至指定位置。然而, 由于开放环境的部分可观察性, 自主机器人获得的环境信息是片面的, 只能反映部分环境状态。当自主机器人未获取到目标图书的位置信息时, 其产生的导航、抓取等任务行为无法执行。在这种情况下, 自主机器人需要执行观察行为来搜索图书, 为任务行为的执行提供必要的图书位置信息。

2) 过时观察场景。在运行过程中, 自主机器人通过对环境的观察, 逐渐获取图书的位置信息。基于这些环境信息, 决策和执行任务行为完成传送任务。而在开放的图书馆环境中, 环境具有动态性。随着环境的变化, 图书的位置可能会发生变化。例如, 读者阅读完图书后将其放置到了其他的书架, 这造成自主机器人的观察结果过时。当自主机器人基于过时的观察结果进行决策时, 其决策的任务行为难以完成任务。在这种情况下, 自主机器人需要执行观察行为, 验证已观察到的环境信息是否与当前环境保持一致, 确保任务行为能够有效完成任务。

3.2.2 针对片面观察的主动观察模式

定义4(针对片面观察的主动观察模式) π_s 表示针对片面观察而采取的一类主动观察模式, 这类模式旨在获得任务行为缺失的环境信息。给定任务行为 α , 其前置条件 $\alpha(\mu)$ 不存在于知识状态 k 中。观察行为 β 将 $\alpha(\mu)$ 作为观察目标, 搜索相关的环境信息(见图2)。针对片面观察的主动观察模式

$\pi_s(\alpha, \beta)$ 可以表示为:

$$\exists s \in S, k \in K, \alpha(\mu) \notin k: (\tau = \beta(\alpha(\mu), s)) \wedge (\alpha(\mu) = \tau) \wedge (k' = k \cup \alpha(\mu)) \quad (3)$$

这表示自主机器人知识状态 k 中缺失任务行为 α 的前置条件 $\alpha(\mu)$ 时, 观察行为 β 将以 $\alpha(\mu)$ 为观察目标进行搜索, 基于观察结果 τ 初始化 $\alpha(\mu)$, 并更新至 k' 中。在 π_s 中, 由于自主机器人不具有 $\alpha(\mu)$ 的先验知识, 因此 β 的执行涉及对整个空间的搜索, 其观察地点为环境空间, 观察目标可能出现的所有地方。

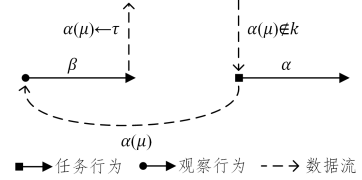


图2 针对片面观察的主动观察模式

Fig.2 Active observation scheme for one-sided observation

3.2.3 针对过时观察的主动观察模式

定义5(针对过时观察的主动观察模式) π_o 表示针对过时观察而采取的一类主动观察模式, 这类模式旨在验证自主机器人已经获知的环境信息是否与当前环境状态一致。给定任务行为 α , 其前置条件 $\alpha(\mu)$ 存在于知识状态 k 中。观察行为 β 将 $\alpha(\mu)$ 作为观察目标, 通过观察结果 τ 验证其与当前环境状态一致(T)与否(F)(见图3)。针对过时观察的主动观察模式 $\pi_o(\alpha, \beta)$ 可以表示为:

$$\exists s \in S, k \in K, \alpha(\mu) \in k: (\beta(\alpha(\mu), s) = \tau) \wedge (\tau \vdash \alpha(\mu)) ? T:F \quad (4)$$

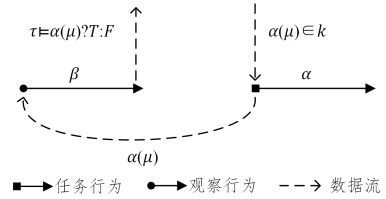


图3 针对过时观察的主动观察模式

Fig.3 Active observation scheme for outdated observation

在 π_o 中, 由于自主机器人具有 $\alpha(\mu)$ 的先验知识, 因此 β 的执行只涉及对部分空间的验证, 其观察地点为环境空间中先验知识指向的地方。两类模式在观察目标和观察地点方面的对比如表1所列。

表1 两类主动观察模式的观察目标和观察地点对比

Table 1 Comparison of observation targets and observation sites between two active observation schemes

	观察目标	观察地点
针对片面观察的主动观察模式	任务行为缺失的前置条件	环境空间中, 观察目标可能出现的所有地方
针对过时观察的主动观察模式	任务行为可能过时的前置条件	环境空间中, 前置条件指向的地方

3.3 观察行为的决策和调度算法

基于上述两类主动观察模式, 本文进一步提出了观察行为的决策以及调度算法, 明确观察行为的产生和执行时机。

3.3.1 二阶段的观察行为决策算法

观察行为不仅随着任务行为离线决策产生, 也在执行

过程中随在线决策产生,其决策流程具有显著的二阶段性(见图4)。

离线阶段,自主机器人决策产生任务行为序列 $seq_a = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]$,实现从当前状态到目标状态的转移。产生 seq_a 后,自主机器人基于主动观察模式 π_s 和 π_v 决策产生观察行为集合 $set_\beta = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m\}$ 。设观察行为的决策函数为 $observationPlan(x, y)$,其中 x 表示主动观察模式, y 表示观察目标。给定主动观察模式 x 和观察目标 y , $observationPlan(x, y)$ 将会产生相应的观察行为 β 。给定 seq_a 中的某一任务行为 α 和自主机器人知识状态 k ,当 k 中未包含任务行为的前置条件 $\alpha(\mu)$ 时,基于 π_s 决策产生针对片面观察的观察行为 β_s ;当 k 中包含 $\alpha(\mu)$,但 $\alpha(\mu)$ 的置信度 $conf$ 低于阈值 $thres$ 时,基于 π_v 决策产生针对过时观察的观察行为 β_v 。离线阶段的观察行为决策如算法1所示。

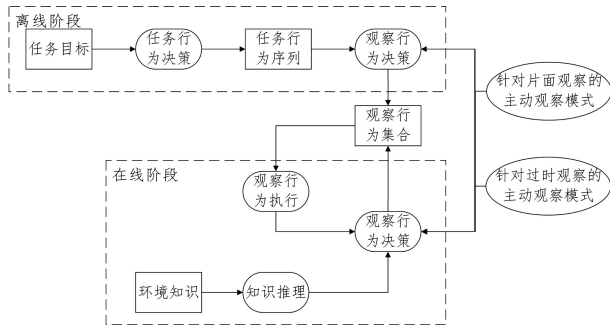


图4 二阶段的观察行为决策流程

Fig. 4 Decision-making process of two-stage observation behavior

算法1 离线阶段的观察行为决策

输入: (seq_a, k)

输出: set_β

初始化: $set_\beta \leftarrow \emptyset$

1. For $\alpha(\mu, \xi)$ in seq_a ;
2. If $\alpha(\mu)$ is not in k ;
3. $\beta \leftarrow observationPlan(\pi_s, \alpha(\mu))$;
4. Add β into set_β ;
5. Else if $\alpha(\mu)$'s $conf < thres$;
6. $\beta \leftarrow observationPlan(\pi_v, \alpha(\mu))$;
7. Add β into set_β ;
8. End;
9. End;
10. Return set_β .

在线阶段,当针对过时观察的观察行为 β_v 执行后,其观察结果 τ 显示 $\alpha(\mu)$ 与当前环境状态 s 不一致时, $\alpha(\mu)$ 缺失。此时自主机器人基于 π_s ,以 $\alpha(\mu)$ 为观察目标产生针对片面观察的观察行为 β_s (见算法2)。随着任务的执行, α 的前置条件 $\alpha(\mu)$ 的置信度 $conf$ 将会逐渐降低,当低于阈值 $thres$ 时,自主机器人将基于 π_v 产生针对过时观察的观察行为 β_v (见算法3)。

算法2 在线阶段针对片面观察的观察行为决策

输入: (α, β_v)

输出: β_s

1. If β_v verifies $\alpha(\mu)$ is inconsistent with the environment;
2. $\beta_s \leftarrow observationPlan(\pi_s, \alpha(\mu))$;

3. End;

4. Return β_s .

算法3 在线阶段针对过时观察的观察行为决策

输入: $(\alpha, thres)$

输出: β_v

1. If $\alpha(\mu)$'s $conf < thres$;
2. $\beta_v \leftarrow observationPlan(\pi_v, \alpha(\mu))$;
3. End;
4. Return β_v .

3.3.2 在线评估的观察行为调度算法

在执行过程中,任务行为和观察行为都将控制自主机器人的物理设备,可能出现资源冲突的情况。通常,任务行为 α 具有最长执行时间,这在现实世界中是常见、合理的。例如,自主机器人需要在规定时间内将书本传送至指定位置。因此,执行观察行为 β 带来的时间消耗不应造成 α 超时。这需要自主机器人在线评估执行 β 带来的时间消耗 $cost$ 是否小于 α 剩余的执行时间 $residual_time$,从而决定是否调度观察行为。在线评估的观察行为调度算法如算法4所示。

算法4 在线评估的观察行为调度

输入: (α, β)

输出: $dispatch\ result$

1. While α is not done;
2. If β 's $cost < \alpha$'s $residual_time$;
3. Suspend α and dispatch β ;
4. Return true;
5. End;
6. End
7. Return false.

4 基于多智能体系统的自主机器人软件架构

本文设计了一个基于多智能体系统的软件架构,用于实现上述主动观察模式。在主动观察模式中,观察行为的决策、执行等模块功能独立,行为之间通过交流协作的方式完成对自主机器人物理部件占用的协商。多智能体系统包含多个高内聚、具有独立行为能力的智能体,通过智能体之间的交流协作解决问题,适用于开发复杂的分布式系统^[26-27]。基于多智能体的自主机器人软件架构如图5所示。

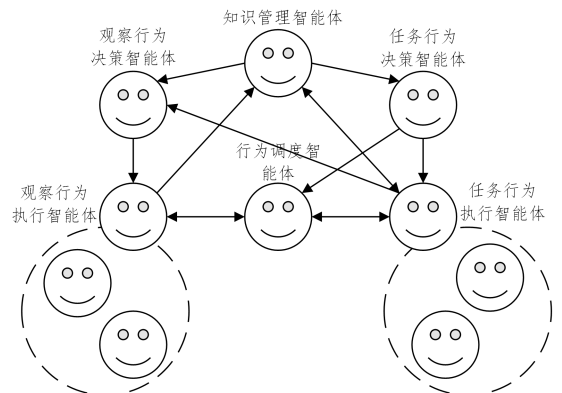


图5 基于多智能体系统的自主机器人软件架构

Fig. 5 Autonomous robot software architecture based on mutli-agent system

4.1 软件架构的智能体组成

本文主要定义了如图 5 所示的 6 类智能体,智能体的角色定义如下。

1)观察行为决策智能体。观察行为决策智能体实现了观察行为决策函数,其接收来自知识管理智能体、任务行为执行智能体的观察行为决策请求,基于主动观察模式产生观察行为,并将观察行为信息发送给相应的观察行为执行智能体。

2)知识管理智能体。知识管理智能体负责自主机器人内部知识的管理,其接收任务行为以及观察行为智能体的知识更新信号,定期广播环境信息,并评估其是否过时。

3)任务行为决策智能体。任务行为决策智能体负责任务行为的决策,其根据当前环境信息和任务目标产生任务行为序列,并将任务行为序列发送至行为调度智能体和相应的任务行为执行智能体。

4)行为调度智能体。行为调度智能体实现了在线评估的调度算法,其接收任务行为决策智能体发送的任务行为序列,调度任务行为;接收观察行为执行智能体的调度请求,评估是否挂起任务行为而执行观察行为,并返回调度信号。

5)观察行为执行智能体。每一个观察行为执行智能体对应一类具体的观察行为,其接收观察行为决策智能体发送的观察行为信息,决策观察行为的调度时机。当环境满足触发事件时,向行为调度智能体发送调度请求;当调度请求得到允许时,控制自主机器人执行观察行为。

6)任务行为执行智能体。每一个任务行为执行智能体对应一类具体的任务行为,其接收任务行为决策智能体发送的

任务行为信息,并对任务行为的前置条件进行监控,判断任务行为的可执行性;当任务行为执行智能体监控发现前置条件缺失时,发送观察行为决策请求;当接收到行为调度智能体发送的调度信号且前置条件满足的情况下,控制自主机器人执行任务行为。

上述 6 类智能体分别实现了观察行为的决策、知识的管理、任务行为的决策、行为的调度、观察行为和任务行为的执行。智能体之间通过交流完成任务,具备实现主动观察模式的基本功能。

4.2 主动观察模式的多智能体实现

基于上述 6 类智能体,本文通过定义它们之间的交互,实现了所提出的主动观察模式。

4.2.1 针对片面观察的主动观察模式的实现

如图 6 所示,当任务行为执行智能体接收到知识管理智能体发送的自主机器人知识后,判断任务行为的前置条件是否缺失。当前置条件缺失时,任务行为执行智能体向观察行为决策智能体发送缺失的环境信息。观察行为决策智能体基于该消息决策观察行为,并发送观察行为至观察行为执行智能体。观察行为执行智能体自主决策调度时机,当环境满足观察行为的执行条件时,向行为调度智能体发送调度请求。行为调度智能体通过在线评估调度请求,返回调度信号。当获得调度允许信号后,观察行为执行智能体驱动物理设备,执行观察行为搜索缺失的环境信息。当获取到缺失的环境信息时,观察行为执行智能体将环境信息更新至知识管理智能体,并向行为调度智能体发送执行结束信号,释放物理设备。

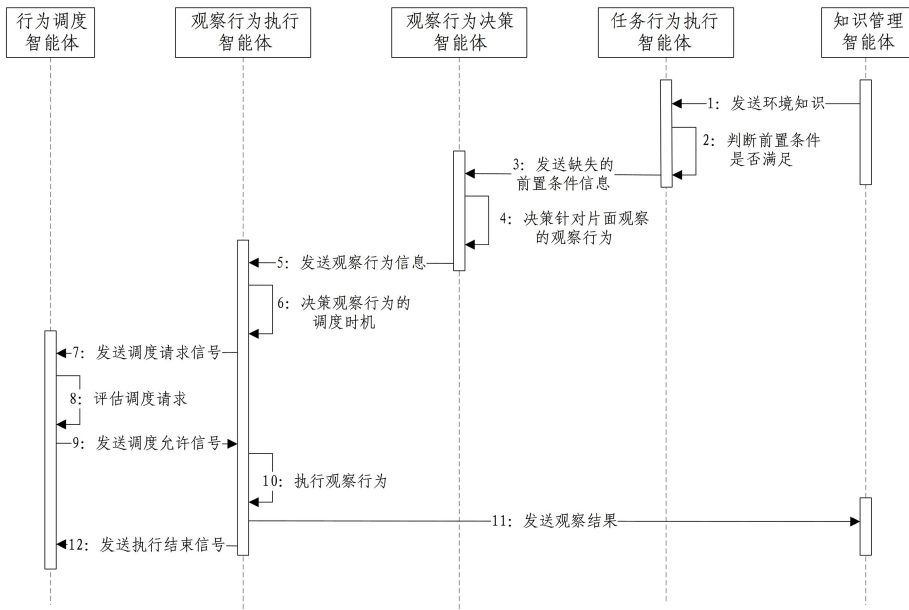


图 6 针对片面观察的主动观察模式的多智能体实现

Fig. 6 Multi-agent implementation of active observation scheme for one-sided observation

4.2.2 针对过时观察的主动观察模式的实现

如图 7 所示,观察行为决策智能体接收到知识管理智能体发送的置信度低于阈值的知识后,决策产生观察行为并将其发送至观察行为执行智能体。接收到观察行为后,观察行为执行

智能体在线决策调度时机。当环境满足调度情况时,观察行为执行智能体向行为调度智能体发送调度请求。行为调度智能体通过在线评估调度请求,返回调度信号。当获得调度允许信号后,观察行为执行智能体驱动物理设备,执行观察行为。观察行为

执行完毕后,观察行为执行智能体向知识管理智能体发送观察

结果,并向行为调度智能体发送执行结束信号,释放物理设备。

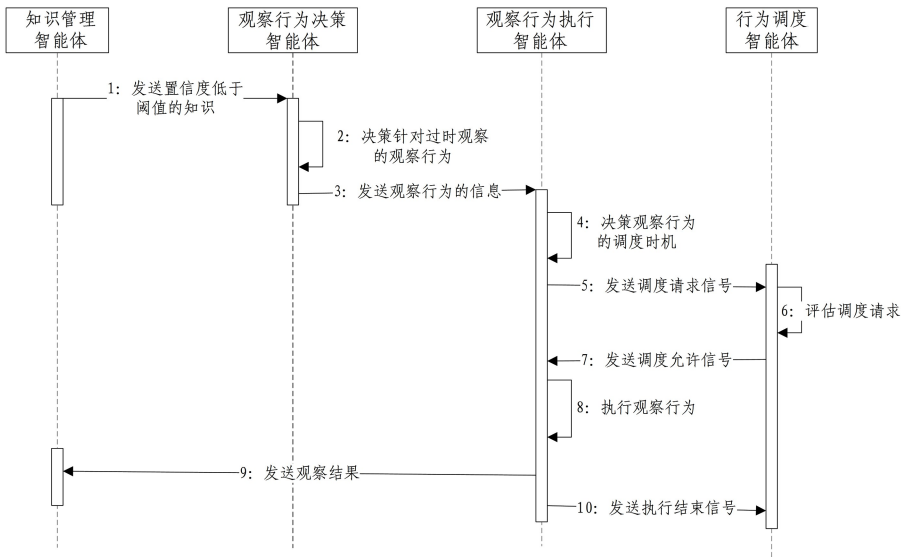


图 7 针对过时观察的主动观察模式的多智能体实现

Fig. 7 Multi-agent implementation of active observation scheme for outdated observation

5 实验结果与分析

本章设计了一个常见的图书传送案例,通过对比实验从行为执行过程、行动路径长度和执行时间消耗 3 个方面验证本文方法的有效性。

5.1 实验设计

本文设计了一个仿真环境下的传送图书的实验,实验环境的俯视如图 8 所示。实验环境中有 6 个书架和 4 张桌子,自主机器人需要将书架中的图书传送到相应的桌子上。为了简化图书的识别与抓取,本文将每一本图书都与一个 Aruco^[28] 标记绑定(见图 9)。本文选择了反应式观察模式和伴随观察模式进行对比,使用 ROSPlan^[15] 和 AutoRobot^[29] 框架进行实验。ROSPlan 基于 Robot Operate System(ROS)^[30],提供了实现反应式观察模式的框架,被广泛地用于自主机器人应用中。AutoRobot 是一个基于多智能体系统的自主机器人软件开发框架,实现了伴随行为模式。图 10 给出了主动观察、反应式观察和伴随观察模式的观察行为执行逻辑。如图 10(a)所示,主动观察模式中,观察行为在任务行为执行过程中灵活决策、交替执行;如图 10(b)所示,反应式观察模式中,观察行为由人工指定、触发执行;如图 10(c)所示,伴随观察模式中,观察行为在任务行为执行前决策,顺序执行。

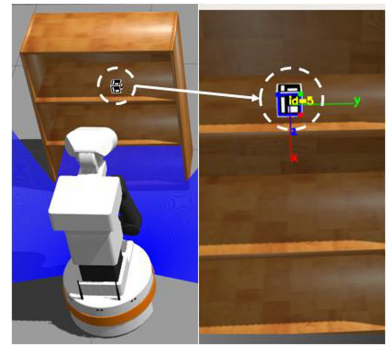


图 9 Tiago 机器人视角下的 Aruco 标记

Fig. 9 Aruco marker from the perspective of Tiago robot

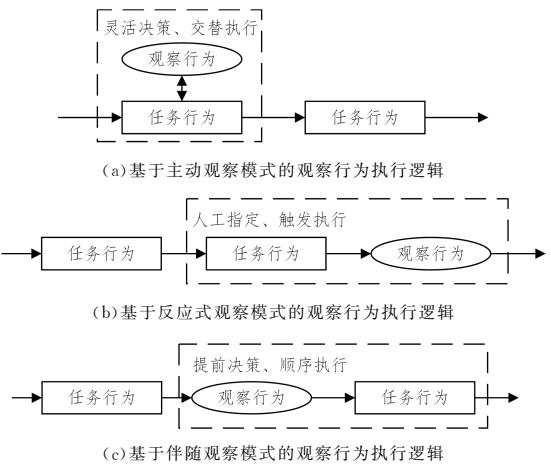


图 10 基于主动观察、反应式观察和伴随观察模式的观察行为执行逻辑

Fig. 10 Execution logic of observation behavior based on active observation, reactive observation and accompanying observation schemes

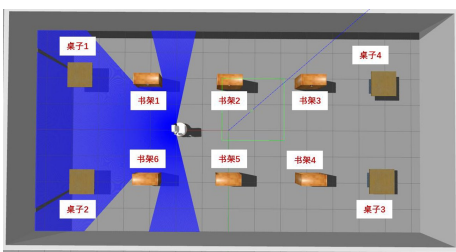


图 8 仿真环境俯视图

Fig. 8 Top view of simulation environment

本文设置了 2 个观察行为以及 4 个任务行为,行为的配置如表 2 所列。针对片面观察的观察行为,search 用于搜索

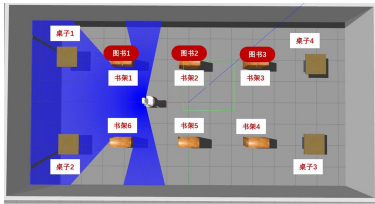
目标图书的位置信息,由于无法得知观察到目标图书的时间,其执行时间不确定;针对过时观察的观察行为 verify,用于验证目标图书是否在相应书架上,设置其最大执行时间为 15 s;任务行为 go to bookshelf 用于驱动自主机器人前往指定书架,其最长执行时间设置为 70 s;任务行为 go to table 用于驱动自主机器人前往指定书桌,其最大执行时间设置为 70 s;任务行为 fetch 用于驱动自主机器人抓取目标图书,其最大执行时间设置为 60 s;任务行为 place 用于驱动自主机器人放置图书,其最大执行时间设置为 30 s。

表 2 自主机器人行为及其配置

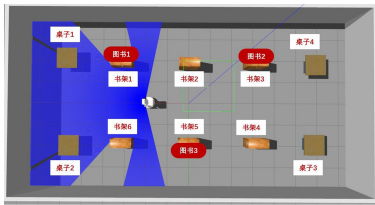
Table 2 Autonomous robot behaviors and their configurations

行为名称	行为类别	最大执行时间/s
search	针对片面观察的观察行为	—
verify	针对过时观察的观察行为	15
go to bookshelf	任务行为	70
go to table	任务行为	70
fetch	任务行为	60
place	任务行为	30

实验模拟自主机器人在运行过程中获得了图书 1 在书架 1、图书 2 在书架 2 以及图书 3 在书架 3 的环境信息,设置先验知识 $on(book1, bookshelf1)$, $on(book2, bookshelf2)$ 和 $on(book3, bookshelf3)$ (见图 11(a))。实验要求自主机器人完成如下任务:将图书 1 送至桌子 4、图书 2 送至桌子 2 以及图书 3 送至桌子 3。在实验过程中,模拟读者将图书错误放置在其他书架上的情况,将图书 2 移动至书架 3,将图书 3 移动至书架 6(见图 11(b))。即真实环境状态下,环境知识应为 $on(book1, bookshelf1)$, $on(book2, bookshelf3)$ 和 $on(book3, bookshelf5)$ 。当缺少图书位置信息无法执行任务行为时,自主机器人将会从书架 6 开始,逆时针方向遍历书架。



(a) 自主机器人建模的环境状态



(b) 实际环境状态

图 11 自主机器人建模的环境状态与实际的环境状态

Fig. 11 Environmental state of autonomous robot modeling and actual environmental state

在该场景下,自主机器人决策产生任务行为序列(见图 12)。为了避免随机性给实验结果带来影响,本文分别基于主动观察、反应式观察和伴随观察模式重复 10 次实验。

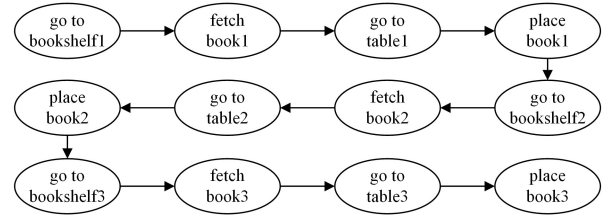


图 12 决策的任务行为序列

Fig. 12 Planned sequence of task behavior

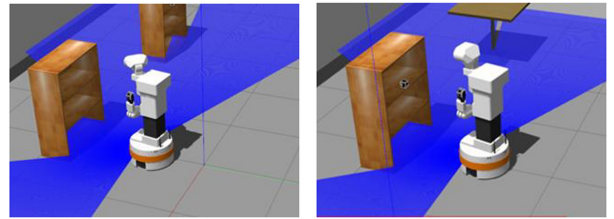
5.2 实验结果与有效性分析

本节基于 ROSPlan¹⁾ 和 AutoRobot²⁾ 框架复现反应式观察和伴随观察模式,从行为执行过程、行动路径和时间消耗 3 个方面进行比较。

5.2.1 行为执行过程分析

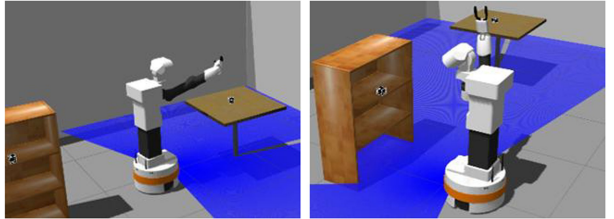
本节通过分析自主机器人在不同观察模式下,行为执行过程中具有代表性的场景,对比行为决策和调度上的差异来进行有效性分析。

图 13 给出了基于主动观察模式的自主机器人从 go to table4 到 fetch book2 的行为执行过程。



(a) 验证图书 2 的位置信息

(b) 验证图书 3 的位置信息以及搜索图书 2



(c) 放置图书 1

(d) 书架 3 处抓取图书 2

图 13 基于主动观察模式的图书传送实验片段

Fig. 13 Experimental fragments of book delivery based on active observation schemes

在前往桌子 4 的过程中,自主机器人靠近书桌 2,调度执行观察行为 verify 验证 $on(book2, bookshelf2)$ 与环境不一致(见图 13(a))。基于此,自主机器人产生观察行为 search 搜索图书 2。自主机器人继续前往桌子 4。在前往桌子 4 的过程中,自主机器人分别执行观察行为 verify 和 search,验证了 $on(book3, bookshelf3)$ 与环境不一致和搜索了图书 2(见图 13(b))。自主机器人到达桌子 4,执行任务行为 place 放置图书 1(见图 13(c))。由于在前往桌子 4 的途中,自主机器人通过执行观察行为明确了图书 2 的实际位置。因此,其直接前往书架 3 并完成图书 2 的抓取(见图 13(d))。

¹⁾ <https://github.com/KCL-Planning/ROSPlan>

²⁾ <https://github.com/AutoRobotLab/AutoRobot>

图 14 给出了基于反应式观察模式的自主机器人从 go to table4 到 fetch book2 的行为执行过程。在执行任务行为 go to table4 的过程中,自主机器人直接前往桌子 4,未调度观察行为(见图 14(a))。在完成任务行为 place 后,自主机器人执行 go to bookshelf2 前往书架 2,并执行任务行为 fetch 试图抓取图书 2(见图 14(b))。而此时图书 2 并不在书架 2 上,这使得 fetch 无法执行。因此,自主机器人收回机械臂,前往书架 6 搜索图书 2(见图 14(c))。当自主机器人遍历至书架 3 时,搜索到图书 2,执行 fetch book2(见图 14(d))。

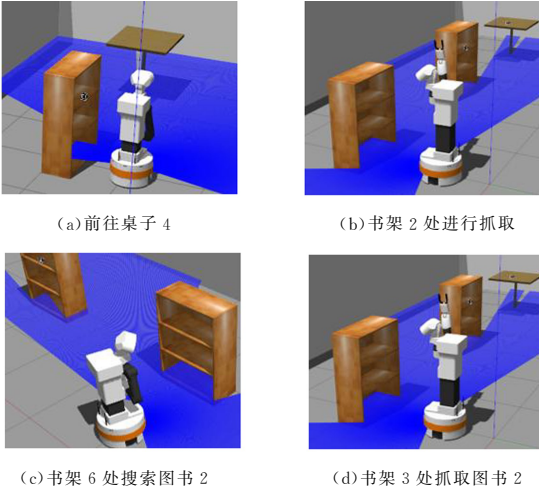


图 14 基于反应式观察模式的图书传送实验片段

Fig. 14 Experimental fragments of book delivery based on reactive observation scheme

图 15 给出了基于伴随观察模式的自主机器人从 go to table4 到 fetch book2 的行为执行过程。

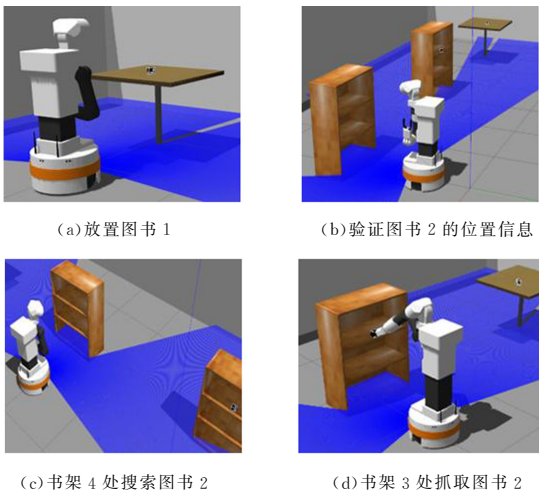


图 15 基于伴随观察模式的图书传送实验片段

Fig. 15 Experimental fragments of book delivery based on accompanying observation scheme

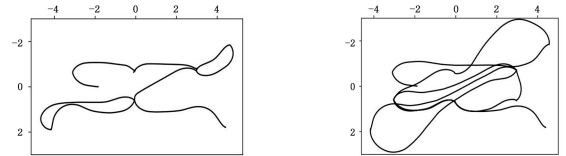
与反应式观察模式相似,在 go to table4 至 fetch book2 的过程中,自主机器人前往桌子 4 并放置图书 1(见图 15(a))。当自主机器人执行任务行为 go to bookshelf2 到达书架 2 后,执行观察行为 verify 验证 on(book2,bookshelf2)与环境不一致(见图 15(b))。与被动式观察模式不同,自主机器人未执行 fetch book2,而是前往书架 6,逆时针搜索图书 2

(见图 15(c))。自主机器人在书架 3 处搜索到图书 2 并抓取图书 2(见图 15(d))。

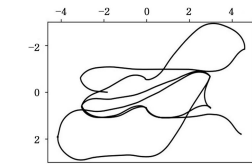
通过上述行为执行过程的对比,可以直观地看到基于不同观察行为模式执行行为的差异。基于主动观察模式的自主机器人在任务行为执行过程中灵活决策和交替调度观察行为;基于反应式观察模式的自主机器人在设定的情况下触发观察行为;基于伴随观察模式的自主机器人在固定的环节决策和调度观察行为。

5.2.2 行动路径分析

图 16(a)~图 16(c)分别给出了基于主动观察、反应式观察和伴随观察模式的某次实验中,自主机器人的运动轨迹。可以看到,基于主动观察模式的自主机器人运动轨迹明显短于反应式观察和伴随观察模式。这是由于在 go to bookshelf 和 go to table 的过程中,自主机器人根据环境状态,灵活决策和调度观察行为,及时地搜索到了缺失的环境信息以及发现了环境信息的不一致。反应式观察与伴随观察模式的路径长度相差不大,这是由于这两类观察模式发现环境信息缺失的时机一致,且都未能灵活地搜索缺失的环境信息。



(a) 基于主动观察模式的运动轨迹 (b) 基于反应式观察模式的运动轨迹



(c) 基于伴随观察模式的运动轨迹

图 16 基于主动观察、反应式观察和伴随观察模式的自主机器人运动轨迹

Fig. 16 Motion trajectory of autonomous robot based on active observation, reactive observation and accompanying observation schemes

图 17 给出了基于不同观察模式的行动路径长度。可以看到,基于主动观察模式的自主机器人的路径长度(32.7 m)显著短于基于反应式观察模式(61.1 m)和伴随观察模式(59.7 m)的路径长度。

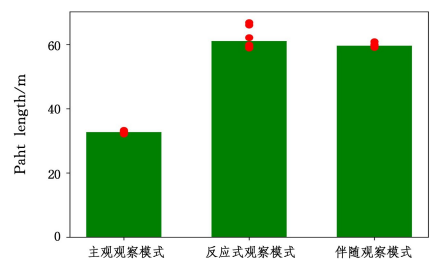


图 17 基于主动观察、反应式观察以及伴随观察模式的路径长度对比

Fig. 17 Path length comparison based on active observation model, reactive observation and accompanying observation schemes

5.2.3 时间消耗分析

图 18—图 20 分别展示了基于主动观察、反应式观察和伴随观察模式的时间消耗情况。在图 18—图 20 中,横轴为自主机器人某一任务步骤,例如抓取图书 1、到达桌子 4;纵轴为所用时间,其中绿色部分为任务行为消耗的时间,蓝色部分为执行 verify 消耗的时间,红色部分为执行 search 消耗的时间;对于每一个任务步骤,纵轴自下而上的颜色变化表明了行为的执行顺序。图 18 给出了基于主动观察模式的时间消耗。从图中可以看出,自主机器人执行 go to bookshelf 和 go to table 的过程中,在满足任务行为的最大执行时间的前提下,决策和调度观察行为。这虽然增加了某些任务步骤的执行时长,但较大地减少了自主机器人的无效执行和搜索的时间。图 19 给出了基于反应式观察模式的时间消耗。在反应式观察模式中,当任务行为无法执行时,触发观察行为搜索缺失的信息。触发式的观察导致了任务行为的无效执行,这增加了任务的用时。

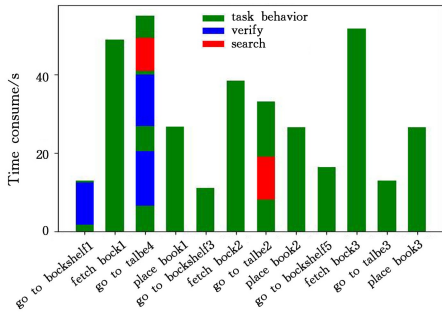


图 18 基于主动观察模式的行为执行时间消耗(电子版为彩图)

Fig. 18 Behavior execution time consumption based on active observation schemes

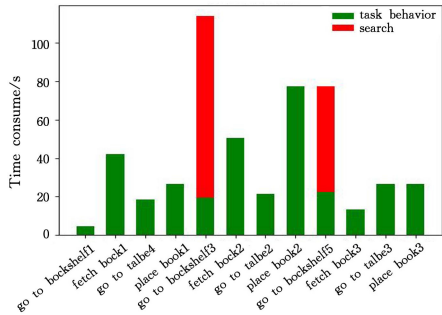


图 19 基于反应式观察模式的行为执行时间消耗(电子版为彩图)

Fig. 19 Behavior execution time consumption based on reactive observation scheme

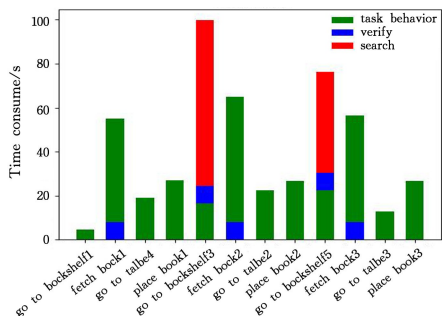


图 20 基于伴随观察模式的行为执行时间消耗(电子版为彩图)

Fig. 20 Behavior execution time consumption based on accompanying observation scheme

图 20 给出了基于伴随观察模式的时间消耗。基于伴随观察模式的自主机器人在执行任务行为前将会执行观察行为验证前置条件是否满足,这有效减少了无效执行任务行为带来的时间消耗。然而,由于观察行为决策和调度的时机固定,当信息缺失时,自主机器人仍然需要花费大量时间进行目标搜索。

图 21 给出了基于不同观察模式的时间消耗对比。可以看出,基于主动观察模式的时间消耗(365.6 s)显著低于反应式观察(525.3 s)以及伴随观察模式(483.7 s)。

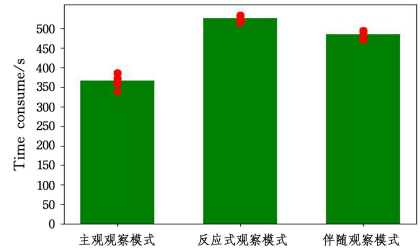


图 21 基于主动观察、反应式观察和伴随观察模式的时间消耗

Fig. 21 Time consumption based on active observation, reactive observation and accompanying observation schemes

结束语 针对开放环境下,自主机器人对环境信息感知受限,难以全面、及时地获得环境信息的问题,本文提出了主动观察模式以提高自主机器人观察的有效性。本文从案例出发,提炼出两类观察的动机:片面观察导致的环境信息缺失和过时观察导致的环境信息不一致;并基于这两类动机针对性地提出两类主动观察模式,描述了任务行为和观察行为的协同机制;在此基础上,提出了相应的观察行为决策和调度算法,实现了观察结果的及时反馈和行为自适应调整。本文提出了一个基于多智能体系统的自主机器人软件架构,用于实现上述主动观察模式。该架构使用 6 类软件智能体构成自主机器人软件,每类智能体实现特定功能,并通过智能体交流实现了主动观察模式的控制逻辑。本文通过与反应式观察和伴随观察模式进行对比,验证了主动观察模式的有效性;在执行过程对比中,定性验证了主动观察模式的有效性;在行动路径和时间消耗对比中,基于主动观察模式的自主机器人的运动路径(32.7 m)短于反应式观察模式(61.1 m)和伴随观察模式(69.7 m)的运动路径;其时间消耗(365.6 s)也低于反应式观察模式(525.3 s)和伴随观察模式(483.7 s)的时间消耗,定量地验证主动观察模式的有效性。

参考文献

- [1] MAO X J. A Systematic Review on Software Engineering for Autonomous Robot[J]. Chinese Journal of Computers, 2021, 44(8):1661-1687.
- [2] PETERSSON O. Execution monitoring in robotics: A survey [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2005, 53(2): 73-88.
- [3] MURPHY R R. Introduction to AI robotics[M]. MIT press, 2019.
- [4] MICHAUD F, NICOLESCU M. Behavior-based systems[M]. Springer Handbook of Robotics. Cham:Springer, 2016:307-328.
- [5] HOMBERG B S, KATZSCHMANN R K, DOGAR M R, et al.

- Robust proprioceptive grasping with a soft robot hand[J]. *Autonomous Robots*, 2019, 43(3):681-696.
- [6] SZOT A, CLEGG A, UNDERSANDER E, et al. Habitat 2. 0: Training home assistants to rearrange their habitat [J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2021, 34:251-266.
- [7] BREYER M, OTT L, SIEGWART R, et al. Closed-Loop Next-Best-View Planning for Target-Driven Grasping [C] // 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2022:1411-1416.
- [8] CHEN C, LIU Y, KREISS S, et al. Crowd-robot interaction: Crowd-aware robot navigation with attention-based deep reinforcement learning[C] // 2019 International Conference on Robotics and Automation(ICRA). IEEE, 2019:6015-6022.
- [9] CHEN Y, LIU C, SHI B E, et al. Robot navigation in crowds by graph convolutional networks with attention learned from human gaze[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(2):2754-2761.
- [10] LI J K, HSU D, LEE W S. Act to see and see to act: POMDP planning for objects search in clutter[C] // 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2016:5701-5707.
- [11] LIU Z, MAO X, YANG S. A Dual-Loop Control Model and Software Framework for Autonomous Robot Software [C] // 2017 24th Asia-Pacific Software Engineering Conference (APSEC). IEEE, 2017:229-238.
- [12] ZHENG K. *Ros navigation tuning guide*[M]. *Robot Operating System(ROS)*. Cham:Springer, 2021:197-226.
- [13] DONG H, GIAKOUMIDIS N, FIGUEROA N, et al. Approaching behaviour monitor and vibration indication in developing a General Moving Object Alarm System (GMOAS) [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013, 10(7):290.
- [14] RAMAKRISHNAN S K, JAYARAMAN D, GRAUMAN K. Emergence of exploratory look-around behaviors through active observation completion [J]. *Science Robotics*, 2019, 4(30):eaaw6326.
- [15] CASHMORE M, FOX M, LONG D, et al. *Rosplan: Planning in the robot operating system*[C] // *Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling*. 2015, 25:333-341.
- [16] BAJCSY R, ALOIMONOS Y, TSOTSOS J K. Revisiting active perception[J]. *Autonomous Robots*, 2018, 42(2):177-196.
- [17] RUEHL S W, XUE Z, KERSCHER T, et al. Towards automatic manipulation action planning for service robots [C] // *Annual Conference on Artificial Intelligence*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010:366-373.
- [18] NIEMUELLER T, HOFMANN T, LAKEMEYER G. CLIPS-based execution for PDDL planners[C] // *ICAPS Workshop on Integrated Planning, Acting and Execution(IntEx)*. 2018.
- [19] YANG S, MAO X J, LIU Z, et al. The accompanying behavior model and implementation architecture of autonomous robot software [C] // 2017 24th Asia-Pacific Software Engineering Conference(APSEC). IEEE, 2017:209-218.
- [20] MAO X J, YANG S, HUANG Y H, et al. Towards Software Architecture and Accompanying Behavior Mechanism of Autonomous Robotic Control Software Based on Multi-agent System [J]. *Journal of Software*, 2020, 31(6):1619-1637.
- [21] ODDI A, RASCONI R, SANTUCCI V G, et al. Integrating open-ended learning in the sense-plan-act robot control paradigm [M]. *ECAI 2020*. IOS Press, 2020:2417-2424.
- [22] GARATTONI L, BIRATTARI M. Autonomous task sequencing in a robot swarm [J]. *Science Robotics*, 2018, 3(20):eaat0430.
- [23] BROOKS R. A robust layered control system for a mobile robot [J]. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 1986, 2(1):14-23.
- [24] ARNOLD R D, YAMAGUCHI H, TANAKA T. Search and rescue with autonomous flying robots through behavior-based cooperative intelligence[J]. *Journal of International Humanitarian Action*, 2018, 3(1):1-18.
- [25] RUSSELL S J. *Artificial intelligence a modern approach*[M]. Pearson Education, Inc., 2010.
- [26] BURKHARD H D. Agent oriented techniques for programming autonomous robots [J]. *Fundamenta Informaticae*, 2010, 102(1):49-62.
- [27] INIGO-BLASCO P, DIAZ-DEL-RIO F, ROMERO-TERNERO M C, et al. Robotics software frameworks for multi-agent robotic systems development [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2012, 60(6):803-821.
- [28] GARRIDO-JURADO S, MUÑOZ-SALINAS R, MADRID-CUEVAS F J, et al. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion[J]. *Pattern Recognition*, 2014, 47(6):2280-2292.
- [29] LIU Z, MAO X, YANG S. *Autorobot: A multi-agent software framework for autonomous robots*[J]. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, 2018, 101(7):1880-1893.
- [30] QUIGLEY M, CONLEY K, GERKEY B, et al. *ROS: an open-source Robot Operating System*[C] // *ICRA Workshop on Open Source Software*. 2009:5.



XIAO Huaiyu, born in 1999, postgraduate, is a student member of China Computer Federation. His main research interest is robot software engineering.



YANG Shuo, born in 1992, Ph.D, lecturer, is a member of China Computer Federation. His main research interests include intelligent robot software engineering, software engineering theory and methods and robot behavior modeling and task decision-making.