

文章编号: 1001-0920(2002)04-0385-06

未知环境中移动机器人导航控制研究的若干问题

蔡自兴¹, 贺汉根², 陈 虹³

(1 中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083; 2 国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073; 3 吉林大学 控制科学与工程系, 吉林 长春 130025)

摘 要: 未知环境中移动机器人导航控制理论和方法是机器人学和智能控制的一个重要研究领域。综述了该领域研究的主要内容及其发展动态, 分析了与导航控制有关的机器学习方法的研究现状, 指出了存在的不足和有待进一步研究的问题, 并提出了一些解决思路。

关键词: 移动机器人; 未知环境; 导航控制

中图分类号: TP 24

文献标识码: A

Some issues for mobile robots navigation under unknown environments

CAI Zi-xing¹, HE Han-gen², CHEN Hong³

(1 College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2 College of Electromechanical Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 3 Department of Control Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract Theories and methods for navigation control of mobile robots under unknown environments are surveyed and analyzed including main contents and recent developments as well as machine learning techniques relative to navigation. Existing problems are presented. Issues of future research are also proposed.

Key words: mobile robot; unknown environment; navigation

1 引 言

智能移动机器人是一类能够通过传感器感知环境和自身状态, 实现在有障碍物的环境中面向目标的自主运动(称为导航), 从而完成一定作业功能的机器人系统。

随着科学技术的发展, 人类的研究和活动领域已由陆地扩展到海底和空间。利用移动机器人进行空间探测和开发, 已成为 21 世纪世界各主要科技发

达国家开发空间资源的主要手段之一。研究和发月球探测移动机器人技术, 对包括移动机器人导航控制在内的相关前沿技术的研究将产生巨大的推动作用。移动机器人在月球和火星等外星球表面导航时, 将面临复杂的未知环境。未知环境中的移动机器人自主导航控制技术已成为空间探测机器人的一项关键技术。

在移动机器人导航控制理论和方法的研究中,

收稿日期: 2002-04-02; 修回日期: 2002-06-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(69974043, 60075020, 59875032)

作者简介: 蔡自兴(1938—), 男, 福建莆田人, 教授, 博士生导师, 从事人工智能、机器人学等研究; 贺汉根(1943—), 男, 江苏杭州人, 教授, 博士生导师, 从事模式识别、机器人学等研究。

确定性环境的导航控制方法已取得了大量的研究和应用成果。对未知环境中的导航控制也开展了一些研究,并提出了若干方法,但尚未形成统一和完善的体系结构,还有许多关键理论和技术问题有待解决和完善。这些问题主要包括环境建模、定位、导航控制器的学习与优化、故障诊断、在线运动规划与控制等。未知环境中的移动机器人只具有较少的先验知识,其导航控制方法涉及环境认知、优化决策、知识表示与获取等多项关键问题。

对未知环境中的移动机器人导航控制理论和方法的研究,将推动认知科学、模式识别、非线性控制等前沿学科的研究,带动航天、海洋、军事、建筑、交通、工业和服务业等领域移动机器人导航控制系统的开发研究,为无人探察车、无人排险车和无人运输车等用于航天、军事、深海作业和核工业领域的移动机器人系统的应用奠定理论和技术基础。

2 移动机器人导航系统理论与技术的研究概况

适应于未知环境的移动机器人导航系统应具备环境认知、行为决策、运动控制等能力,可对系统自身状态进行监测并能有效容错。该领域的研究内容主要包括体系结构、环境建模与定位、路径规划、运动控制、故障诊断与容错控制等若干方面。

2.1 体系结构

目前,移动机器人导航控制的体系结构主要分为以下3种:

1) 基于功能分解的体系结构,即按“感知-建模-规划-行动”的模式实现移动机器人的导航控制。现已提出多种离线全局路径规划方法^[1~3]。

2) 基于行为的反应式体系结构,最具代表性的是 Brooks 的包容式体系结构^[4]。如何构造和优化机器人行为控制器是其成功与否的关键。主要方法有基于模糊逻辑及神经网络的监督学习方法及基于传感器信息的局部运动规划方法等。

3) 上述二者结合的混合式体系结构^[5],以克服功能分解体系结构在不确定和未知环境中的建模困难、实时性和适应性差等缺点;同时实现对已有环境信息进行有效表示和利用,完成单一结构无法实现的复杂导航任务。在混合式体系结构的基础上,有关学者针对具体移动机器人系统应用的特点,提出了基于多智能体的体系结构^[6],强调系统功能的分布式计算和协调特性。

混合式体系结构是移动机器人体系结构研究的重要发展趋势,并在未知环境下移动机器人导航中得到应用。但在移动机器人体系结构的研究方面,仍有许多问题需要进一步研究解决,主要有:1) 如何实现基本功能模块的灵活组合,使得功能与知识都具有良好的扩展性;2) 如何实现基于符号的慎思式智能与基于行为的反应式智能之间的合理协调;3) 如何建立各层次间知识的交流机制,通过机器学习获得新的知识。

2.2 环境建模与定位

移动机器人自定位与环境建模问题是紧密相关的。环境模型的准确性依赖于定位精度,而定位的实现又离不开环境模型。在环境建模技术研究方面,主要提出了基于传感器的单元分解建模技术^[7]、几何建模技术和拓扑建模技术3类方法^[8]。基于几何坐标的方法利用 Kalman 滤波器在局部区域内可获得较高的精度,并且计算量小,但在广域环境中却难以维持精确的坐标信息。基于拓扑的建模方法允许机器人在难以获得精确定位信息的情形下,利用状态部分可观测马尔可夫决策过程模型,依靠传感器信息与环境特征信息的匹配来确定机器人的方位,但在非结构化环境或环境特征不明显的环境下,则难以进行可靠的导航控制。

现有移动机器人的定位方法主要包括:航迹推算、组合定位和感知定位^[9]。航迹推算方法存在累积误差问题,通常与基于感知的定位方法相结合,利用环境特征和路标识别来消除或减少累积定位误差。组合式定位系统主要包括全球定位系统(GPS)、激光定位系统等。上述定位方法已成功地应用于确定性结构化环境中的移动机器人定位,但仍难以有效地解决在未知环境中的移动机器人定位问题。目前,基于概率模型和多传感器融合的移动机器人定位与环境建模研究已取得了一些研究成果^[10,11],但大多局限于室内结构化环境。

在复杂未知环境中,由于先验知识的匮乏和环境的不确定性,使得并发的环境建模和定位方法成为亟待研究的课题,其中包括环境的不确定性表示、三维环境特征的提取、基于多传感器融合的增量式建模方法等。此外,研究可创造主动环境、提高信息获取效率的行为机制,将有助于实现可靠的复合定位与建模系统。

2.3 路径规划

移动机器人的路径规划可分为基于地图的全局路径规划和基于传感器的局部路径规划。对于环境

已知条件下的离线全局路径规划方法, 现已取得大量成果。近年来, 学术界对环境部分已知和未知环境下的在线全局路径规划方法进行研究, 其中包括基于进化算法^[12]和广义预测控制^[13]的在线路径规划器等。

基于传感器的局部路径规划是实现移动机器人在未知环境中导航的重要技术之一, 例如增量式构造当前可视区域路径图的规划方法^[14]和基于近似单元分解的局部路径规划^[15]等。然而, 上述方法未能对移动机器人的运动学和动力学特性约束进行有效处理, 在优化性能和对复杂环境的适应性方面仍有待改进。

近年来, 针对非完整约束条件下的移动机器人运动规划问题开展了一些研究工作。其中, 基于微分平坦系统理论的运动规划方法引起了学术界的重视^[16-18]。现已证明, 大部分移动机器人系统是平坦的, 对于一个微分平坦系统, 运动规划可简化为确定一个光滑的平坦输出函数, 它满足初始和目标状态的边界条件, 而期望的控制输入和状态轨迹则通过对该平坦函数求导来获得。基于微分平坦理论的运动规划方法为移动机器人实时运动规划提供了一种有效方法。文献[16]通过应用基函数来参数化微分平坦输出, 将非线性控制理论、样条理论和二次规划结合起来, 提出了新的实时轨迹生成算法。

研究表明, 对于受约束的机械系统, 实时轨迹生成可通过在较低维空间即微分平坦空间中搜索轨迹曲线来实现。文献[17]研究了将微分平坦理论与自适应控制方法相结合的运动规划和控制方法。进一步深入探讨将微分平坦理论用于未知环境中移动机器人的规划和控制问题, 是本文的研究内容之一。

2.4 运动控制

移动机器人的运动控制包括基于路径规划的移动机器人路径跟踪控制和基于传感器-执行器直接映射的运动控制, 即反应式导航控制。大量研究表明, 反应式导航方法是提高移动机器人在未知环境下的实时性和灵活性的重要手段。目前已提出多种移动机器人反应式导航方法, 如模糊逻辑方法、神经网络方法等。但已有方法往往要求较多的先验知识, 如何构造和优化移动机器人的反应式导航控制器以及提高导航系统对未知环境的适应性, 是有待解决的关键问题。近年来, 利用基于动态规划的增强学习方法解决上述问题, 已成为人工智能和机器人学领域的研究热点。进一步的工作需要对增强学习梯度算法的局部极值以及算法的学习效率和泛化性能进

行深入研究。

在路径跟踪控制问题方面, 由于非完整控制系统在笛卡尔坐标系下不存在光滑的定常静态状态反馈律使得闭环系统的平衡点局部渐近稳定^[19, 20], 也不存在动态连续定常反馈控制器使得闭环系统渐近稳定^[21], 因此在笛卡尔坐标系下不能应用反馈线性化或光滑定常反馈的控制器设计方法渐近镇定系统。目前, 关于非完整控制系统的镇定方法, 如非连续定常镇定化、时变镇定化和混合方法, 在轮式移动机器人控制中得到了应用。文献[22]针对带有输入约束的时变非线性系统, 采用模型预测控制(MPC)方法生成反馈控制律, 允许反馈非连续且可在线处理约束。文献[23]尝试用非线性预测控制镇定有控制量约束和运动学约束的移动机器人。文献[24]则采用后退方法设计了具有全局渐近稳定的跟踪控制器。

尽管有关移动机器人运动规划与控制的研究取得了许多有意义的结果, 但仍有许多问题有待进一步研究, 例如: 1) 考虑动力学特性时移动机器人系统的平坦性, 平坦输出与机械系统几何位置的关系, 以及在规划运动轨迹时如何兼顾性能与稳定性; 2) 存在控制量约束时能够协调跟踪性能与稳定性的鲁棒轨迹跟踪方法等。由于构造非线性控制方法在优化性能时往往能提供更强的稳定性和满意的吸引域, 并能避免不必要的高增益, 减弱某些现存方法中所需的约束, 因而有可能为实现高性能的移动机器人路径跟踪控制器提供一条有效的途径。

2.5 故障诊断与容错控制

在未知环境中独立工作的移动机器人, 往往处于十分恶劣的环境条件, 如强辐射、大温差、复杂地形, 其机械部件和控制系统极易出现问题, 对于深空探测机器人而言, 几乎不可能由人来修复故障。因此机器人系统应能进行状态监测, 识别传感器和执行器故障, 并利用硬件冗余或控制律重构等方式进行容错控制, 以保证系统安全可靠地运行。

现有故障检测方法主要可划分为基于知识、基于解析模型和基于信号处理 3 类方法。诊断决策方法主要有阈值法、模糊逻辑、贝叶斯分类、故障假设检验等。基于解析模型的方法研究得比较系统深入, 它适合于可建立准确被控过程数学模型的系统, 但实际应用中通常很难建立这种定量模型。基于知识和输入输出信号的方法在这方面具有一定优势。

经典容错控制方法可分为被动容错控制和主动容错控制, 但都需要系统具有关于模型不确定性和

外界扰动的鲁棒性^[25], 目前的研究对象主要是线性系统, 非线性、时滞系统的容错控制研究还没有重要的理论结果。目前, 国内外故障诊断和容错控制研究大都停留在计算机仿真或实验阶段, 成功应用于实际的例子仍属少数。国外有学者将扩展 Kalman 滤波器、基于模型的递归神经网络、遗传算法等方法应用于移动机器人的陀螺仪、视觉传感器、驱动装置^[26~28]。国内关于移动机器人的故障诊断和容错控制研究的成果还很少。

由于机器人系统的复杂性和非线性, 有必要在深入研究系统机理的基础上, 结合多种方法解决故障诊断问题。其容错机制的设计与机器人硬件结构、控制系统、传感器信号融合、处理技术密切相关, 应在移动机器人系统整体设计阶段就将其作为一个重要环节加以考虑。

3 有关机器学习、自适应理论与方法的研究概况

移动机器人要在未知环境中安全、可靠地完成指定任务, 除了应具有上述建模、定位、规划、运动等基本能力外, 还应能够处理各种突发情况, 逐渐适应环境, 提高工作效率。这就要求其导航控制系统具有灵活性和适应性。近年来, 机器学习已成为人工智能和机器人学的一个研究热点, 并且取得了不少突破性进展, 其中包括增强学习理论和算法^[29]研究, 进化学习算法^[30]和应用研究, 统计学习^[31]特别是支持向量机(SVM)理论和算法研究等。上述机器学习理论和方法为复杂和未知环境中的信息提取、环境理解、任务规划和行为决策提供了有效的解决途径。

与已有的监督学习和无监督学习方法不同的是, 增强学习和进化学习采用了动物学习心理学的“试错法”原理, 强调在与环境的交互中利用评价性反馈信号(称为增强信号或进化算法的个体适应度)进行学习, 为实现具有在线自学习能力的智能系统提供了有效手段。应用机器学习方法特别是增强学习和进化学习方法来实现未知环境中移动机器人导航控制器的设计和优化, 已成为近年来移动机器人导航控制技术的研究热点^[30, 32, 33]。

增强学习在移动机器人导航中的应用主要集中于反应式运动控制^[34]。在增强学习算法和理论研究方面, 由于包括移动机器人导航控制在内的实际工程问题往往具有连续的状态和行为空间, 因而增强学习的泛化和学习效率的提高便成为增强学习研究

的核心问题。在已有的增强学习泛化方法中, 利用神经网络等值函数逼近器的增强学习方法得到普遍研究和应用。早期的神经网络增强学习算法采用一种类似于 TD 学习的近似梯度算法, 当采用一般的非线性函数逼近器时, 理论上难以保证算法的收敛性^[35]。文献[36]对已有的近似梯度算法进行改进, 但仅能保证有限条件下的收敛性, 而且学习效率有待进一步验证和改进。

近年来, 基于核的增强学习受到有关学者的关注^[37], 该方法为解决连续空间马氏决策中的局部收敛性问题提供了一条可行途径。此外, 由于移动机器人的传感器感知能力的局部性, 在许多情况下应用增强学习方法需要解决部分可观测马氏决策的学习算法设计问题。文献[38]提出的 GPOMDP 算法能对部分可观测马氏决策问题的策略梯度进行估计, 但存在学习效率较低的缺点。目前, 有关部分可观测马氏决策问题增强学习算法的应用研究成果还很少。文献[39]对增强学习在移动机器人路径跟踪控制中的应用进行研究, 提出了基于增强学习的自适应 PD 控制器。

移动机器人进化设计与学习是通过人工进化的自动化设计过程来开发机器人及其传感-马达控制系统的一种方法^[40], 它包括群体进化学习和个体发展学习。基于进化学习的机器人导航控制系统主要采用的控制结构有人工神经网络、LISP 程序、模糊规则集等, 已应用于各种类型移动机器人系统^[41]。其主要优点在于可以简化设计过程, 设计结果具有一定鲁棒性, 并可能产生突现行为, 是实现低层反应式控制和高层行为决策的有效途径之一。但是进化学习在仿真设计、运行时间、评估性能指标等方面还没有理论依据, 进化学习是否持续有效, 进化结果是仅仅停留在传感-马达反应式行为水平上还是进一步扩展到复杂行为等问题都值得深入探讨。该方向的研究不仅可丰富机器人控制系统设计方法, 而且将对生物系统认知过程的理解起到促进作用。

近年来, 多示例学习作为一种新的学习框架受到机器学习理论界的关注, 并在图像检索^[42]、机器视觉^[43]等领域取得了一些研究成果。在多示例学习问题中, 系统通过对多个由示例组成的有概念标记的训练包进行学习, 尽可能正确地对训练集以外的包的标记进行预测。但多示例学习在可学习性理论、包生成技术、学习方法方面还需要深入研究, 目前还没有实际应用到机器人系统。在移动机器人导航过程中, 常常难以对一系列行为中的单个行为进行评

价, 而只能对行为组合是否达到目标进行概念性标记。因此, 设计有效的算法, 在多示例学习框架下解决移动机器人导航中的全程进化问题, 在理论和应用两方面都有重要意义。

移动机器人对环境特征的识别, 是一个非常具有挑战性的模式识别问题。尤其是在未知环境中, 用传统的基于特征提取的模式识别方法解决该问题会面临极大的困难。这主要是因为未知环境中存在着许多不可知因素, 并且很难对这些未知因素建模, 从而难以进行有效的特征提取工作。支持向量机是一种基于统计学习理论的机器学习方法。它在进行模式分类时没有显式的特征提取过程, 其特征提取隐含在支持向量的提取以及核函数的选取中。文献[44, 45]的工作在一定程度上显示了该方法在理论基础上的优势和在视觉感知与学习方面的应用潜力。但是应用 SVM 方法有效解决实际问题仍然存在不少难点, 其中最为突出的有两个: 一是核函数的选取缺乏良好的准则, 二是计算复杂度比较高。因此 SVM 中的核函数研究主要解决的问题是: 如何针对给定数据并结合一定先验知识选取核函数。另外, 递推算法的研究在 SVM 的应用中也有很大意义, 但这方面的工作还刚刚开始展开。可喜的是, 国内学者已取得了一定结果^[46]。

深入开展机器学习理论和方法的研究, 应用机器学习方法提高移动机器人在未知环境中的导航性能和对环境的适应性, 是移动机器人导航控制领域的一个重要发展趋势。

4 结 语

未知环境中的移动机器人导航控制理论和方法的研究, 是机器人学和智能控制的一个重要研究领域。但目前已有的理论和方法并不能完全满足未知环境中移动机器人自主导航的要求, 在移动机器人体系结构、路径规划、环境建模和定位等方面都有许多问题有待解决。这些问题并不是孤立的, 各部分相互耦合, 互为影响。如果不能把各部分有机地结合为一个整体, 那么必将削弱或不能达到预期的系统性能。因此有必要针对未知环境中移动机器人导航控制的各种问题, 全面深入地分析机器人系统与环境之间、系统各部分之间的交互关系, 研究开发面向全局性能优化的导航理论和技术, 以实现灵活、稳定、可靠的移动机器人导航控制系统。

参考文献(References):

- [1] Robin R Murphy, Ken Hughes, Alisa Marzilli, et al Integrating explicit path planning with reactive control of mobile robots using trulla[J] *Robotics & Autonomous Systems*, 1999, 27(4): 225-245
- [2] Lozano Perez T. Spatial planning: A configuration space approach[J] *IEEE Trans on Computers*, 1983, 32(2): 108-120
- [3] Latombe J C. *Robot Motion Planning* [M] Norwell: Kluwer Academic Publishers, 1991
- [4] Brooks R, Burdick A. Layered control system for a mobile robot[J] *IEEE Trans on Robotics & Automation*, 1986, 2(1): 14-23
- [5] Gat E. Integrated planning and reacting in a heterogeneous asynchronous architecture for controlling real-world mobile robots[A] *Proc of the AAAI-92* [C] Menlo Park, 1992 809-815
- [6] 朱森良, 吴春明, 张友军, 等. 基于多智能体的实时并发式智能机器人结构[J] *高技术通讯*, 1995, 5(10): 20-24
(Zhu Miaoliang, Wu Chunming, Zhang Youjun, et al A real-time and concurrent intelligent robotic system based on multi-agent architecture[J] *High Technology Letters*, 1995, 5(10): 20-24)
- [7] Hebert M, Caillaud C, Krotokov E, et al Terrain mapping for a roving planetary explorer[A] *IEEE Int Conf on Robotics & Automation* [C] Scottsdale, 1989 997-1002
- [8] Salichs M A, Moreno L. Navigation of mobile robots: Open questions[J] *Robotica*, 2000, 18(3): 227-234
- [9] Leonard J J, Durrant Whyte H F. Mobile robot localization by tracking geometric beacons[J] *IEEE Trans on Robotics & Automation*, 1991, 7(3): 376-382
- [10] Thrun S. A probabilistic approach to concurrent mapping and localization for mobile robots[J] *Machine Learning*, 1998, 31(5): 1-25
- [11] Castellanos J A, Montiel J M M, Neira J, et al The SPmap: A probabilistic framework for simultaneous localization and map building [J] *IEEE Trans on Robotics & Automation*, 1999, 15(5): 948-952
- [12] Cai Zixing, Peng Zhihong. Cooperative coevolutionary adaptive genetic algorithm in path planning of cooperative multimobile robot system [J] *Intelligent & Robotic System*, 2002, 33(1): 61-67
- [13] 席裕庚. 动态不确定环境下广义控制问题的预测控制[J] *控制理论与应用*, 2000, 17(5): 665-670
(Xi Yugeng. Predictive control of general control problems under dynamic uncertain environment [J]

- Control Theory and Applications*, 2000, 17 (5): 665-670)
- [14] Laubach S L, Burdick J W. An autonomous sensor-based path-planner for planetary microrovers [A] *Proc of IEEE Int Conf on Robotics & Automation* [C] Detroit, 1999 347-354
- [15] Stentz A. Optimal and efficient path planning for partially-known environments [A] *Proc of IEEE Conf Robotics & Automation* [C] San Diego, 1994 3310-3317
- [16] Murray R M, Sastry S S. Nonholonomic motion planning: Steering using sinuoids [J] *IEEE Trans on Automatic Control*, 1993, 38(5): 700-716
- [17] Barany E, Glass K, Colbaugh R. Control of uncertain nonholonomic mechanical systems using differential flatness [A] *Proc of American Control Conf* [C] Philadelphia, 1998 2: 917-921
- [18] Nieuwstadt M J, Murry R M. Real time trajectory generation for differentially flat systems [J] *Int J Robust & Nonlinear Control*, 1998, 8(11): 995-1020
- [19] Bloch A, Reyhanoglu M, McClamroch N H. Control and stabilization of nonholonomic dynamic systems [J] *IEEE Trans on Automatic Control*, 1992, 37(11): 1746-1757
- [20] Brockett R. *Nonlinear Control Theory and Singular Riemannian Geometry — New Directions in Applied Mathematics* [M] New York: Springer, 1981
- [21] Pomet J B. Explicit design of time-varying stabilizing control laws for a class of controllable systems without drift [J] *Systems & Control Letters*, 1992, 18(2): 147-158
- [22] Fontes F A. Discontinuous feedback stabilization using nonlinear model predictive controllers [A] *Proc IEEE Conf on Decision & Control* [C] Sydney, 2000 4969-4971
- [23] Essen H A, Lange H C. Nonlinear model predictive control experiments on a laboratory gas turbine installation [J] *J of Engineering Gas Turbines & Power*, 2001, 123(2): 347-352
- [24] 吴卫国, 陈辉堂, 王月娟. 移动机器人的全局轨迹跟踪控制 [J] *自动化学报*, 2001, 27(3): 326-331
(Wu Weiguo, Chen Huitang, Wang Yuejuan. Global trajectory tracking control of mobile robots [J] *Acta Automatica Sinica*, 2001, 27(3): 326-331)
- [25] 周东华, Ding X. 容错控制理论及其应用 [J] *自动化学报*, 2000, 26(6): 788-797
(Zhou Donghua, Ding X. Theory and applications of fault tolerant control [J] *Acta Automatica Sinica*, 2000, 26(6): 788-797.
- [26] Roumeliotis S I, Sukhatme G S, Bekey G A. Sensor fault detection and identification in a mobile robot [A] *Proc of IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots & Systems* [C] Victoria, 1998 1383-1388
- [27] Murphy R, Hershberger D. Classifying and recovering from sensing failures in autonomous mobile robots [A] *AAAI 96* [C] Portland, 1996 922-929
- [28] Terry Huntsberger. Fault-tolerant action selection for planetary rover control [A] *Proc Sensor Fusion & Decentralized Control in Robotic Systems* [C] Boston, 1998 150-156
- [29] Leslie Pack Kaelbling, Michael L Littman, Andrew W Moore. Reinforcement learning: A survey [J] *J of Artificial Intelligence Research*, 1996, 4(3): 237-285
- [30] Meeden Lisa A. Trends in evolutionary robotics [A] *Soft Computing for Intelligent Robotic Systems* [C] New York: Physical Verlag, 1998 215-233
- [31] Vapnik V. *Statistical Learning Theory* [M] New York: John Wiley & Sons, Inc, 1998
- [32] Lin L J. Hierarchical learning of robot skills by reinforcement [A] *Proc of the Int Conf on Neural Networks* [C] San Francisco, 1993 1: 181-186
- [33] 贺汉根, 徐昕. 增强学习在移动机器人导航控制中的应用 [J] *中南工业大学学报*, 2000, 31(S): 170-173
(He Han-gen, Xu Xin. The application of reinforcement learning in the navigation control of mobile robots [J] *J of Central South University*, 2000, 31(S): 170-173)
- [34] Lin L J. Self-improving reactive agents based reinforcement learning, planning and teaching [J] *Machine Learning*, 1992, 8(3/4): 293-321
- [35] Baird L C. Reinforcement learning through gradient descent [D] Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 1999
- [36] Marbach P, Tsitsiklis J N. Simulation-based optimization of Markov reward processes [J] *IEEE Trans on Automatic Control*, 2001, 46(2): 191-209
- [37] Omoneit D, Sen S. Kernel-based reinforcement learning [R] California: Stanford University, 2001
- [38] Baxter J, Bartlett P L. Infinite-horizon policy-gradient estimation [J] *Artificial Intelligence Research*, 2001, 15(5): 319-350
- [39] 徐昕. 增强学习及其在移动机器人导航与控制中的应用 [D] 长沙: 国防科技大学, 2002

(下转第 464 页)

最后,构造形如式(6)的广义对象,并通过求解标准的 H_∞ 问题获得控制器 K 。

开环与闭环系统传递函数及 $W_2^{-1}(s)$ 的Bode图如图2所示。其中,实线为闭环系统,点线为开环系统,虚线为 $W_2^{-1}(s)$ 。可以看出,控制器的作用使得闭环系统的第1阶和第2阶模态的阻尼比明显增大,而其它阶的模态没有变化。系统受到脉冲干扰的时域响应波形如图3所示,可见闭环系统在干扰作用下,时间响应的收敛速度明显快于开环系统。

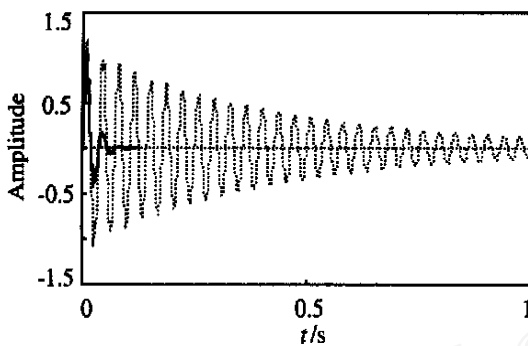


图3 脉冲干扰的时域响应波形

5 结 论

本文基于特征结构配置和 H_∞ 滤波器构造了合适的广义对象,采用反馈形式联接广义对象和控制器,并转换成标准的 H_∞ 鲁棒控制器设计问题,较好

地实现了时域指标与频域指标的综合以及鲁棒稳定性的要求。该设计方法比混合性能指标并进行参数优化的方法在形式上更为直观,比基于混合灵敏度的 H_∞ 控制设计方法在权函数的选择上限制少,并且易于实现。由于时域性能指标在整个设计过程都能得到保证,而 H_∞ 滤波器是在意义更为广泛的干扰作用下对系统状态进行的最优估计,因此采用本文方法解决结构振动控制中的溢出问题更为有效。

参考文献(References):

- [1] Zhou K, Doyle J C. *Essentials of Robust Control* [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1998
- [2] 杜耀武, 史习智. 结构振动的 H_2/H_∞ 混合最优控制[J]. 振动工程学报, 1999, 12: 103-108
(Du Yaowu, Shi Xizhi. Mixed H_2/H_∞ optimal control for structure vibration [J]. *J of Vibrat Eng*, 1999, 12: 103-108)
- [3] Liu G P, Duan D R, Patton R J. Mixed time and frequency-domain robust eigenstructure assignment [J]. *Int J Syst Sci*, 2000, 31: 63-71
- [4] Liu G P, Patton R J. *Eigenstructure Assignment for Control System Design* [M]. England: John Wiley & Sons, 1998
- [5] George K, Lee J G, Lee B. Generalized plants for H_∞ robust controllers design [J]. *J Guidance*, 1999, 22: 367-369

(上接第390页)

- [40] Cliff D, Harvey I, Husbands P. Explorations in evolutionary robotics [J]. *Adaptive Behavior*, 1993, 2 (1): 73-110
- [41] 刘娟, 蔡自兴, 涂春鸣. 进化机器人学研究进展[J]. 控制理论及应用, 2002, 19(4).
(Liu Juan, Cai Zixing, Tu Chunming. A survey on evolutionary robotics [J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(4).)
- [42] Oded Maron, Aparna Lakshmi Ratan. Multiple-instance learning for natural scene classification [A]. *ICML-98* [C]. San Mateo: Morgan Kaufmann, 1998 341-349
- [43] Goldman S A, Kwek S S, Scoot S D. Agnostic learning of geometric patterns [J]. *Computer & System Sciences*, 2001, 6(1): 123-151
- [44] Scholkopf B. Support vector learning [D]. Berlin: Informatik der Technischen Universität, 1997
- [45] Pontil M, Verri A. Support vector machines for 3D object recognition [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 1998, 20(6): 637-646
- [46] 张铃, 张钊. 支持向量机理论与基于规划的神经网络学习算法[J]. 计算机学报, 2001, 24(2): 113-118
(Zhang Ling, Zhang Ba. The theory of SVM and programming based learning algorithms in neural networks [J]. *J of Computers*, 2001, 24(2): 113-118)