

PaperPass旗舰版检测报告

简明打印版

比对结果(相似度):

总体: 7% (总体相似度是指本地库、互联网的综合对比结果)
本地库: 7% (本地库相似度是指论文与学术期刊、学位论文、会议论文、图书数据库的对比结果)
期刊库: 5% (期刊库相似度是指论文与学术期刊库的对比结果)
学位库: 6% (学位库相似度是指论文与学位论文库的对比结果)
会议库: 1% (会议库相似度是指论文与会议论文库的对比结果)
图书库: 3% (图书库相似度是指论文与图书库的对比结果)
互联网: 0% (互联网相似度是指论文与互联网资源的对比结果)

报告编号: 5CB1DC6A950E1WP0A

检测版本: 旗舰版

论文题目: [降重]蛇形机器人爬杆运动的快速自适应控制

论文作者: 简智勇

论文字数: 12343字符(不计空格)

段落个数: 215

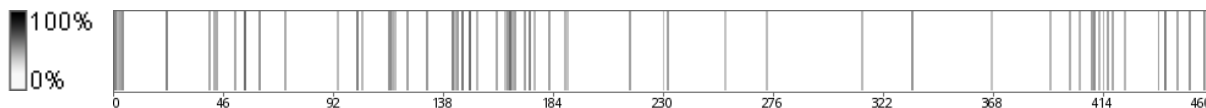
句子个数: 460句

提交时间: 2019-4-13 20:56:10

比对范围: 学术期刊、学位论文、会议论文、书籍数据、互联网资源

查询真伪: <http://www.paperpass.com/check>

句子相似度分布图:



本地库相似资源列表(学术期刊、学位论文、会议论文、书籍数据):

- 相似度: 1% 篇名: 《蛇形机器人的运动控制研究》
来源: 学位论文 北京信息科技大学 2013
- 相似度: 1% 篇名: 《蛇形机器人结构设计与运动控制研究》
来源: 学位论文 哈尔滨工业大学 2016
- 相似度: 1% 篇名: 《蛇形机器人蠕动、蜿蜒运动运动特性的研究》
来源: 学位论文 上海交通大学 2004
- 相似度: 1% 篇名: 《基于振荡器的蛇形机器人CPG运动控制方法》
来源: 学位论文 大连理工大学 2017
- 相似度: 1% 篇名: 《蛇形机器人的运动控制研究》
来源: 学术期刊 《湘潭大学自然科学学报》 2014年3期
- 相似度: 1% 篇名: 《面向行星表面探测的蛇形机器人结构设计与控制研究》
来源: 学位论文 哈尔滨工业大学 2015
- 相似度: 1% 篇名: 《三维蛇形机器人巡视者II的开发》
来源: 学术期刊 《机械工程学报》 2009年5期
- 相似度: 1% 篇名: 《多仿生步态蛇形机器人的分析和实现》
来源: 学位论文 上海交通大学 2014
- 相似度: 1% 篇名: 《基于形态学的蛇形机器人运动步态算法研究》
来源: 学术期刊 《计算机工程与设计》 2011年9期

10. 相似度：1% 篇名：《蛇形机器人模块化结构与蜿蜒运动研究》
来源：学术期刊《机械与电子》2016年1期
11. 相似度：1% 篇名：《蛇形仿生机器人运动控制研究》
来源：学位论文 北京信息科技大学 2014
12. 相似度：1% 篇名：《蛇形机器人的机构设计和运动研究》
来源：学位论文 大连理工大学 2009
13. 相似度：1% 篇名：《具有万向机构的蛇形机器人运动控制》
来源：学术期刊《中国机械工程》2004年24期
14. 相似度：1% 篇名：《模块化蛇形机器人的设计与研究》
来源：学位论文 河北工程大学 2014
15. 相似度：1% 篇名：《基于Webots的蛇形机器人翻滚运动仿真及实现》
来源：学术期刊《自动化与仪表》2011年6期

互联网相似资源列表：

暂无互联网相似资源

全文简明报告:

{53%：蛇形机器人爬升运动快速自适应控制综述}

{60%：蛇形机器人爬坡运动的快速自适应控制}

{46%：[摘要]蛇形机器人是一种通过连接多个活动关节而具有高度冗余的仿生机器人。}
{50%：然而，这种机器人的自主运动是一个非常复杂的问题。} {56%：本文提出了一套蛇形机器人运动的自适应控制框架。} 通过对无监督训练的数据进行聚类和多参数的快速回归分析，本文提出的 控制框架能够保证蛇形机器人在爬杆运动中对环境变化做出快速反应。实验结果表明了通过利用该控制框架，蛇形机器人在运动过程中选择新的控制参数进行调整的时间开销约为100 ms， 显然，对于蛇形机器人，可以在运动期间的非常短的时间内进行正确的步态调整。 并且蛇形机器人能够在本文提出的控制框架的控制下可以去爬升不同直径的杆。

[关键词] 蛇形机器人； 自动化爬杆运动； 加权回归分析算法； 机器学习

目录

第一章引言1

选题背景与意义1

国内外研究现状2

本文的论文结构与章节安排3

第二章蛇形机器人结构， 步态和控制方法4

蛇形机器人模块之间的连接4

蛇形机器人步态6

{60%：正交设计蛇形机器人的攀爬步态7}

第三章研究方法9

研究方法概述9

离线工作算法10

运行时工作算法11

第四章实验与结果16

V-REP 虚拟机器人实验平台介绍16

训练过程17

机器人在直径可变杆上的运动实验18

在不同直径杆上的运动对比实验21

算法效率22

第五章总结与展望23

5.1总结23

5.2展望23

参考文献25

致谢27

第一章引言

选题背景与意义

{49%：蛇形机器人是一类具有高冗余度的仿生机器人[1]。} 蛇形机器人设计核心在于模仿生物蛇的独特的无肢运动以及生物蛇在野外表现出的出色的快速，稳定，多样的运动能力和方式。 {47%：仿生蛇形机器人通常由许多可移动的关节模块组成，可用于为蛇形机器人提供各种形式的运动。} {48%：例如，弯曲和伸缩，蛇形机器人的模块间结构使蛇形机器人与生物蛇一样运动。} 侧移运动或者伸缩运动提供了结构基础。 蛇形机器人已经应用在各个领域，例如灾难的救援（地震之后的救援探测），工厂管道的维护和应用于恐怖事件中作监视作用。

为了更好的完成预定义的任务，蛇形机器人需要获得自主移动和自适应环境及调整自身行为运动的能力[2]， 例如，根据自身和环境的不同情况决定何时何地以及如何移动。 然而，自适应环境去调整自身的运动并不是一件简单的事情。 原因是多方面的。 首先，高度冗余在蛇形机器人的运动建模中造成很大困难，特别是在机器人和环境之间的复杂交互中。 {49%：多自由度蛇形机器人结构使其相应的控制方案更加复杂。} 其次，当遇到未知的环境时，如何确定合适的控制策略显然是一个关键性的问题。 即使对于一个给定的策略，如何确定控制参数的值来使得蛇形机器人能够做出期望的运动也不是可以一步到位的。 第三，决定控制策略及其相应的参数必须在实时的运动过程中做到有效、迅速、及时，否则蛇形机器人的运动很有可能会失败甚至导致蛇形机器人的损坏。

{66%：本文提出了一种新的蛇形机器人自适应控制模型。} 具体来说，本文实验以在爬杆过程中蛇形机器人对环境变化的快速响应为目标。模型基于无监督训练离线收集经验数据，然后通过快速回归分析得到新的控制参数值来控制蛇形机器人有效地适应环境的变化。因为在爬杆过程中，如果控制策略不能做到及时，准确，那么机器人就会出现因为杆的直径发生变化从而从杆上掉落的情况。为了评估本文模型的有效性，本文让蛇形机器人在本文提出的控制策略控制下在不同直径的杆上进行攀爬运动。

本文的贡献和意义在于：

{54%：提出了一种蛇形机器人爬杆的自适应控制模型。} 通过将离线无监督训练和机器人运行时的算法结合，蛇形机器人能够不断调整控制参数来让运动顺利进行。

通过使用熵方差作为选择指标，将多变量回归分析模型简化为单向回归分析模型。

型来实时计算最优的控制参数值。

实验结果表明，运行时的算法开销平均值略大于100 ms并且蛇形机器人可以快速自适应在不同直径的杆上的攀爬运动，顺利在杆上做攀爬运动。

国内外研究现状

国外研究现状

Rollinson等。通过 EKF

（扩展卡尔曼滤波）整合传感器信息在每个时间步长处有效地估计基于步态的蛇形机器人状态，{48%：然后选择相对于该状态的控制参数空间来控制机器人的运动。}

Kuwada 等提出了管道内行进的蛇形机器人的自动行进方法[4]。利用每个关节中的智能执行器，包括直流电机和微处理器，开发了夹持力控制，管径自适应控制和管道曲线的自适应控制三种控制方法从而使得蛇形机器人很好地在不同直径的管道内，包括弯管，T形管和立管自动行走。

Vitiello等。通过这个神经网络系统，机器人能够根据人类用户的个性和人类用户的目前的行为自适应地调整机器人本身的空间位置和行为。通过创新协同的方法使用模糊逻辑，神经网络和贝叶斯分类器来调整机器人关于人类个性和活动的行为（与人类交互时距离人类对象的停止距离）。

Nachstedt等针对于具有螺旋驱动结构的蛇形机器人提出了使用四个具有突触可塑性的自适应神经振荡器作为 CPG（中央模式发生器）来通过螺旋驱动机制实现蛇形机器人的自适应运动[6]。通过使用基于频率适应和 Hebbian型学习规则的自适应机制，仅有三个神经元组成的振荡器能够自动生成适合蛇形机器人运动的周期性模式并且可以通过传感器反馈从而达到记忆模式的效果。

国内研究现状

唐超泉等该控制策略是基于预定义的预期速度值，利用当前速度和预期速度的关系来自调整输入信号进而诱导 CPG模型做出运动的改变的多模态 CPG模型。

吴晓东等人针对蛇形机器人呢自主无碰撞行为提出了用于转弯运动的幅度调制方法（AMM）的计算模型[8]。利用能够使得蛇形机器人头部始终指向运动方向的头部导航运动模式提出了

一种计算模型能够方便计算出关节角度与转角之间的关系，从而如

果确定了无碰撞行为所需要的期望转角，就可以就散出模型的关节角度的变化。紧接着提出了基于传感器的神经网络实现的蛇形机器人无碰撞行为[9]。使用三个IR范围的传感器来获取障碍物信息，根据蛇形机器人的运动策略和行为基于神经元模型构建了信号反馈网络，然后将感知信号用作CPG振荡器输入的调整值。最后通过改变CPG网络中伸肌神经元或屈肌神经元的驱动输入，实现了蛇形机器人可以执行所需的转动动作以避免障碍物。

{43%：为了使蛇形机器人适应未知环境，可以在未知环境中做出正确的姿势。} 使用嵌入式传感器来感知环境并根据传感器数据做出对应的环境感知之后做出相对应的控制算法的方法已被广泛使用[10][11][7][3]。Rollinson和Tang Chaoquan提出的控制方案建议在相应的场景中控制机器人。单独控制每一个控制参数来控制机器人以及固有的运动方程控制方案确实更有效，且能运用更丰富灵活的步态运动。然而参数化步态和中央模式生成器[12]这样的简单控制器虽然已经取得了一些成功，但使用这些控制器创建自主或自适应行为已经证明是困难的。

本文的论文结构与章节安排

{61%：本文共分五章，每章的内容安排如下：}

第一章：{44%：引言本章介绍了蛇形机器人在自适应运动控制中的研究背景，意义，研究现状和相关工作。}

第二章：蛇形机器人结构，步态和控制方法，介绍了本文中采用的蛇形机器人设计结构以及基于正交结构设计的用于本文实验中的蛇形机器人控制函数。

第三章：详细介绍了本文所用的研究方法，研究算法，并介绍了算法的框架和各步骤的详细分析。

第四章：实验和结果展示，本章介绍了实验环境，展示了本文所采用的算法在蛇形机器人爬杆运动中的表现情况，包括数据分析，对照实验，算法性能分析。

第五章：总结与展望。总结本文的研究结论，同时，在现有理论和实验不足的基础上，我们将期待下一步的研究工作。

{54%：第二章蛇机器人结构，步态和控制方法}

{58%：蛇形机器人模块之间的联合连接}

{47%：蛇形机器人模块之间有许多类型的接头，包括正交连接，并联连接和万向节邓登。}

{43%：在本章中，我们将介绍常用的蛇形机器人模块之间的联合连接。} 以及由于本文采用的蛇形机器人的关节为正交连接结构设计的，所以会介绍关节采用正交连接结构设计的蛇形机器人目前所普遍使用的步态方程和本文实验中所使用到的具体步态。

平行连接

早期蛇形机器人关节模块之间最常见的联系是由Shigeo Hirose开发的并联连接。

{51%：第一个蛇形机器人ACM III并联连接[13]（图2-1）。} ACM III蛇形机器人总共2米，由20个并联的电缆接头组成。在飞机上，ACM III可以步态步态以最高40 cm / s的速度移动。蛇形机器人，关节并联连接

特点为：每个相邻关节的旋转在一个平面中，并且旋转辅助轴线彼此平行并且垂直于蛇体的纵向轴线。相应的最小组成单元是双连杆铰接模型（图2-2a），工作空间如图2-2b所示。

万向连接

{53%：普通连接蛇形机器人连杆模型的特点是：} 高灵活性和多种形式的运动。其万向连接的连杆模型为蛇形机器人在三维空间中做灵活，复杂，多样的运动提供了基础。

图 2-3 华南理工 Snakerobot-scut-v5

基于这种连接的最小单位连接模型为两连杆铰接模型，其连接模型和工作空间如图2-4。

正交连接

为了实现蛇形机器人的三维空间中的运动，Shigeo Hirose 教授的科研团队研发的ARM-R3 蛇形机器人关节间采用正交的方式相连接[14]。采用正交连接的蛇形机器人突破了二维空间运动的桎梏，身体能够进行侧行，翻滚，还能实现内外攀爬的高难度步

① <http://robotscut.co>

态。 {60%：通过正交关节连接设计的蛇形机器人的单元模块与其旋转对连接。}
{44%：最小系统模型对的联合模型如图2-5a所示，工作空间如图2-5b所示。} {52%：根据正交连接设计的蛇形机器人的物理和模拟}

关节连接(b) 工作空间

{63%：图2-5蛇形机器人正交连接结构}

的建模如图2-6所示。

(a) 采用正交连接设计的物理蛇机器人 (b) 采用正交连接设计的模拟蛇机器人

{66%：图2-6蛇形机器人正交连接设计示例}

蛇形机器人步态

如今广泛被使用的一个蛇形机器人控制策略是基于 Hirose教授提出的正弦运动模型[15]，也就是说， {45%：Serpensoid曲线模型可以减小电机的扭矩和摩擦，并获得良好的控制效果，如蛇形机器人的运动曲线。} Serpensoid曲线模型如式(2.1)。

式 (2.1) 中的 a, b, c 都是 Serpensoid 曲线的参数。通过修改这些参数可以获得不同类型的Serpensoid曲线。 τ 是波形位置，其改变的速率能够表示曲线运动的速率。 a, b, c 分别指定了曲线的波动大小，周期以及角速度。由于蛇形机器人的关节模

该块是一个独立的刚体，因此通过对曲线公式进行离散化，将其应用于多连杆蛇形机器人的控制。 {49%：用蛇形机器人的每个关节模拟曲线，以获得每个关节的旋转角度。}
Serpensoid 曲线经过离散化化简之后，各个关节在 t 时刻的相对的旋转角度即关节角由以下公式给出：

$$\phi_i(t) = \alpha \sin(\omega t + (i-1)\beta) + \gamma \quad (i=1, 2, \dots, n-1) \quad (2.2)$$

{42%：三个参数 α 、 β 和 γ 确定蛇形机器人的蛇形曲线的形状，即运动的步态。}

{53%： ω 确定Serpensoid曲线行进的速率，即蛇形机器人移动的速率。}

{67%：正交设计蛇形机器人的攀爬步态}

{47%：在Hirose教授提出的Serpensoid曲线模型之后，Tesch教授提出了一种基于蛇形机器人正弦运动模型的三维运动参数方程[16]。} {50%：参数方程简化了蛇形机器人的控制策略，并以少量的控制参数实现了机器人的运动模型。} 我们实验中采用的是滚动步态[17]作为实验中的爬杆步态。 滚动步态的正弦运动模型函数如式 (2.3) 所示：

管内攀爬(b) 管外攀爬

{50%：图2-7带有滚动步态的蛇形机器人的内外攀爬}

通过修改算式2.3中的幅度参数 A ，相位参数 ϵ 和角速度参数 ω 关节的最大可转动角度，
{60%：机器人的螺旋度，蛇形机器人的运动速度也会相应变化。} 与生物蛇不

{44%：同样是蛇形机器人可以显示生物蛇无法表达的滚动步态。} 虽然滚动步态很简单，但是滚动步态却是十分有效的一种运动方式。 通过给予合适的参数，蛇形机器人可以通过滚动步态在地上或者管道内外等环境进行运动（图2-7）。

第三章研究方法

研究方法概述

本文提出的研究方法框架如所示。 {51%：本文将研究方法分为两个主要部分：} 离线工作算法和运行时工作算法（如图3-1）。

图 3-1 研究方法概述

在离线工作算法中，第一步，先定义控制参数的变化空间，让机器人在不同的参数组合的控制方程下爬杆， 在爬杆过程中控制方程中的参数是不变的。 当机器人爬杆时，以 2 秒为周期记录机器人的速度以及关节角度。 最后，将在所有参数组合控制下的蛇形机器人爬杆运动中采集到的数据全部整合成一个大数据集， {45%： K- MEANS++用于对整个数据集进行聚类操作[18][19]。}

{41%：在运行时工作算法中，给定机器人初始化的控制参数，在机器人攀爬过程中，} 它还以2秒的周期收集当前控制参数的实时关节角度，速度和数据值。 然后通过归簇操作在离线工作算法中得到的数据簇中抽取同簇的数据集合。 在获取到同簇的数据集合后，通过熵方差计算衡量每个控制参数对机器人运动的影响程度， 最后，挑选最有影响的控制参数，即最敏感的控制参数。 最终通过加权回归得到最敏感控制参数的新值后代入控制方程从而改变蛇形机器人运动步态。

离线工作算法

在离线工作算法的预处理工作中，让机器人分别在直径为25 cm和35 cm的杆上进行大量的尝试性攀爬运动， 并在爬升过程中收集存储数据，如表3.1所示。

量得到的关节角度值集合。控制参数矢量为 $A \quad \omega \quad \varepsilon$ 其中 A 是幅度参数, ω 是角速度参数, ε 是相位参数 (式 (2.3))。

在收集完蛇形机器人的训练数据之后,我们将蛇形机器人在两个不同直径的杆上训练得到的数据合并成一个大数据集,然后对数据做聚类,目的是为了在运行时工作算法中对计算性能进行优化。

在本文中,训练过程即离线工作算法中收集到的数据是一个大数据集。由于 K-MEANS++ 算法适用于大数据集,具有高效率和可扩展性的优点,因此我们使用 K-MEANS++ 算法执行聚类操作。训练集最终聚集在 N 个簇中。聚类过程可以分为如下几个步骤:

步骤 1: 通过方程 3.1 确定 N 的值。

步骤 2: 执行 K-MEANS++ 算法,伪代码如算法 3.1 所示。K-MEANS++ 是 K-MEANS 算法的改进版本。通过初始化函数 INITILIZE,我们可以得到 N 个初始化的簇心。然后,我们迭代运行更新函数 UPDATE 来不断更新簇心和数据在 N 个簇中的归属直到簇心在误差范围内不再变化为止。

{51%: 通过使用 K-MEANS++ 算法进行聚类,可以将训练数据集 P 分类为 N 个聚类。} 聚类算法输出的数据格式为两个部分:

簇心数据集 X .

属于簇心 $X_k (k \in [1, N])$ 的簇的数据 $P_i (i \in [1, P])$

运行时工作算法

在蛇形机器人实时运行进行爬杆运动时,将周期性地采集实时数据,然后执行运行时工作算法。首先,我们根据离线工作中训练得到的聚类结果对实时采集的数据做归簇操作,然后可以选取同簇中的训练数据,基于这部分数据计算熵方差,选出最敏感的参数,即对步态运动影响最大的步态参数。最后,使用回归分析思想,修改选定的步态参数,保持其他参数不变。

基于熵方差的参数选择

实时数据的归簇

每当我们采集到一组实时数据,我们都会通过式 (3.2) 将其归簇到某个数据簇中。

$$C = \arg \min (X_k - P_t)^2, \quad X_C \in X \quad (3.2)$$

X 是簇心数据矢量集 (算法 3.1)。{42%: X_C 是最接近实时数据矢量 P_t 的欧几里德距离的聚类中心矢量。} X_k 是簇心数据矢量集 X 的第 k 个簇心。{51%: 利用欧几里德距离算法,我们可以计算出两个数据向量之间的相似性。}

优势数据的选择

在对实时数据进行归簇之后,我们在簇中选择 Z 轴速度比当前测量数据中的大的数

据矢量 (式 (3.3))。

$$P_U = \{P_i \mid u_z, i \geq u_z, P_t, P_i \in PC\} \quad (3.3)$$

PC是属于簇心为 X_C 的簇中的所有数据矢量, u_z , i 是 P_i 的 Z 轴速度分量的值, u_z , P_t 是实时数据矢量的 Z 轴速度分量的值, P_U 是所有用于回归的优势数据的数据矢量集合。

最敏感参数的选取

我们采用熵方差作为参考指标来选择应该修改的控制参数。选择最敏感参数的步骤如下:

步骤一: 对数据做离散化预处理操作,目的是为了为了更好的分离数据 (式 (3.4)) 以引入熵的概念对数据做分析。

在式(3.4)中, u_z , i 代表的是原始训练数据中第 i 项数据的 Z 轴速度的值, u_{new} , i 表示的是原始数据中 Z 轴速度离散化之后的 Z 轴速度的值。LD 离散化操作中的步长 (可调节)。最终我们得到的速度离散化序列为:

$$V_{new} = [u_{new, 1} u_{new, 2} u_{new, 3} u_{new, 4}] \quad (3.5)$$

步骤二: 因为对于每一个步态参数都有多种可能的取值。因此我们用集合 S_i , j 来表示控制参数矢量, i 的值是0, 1, 2分别代表了 A , ω 和 ε S_i , j 表示该数据集中控制参数 i 的可能值。我们通过式(3.6)计算当参数 i 的值是其第 j 个可能取值时候的熵值, 同时通过式(3.7)去计算步态参数 i 的熵方差。在式

(3.6), $p(u_{new, k})$ 是控制参数 i 的值等于该数据集中的所有第 j 个值的情况。 Z 轴速度的离散化速度等于 u_{new} , k 的占比比例。 {41%: 在等式 (3.7) 中, $E(H)$ 是当使用控制参数 i 的所有值时的速度熵的平均值。} 以及 N_i 为控制参数 i 的所有可能取值的数量。

步骤三: 对熵方差进行归一化 (式 (3.8)), 然后通过轮盘赌选择算法随机挑选最敏感参数。

通过计算熵方差选择最敏感参数, 然后通过回归分析去得出最敏感参数的新值从而通过修改控制参数改变蛇形机器人运动步态实现环境的适应性运动。

最敏感参数值的赋值

在本文中, 我们采用加权回归分析方法计算需要修改的最敏感步态参数的值, 其中使用了梯度下降法求解拟合回归函数中的加权最小二乘问题。

步骤一: 列出拟合估计函数 (式 (3.9))

在式 (3.9) 中, W 是拟合函数的系数矢量, m 是系数的个数。 P_t 是实时采集到的蛇形机器人的关节角度, 速度和控制参数的实时值的数据矢量。然后我们可以得到误差函数 (式 (3.10)) , 误差函数采用平方和误差, n 是矢量 P_U 中的数据数量

(即 P_U 的维度减去控制参数的数量)。 Q 是 P_i 中的最敏感参数的数据矢量。

$$P_U = [P_U[1] P_U[2] \dots P_U[n]] \quad (3.11)$$

T

$$Q_U[1] Q_U[2] \dots Q_U[n]$$

{43%：通过最小化误差函数 $D(W)$ ，根据梯度下降算法的原理，获得具有最佳拟合度的系数序列 W ，} 我们通过式(3.10)求导得到了式(3.13)。

步骤二：为了保证优势数据矢量拟合和加速回归，对优势数据矢量矩阵 P_U 根据其对应的速度采取加权操作（式（3.14，3.15））。

在式（3.15）中， L_s 是可变学习步长， M 是学习率矩阵。

步骤三：拟合系数矢量 W （式（3.16））。

$$W = W - \nabla_W D \quad (3.16)$$

在这一步中系数向量 W 被更新了。

步骤四：不断迭代以上步骤直到我们获取最拟合的系数向量。 W 的值最终趋于稳定状态。

迭代终止的时候，可以得到最优拟合系数向量 W_{best} 。通过代替 W_{best} （3.17），我们可以求解最敏感参数的回归结果。最终将结果用于步态的控制中，对于其他参数我们保留其原来的值，只修改最敏感参数的值。

$$Q_t = F_w(P_t) = W^T P_t \quad (3.17)$$

第四章实验与结果

我们在实验中采用滚动步态作为仿真爬杆实验的基本步态，为了验证蛇形机器人在我们提出的自适应控制框架下能够对于变化的环境表现出适应性，我们在 V-REP

(Virtual Robotics Experimentation Platform) ①机器人仿真实验平台上进行建模实验，让机器人在我们的控制框架下在不同直径的杆进行自适应地攀爬运动。

仿真实验主要分为两个过程：训练和运动仿真。我们将运动仿真实验分为两组实验，分别是沿着直径变化的杆的自适应运动实验以及沿着不同直径的直杆做自适应运动实验。

V-REP 虚拟机器人实验平台介绍

V-REP 称为虚拟机器人实验平台，是一款基于分布式控制架构、具有集成开发环境的机器人仿真工具。在 V-REP 中的每个对象或者模型可以通过嵌入式脚本、插件、ROS 节点或者远程 API 客户端及自定义解决方案单独控制。V-REP 中的控制器支持多种编程语言，包括 C/C++、Python、Java、Lua、Matlab 或 Octave。以上的特点使得 V-REP 十分通用且非常适合多机器人的应用。V-REP 的主要特性包括：是跨平台且可移植；支持六种编程方法；有强大的应用程序接口及支持六种编程语言；具有超过 100 个可嵌入的 V-REP 功能；具有基于动力学/物理学的引擎。

图 4-1 基于 V-REP 平台搭建仿真环境的例子

① <http://www.v-rep.eu/>

V-REP仿真平台还具有完整的运动学解算器(对于任何机构的逆运动学和正运动学), 动态粒子模拟, 碰撞检测, 对象/模型间的最小距离计算, 各类型传感器的模拟仿真, 数据的记录及可视化实现, 路径规划, 自定义用户界面, 集成编辑模式, 简易的数据导入导出等特性。 {44%: V-REP已用于工厂自动化仿真, 快速算法开发, 机器人相关教学, 快速原型设计和验证, 远程监控, 安全审查等领域。} 图4-1是基于 V-REP 平台搭建的一个机器人环境的例子。

训练过程

420000

400000

380000

360000

340000

320000

300000

280000

260000

1015202530

N_k

图 4-2 K-MEANS++ 中不同 N_k 取值时的簇方差

在数据获取阶段, 我们让蛇形机器人在不同的多组参数组合下在 25 cm 和 35 cm 的

杆上进行无目的性的攀爬运动, 最终总共能收集到 2 万 5 千组的训练数据。控制参数幅度 A , 相位 ε 和角速度 ω 的变化区间分别为 $[40, 80]$, $[0, 5]$ 以及 $[1.5, 3]$ 。并且, 幅度参数 A 的变化步长是 5, 相位参数 ε 的变化步长是 1, 以及角速度参数的变化步长为 ω

0.5。我们让蛇形机器人在不同参数组合下进行爬杆运动, 在爬杆过程中收集相应的数据。 {55%: 在数据预处理阶段, 我们对训练数据进行聚类操作。} 我们通过算式3.1求出不同

N_k 的取值下的簇方差(如图4-2), 通过图4-2的结果可以得出当 $N_k=25$ 时聚类的结果是更均匀的, 因此, 我们使用 K-MEANS++算法在聚类时确定 $N_k=25$ 。 $N_k = 25$ 的最终K-MEANS ++聚类结果如图4-3所示。

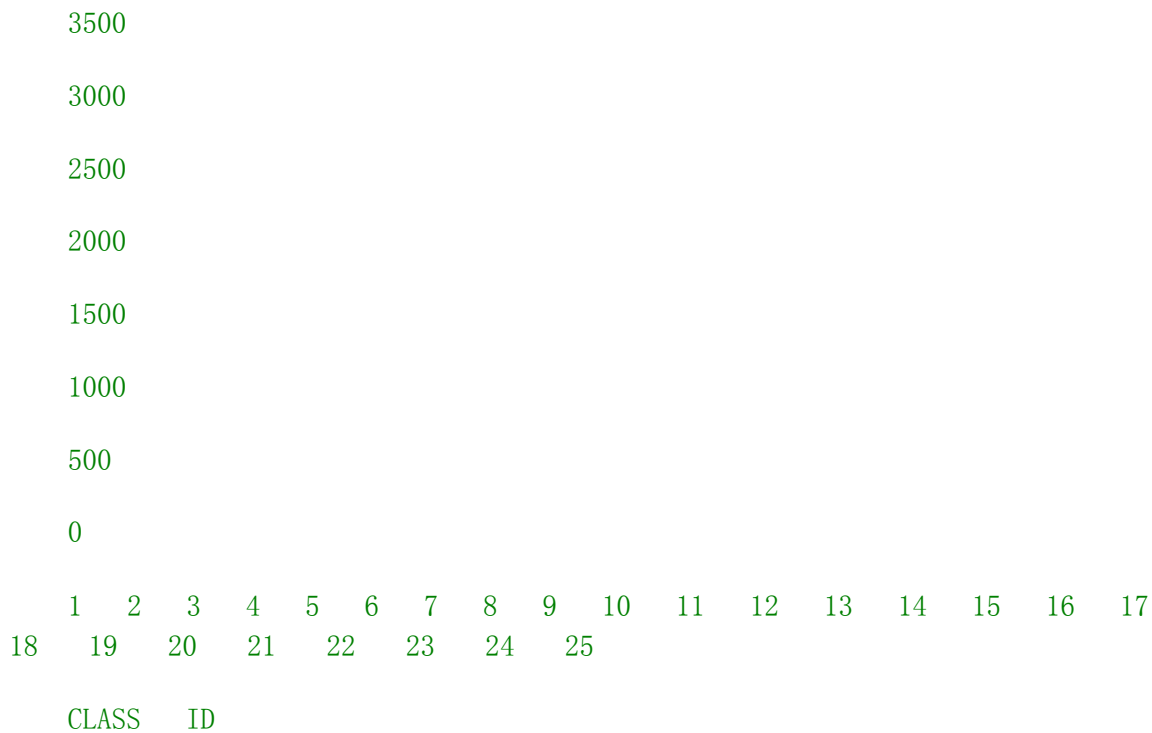


图 4-3 $N_k = 25$ 时使用 K-MEANS++ 聚类的结果

机器人在直径可变杆上的运动实验

在这一部分仿真实验中，我们的实验环境是一个复杂的杆模型。实验所用杆模型主要分为三个部分。第一和第三部分，即最低和最高的部分的杆的直径都为 35 cm，中间部分用直径为 25 cm 的杆来连接。我们在蛇形机器人 80s 的运动中记录下参数和速度的变化。

记录下来的实验结果如图4-4，4-5所示。在0 s到4 s蛇形机器人在初始参数下是无法蜷缩到能卷紧杆的状态的，所以机器人在一开始会不断调整自己的形状以卷紧未知直径的杆。所以在这一阶段，Z 轴速度的值是接近于 0 的。从24秒到45秒，蛇机器人爬上35厘米直径的杆。在这一阶段，控制参数 A ， ε 以及 ω 全部都在改变并且 A 和 ε 最终会趋于一个比较稳定的值。在45 s时，蛇形机器人到达了杆的直径发生变化的节点，由于直径变化的幅度很大，所以机器人无法马上去卷紧下一个不同直径的杆，于是便导致了这里 Z轴速度会接近于0。通过本文提出的运动控制框架，蛇形机器人可以自动调整参数来适应下一个不同直径的杆来继续其攀爬运动。从图4-5 a，4-5 b和4-5 c可以得到，在这个变杆节点参数都在变大，从而顺利地让蛇形机器人可以继续往上爬。同样地，在 63 s 时，蛇形机器人来到了第二个变杆节点。{41%：蛇形机器人还可以自动调整控制参数，以便顺利地继续攀爬。} 然后可以看到最终所有参数都会趋于一个稳定的值，原因是在运动的后阶段杆的直径没有再发生变化从而不需要再去调整步态参数来对突变环境做适应性运动。

最终，所有控制参数包括 Z 轴速度也是趋近于一个稳定的值。它表明我们的控制策略允许蛇形机器人自动调整其运动，以适应不断变化的运动环境。

实验证明了我们的控制策略对于机器人在直径可变杆做适应性自主运动是行之有效的

在不同直径杆上的运动对比实验

由于现实世界中的环境是未知且复杂多变的，训练所用的环境和现实环境可能存在差异。我们训练环境为直径为 25 cm 和 35 cm 的直杆。为了验证我们的控制策略能够用于实际的多样化的场景，我们在直径为 20 cm, 25 cm, 30 cm, 35 cm 和 40 cm 的杆上进行了独立的验证实验。实验结果如图4-6。

通过观察参数变化曲线，我们可以得出杆的直径越小，对于蛇形机器人来说需要更多的时间去从初始步态来调整到合适的步态，原因是初始步态是统一的。对于直径为 40 cm 的杆的实验场景，由于蛇形机器人关节数的限制，无法形成一个首尾相接的环来环抱 40 cm 的杆。在这种情况下，由于不需要去形成螺旋状的步态，所以相位参数 ε 的作用就会变得十分弱（图4-6b）。根据相位参数 ε 的作用，可以得出对于直径更小的杆，例如直径为 20 cm 的杆，只调整幅度参数 A 是不足以让机器人能够很好地环抱杆从而保证顺利攀爬。因此，在直径更小的杆下进行攀爬运动，蛇形机器人会不断调整相位参数 ε 配合幅度参数 A 的调整来使得机器人形状能够紧紧环抱住杆进行攀爬，从而使得机器人形状很好地支撑攀爬运动（图4-6 a, 4-6 b）。实验结果表明，我们的控制策略能够帮助蛇形机器人能够在未知的直径的杆上不断调整自身步态来进行攀爬且最终都达到了一个合适且稳定的步态。

在所有实验环境中，机器人的运动速度最终会围绕一个值上下波动（图4-6d）。杆的直径的变化仅仅影响速度曲线的收敛速度，即机器人达到稳定速度的耗时。机器人运动的步态控制参数最终也是会收敛达到稳定（图4-6）。{45%：这表明外部环境变化对控制策略的影响非常微弱。} 最终机器人将在其运动过程中能够不断找到最需要调整的参数并且进行计算调整。

图4-7描述了我们的控制策略中算法的计算开销以及蛇形机器人在不同直径的杆上进行攀爬运动的耗时统计。图4-7 a的图表形状表示的意思为在某个直径的杆下执行算法的性能，最低点为算法的最小计算耗时，最高点为算法的最高计算耗时，而中间的矩形表示为算法的平均计算耗时。可以看到，无论杆的直径如何，算法的计算耗时都是相似的，这表明我们的控制策略的算法计算开销不仅在一个可忽略的范围内，而且受环境的影响也很小。可以观察到机器人会花费更多时间来攀爬直径较小的杆，原因是蛇形机器人需要更多的时间将初始步态调整为合适的步态。

{47%：实验结果表明，我们提出的控制策略可以实现蛇形机器人运动的自适应控制。}

第五章总结与展望

总结

本文提以蛇形机器人自适应控制为研究的主要内容，提出了一种基于经验学习的机器人自适应控制框架。{45%：首先介绍了国内外蛇形机器人自适应控制和自动运动的研究现状。} 本文实验的环境是 V-REP 仿真平台，在该平台上对正交结构的蛇形机器人和管道环境进行建模，本文算法通过 V-REP 提供的应用程序接口应用于蛇形机器人的运动。本文将机器人实时的 Z 轴速度作为反馈信号，并采用回归分析来让机器人自主调整运动步态。通过对训练数据进行聚类优化了运行时工作的计算耗时，并通过计算每个控制参数的熵方差用于选择最敏感的控制参数，{52%：以将多元回归分析问题转换为单向回归分析问题。} {57%：实验表明，该方案有效，取得了良好的效果。}

本文的研究内容和研究成果如下：

{45%：角形传感器，加速度计，陀螺仪等集成在蛇形机器人的关节模块上，实时获取蛇形机器人的运动姿态。} 收集必要的实验数据以确保算法的及时性。

{46%：通过使用k-means ++聚类算法对训练数据进行聚类，对运行时算法中的一些有效数据进行回归分析，优化算法的计算效率。}

引入了熵方差的衡量标准，有效衡量了每个控制参数对步态的影响程度，从而便于挑选最敏感参数， {50%：因此，在回归分析部分中，将多元回归分析简化为单向回归分析。}

在爬杆模型中，本文在复杂的变杆模型和多种直径的直杆模型进行多组对照实验。
{49%：实验结果表明，本文提出的蛇形机器人爬升运动的快速自适应算法是正确有效的。}
根据实时获得的位姿信息，蛇形机器人通过快速地回归分析自适应地调整步态参数。

展望

如本文上面所提到的，本文实现的方法的思路不仅可以用于本实验中的杆攀爬运动中，还可以用于机器人的其他运动环境或应用中。对于该算法只要给出足够的训练数据和清晰的运动目的是可以适应其他相应的场景， {45%：例如无人驾驶车辆的自适应运动，粗糙地面上蛇形机器人的运动和模拟 PID控制。} 但是这些情况还没有通过实验验证。 本文

实现的基于经验学习的应用在关节正交结构的蛇形机器人上的控制算法还有一些不足之处，如下所示：

本文实现的自适应控制算法尚未应用于真正的蛇形机器人。 在真实的蛇形机器人上需要在真实的蛇形机器人上安装足够多的传感器以及通过信号收发模块来收集运动数据。 在真实蛇形机器人上的成功应用是本文提出的自适应控制的最终目的。

本文提出的自适应控制算法实验中只对蛇形机器人在复杂的杆中运动进行测试实验，运动步态还不够复杂，运动环境也不够复杂。 更复杂的运动环境和步态还有待验证。

本文提出的自适应控制算法实验中，蛇形机器人只是在纵向向上的运动中可以自适应调节步态。 事实上蛇形机器人在横向或者纵向存在向上运动趋势的运动中都能够在本提出的算法控制下顺利运动， 然而，具有垂直向下移动趋势的运动蛇形机器人不能平稳地执行。这是之后算法改进需要考虑的一点。

我们可以通过拓展蛇形机器人的经验特征值，例如引入摩擦力，倾斜度等特征因子，允许蛇形机器人在更复杂的环境中实现自适应运动。

{51%：这种蛇形机器人的自适应运动控制是一次成功的尝试。} 日后可以在更多相关的研究进展中不断完善改进我们的算法甚至可以将我们的算法思想应用到多种实验情况中，如自动驾驶的控制等等。

致谢

{61%：四年的大学时光飞逝，本科大学的生活即将结束。} 从此我将告别象牙塔的生活，去社会接受检验和磨练。 回顾大学四年的时光，虽然走的并不是一帆风顺和轻松惬意，但是却在克服一个个困难之后收获了许多，成长了许多。 在此毕业论文即将付梓之际，我想在这感谢老师四年的教诲，家人的关心鼓励以及同学的帮助。

首先最想感谢的是我的导师，黄凯老师。 {49%：黄老师始终以科学严谨的态度，细致的工作作风激励着我。} 在学习上，他耐心地指导我的科研项目，解答我的疑问。 在生活中，老师也和蔼可亲地关心着我们。 他既是我的导师，也是我的益友。 是我大学生涯一盏指路的明灯。

{54%：其次，我要感谢我的父母和亲戚，他们是最坚定的后盾，不断给予我前进的信心和勇气。} 然后我还想谢谢我的女朋友，她的出现带给了大三迷茫的我为自己梦想而拼搏奋斗的勇气，她的陪伴和鼓励给予我不断向前的勇气和信息。在这里我也想对正在学业道路上奋斗的她说一声：“相信自己，你一定可以到达成功的彼岸的！”

{55%：最后，我还要感谢我的同学和朋友，我们在学术生活中前进，互相支持，谢谢，}让我在前进的路上不会孤单，感谢你们在我向你们伸出援手的时候无私地帮助我。

简智勇

2019 年 4 月 10 日

检测报告由PaperPass文献相似度检测系统生成

Copyright 2007-2019 PaperPass