



本科生毕业论文（设计）

Undergraduate Graduation Thesis (Design)

题目 Title: 蛇形机器人爬杆运动
的快速自适应控制

院 系
School (Department): 数据科学与计算机学院

专 业
Major: 软件工程

学 生 姓 名
Student Name: 简智勇

学 号
Student No.: 15352146

指 导 教 师 (职 称)
Supervisor (Title): 黄凯 教授

时间：二〇一九年四月十六日

Date: April 16th 2019

表一 毕业论文（设计）开题报告

Form 1: Research Proposal of Graduation Thesis (Design)

论文(设计)题目:

Thesis (Design) Title: 蛇形机器人爬杆运动的快速自适应控制

(简述选题的目的、思路、方法、相关支持条件及进度安排等)

(Please briefly state the research objective, research methodology, research procedure and research schedule in this part.)

选题目的:

蛇形机器人是一类仿生超冗余度机器人，用于模拟蛇类生物在野生环境中的仿生运动，具有快速、稳定、多样性等特点。这些蛇形机器人多数是由许多活动关节模块连接组成，从而赋予它们运动学上的多功能性，如弯曲、伸展和盘绕。蛇形机器人已经应用在各个领域，如救灾、工厂维护和恐怖主义的监视任务。

为了更好地完成预定的任务，蛇形机器人需要获得自主移动和自适应行为的能力，例如，根据其所处环境的不同情况决定何时、何地以及如何移动来自动适应环境，然而这种实现是不容易的。首先，由于蛇形机器人具有冗余的自由度，使得机器人的运动建模比较困难，尤其是机器人与环境之间复杂的相互作用，使得多自由度机器人的运动控制更加复杂。第二，当遇到事先未知的环境时，显而易见的需要确定可控制的策略。即使对于给定的控制策略，如何确定其参数也不简单。第三，确定控制策略及其相应参数的运行过程必须是有效的，即实时的。否则，机器人的期望运动将很可能失败。

为了让机器人适应未知环境，利用传感器感知环境和嵌入环境感知规则的方法已经被广泛使用。提出了一种基于 CPG (中心模式发生器) 模型的控制策略。提出了一种基于状态估计的蛇形机器人自适应控制。由于这些方法中的模型是基于状态估计的梯度模型。有研究者提出了结合物理环境信息的神经网络模型来确定控制方案，然而这些模型仅仅是控制建议。

所以本课题提出一种新的蛇形机器人自适应控制框架。基于离线无监督训练收集的数据，我们的框架能够通过快速回归有效地适应环境变化的新的控制参数的值。具体来说，我们的目标是爬杆，这需要快速响应环境的变化即杆的半径的变化。在这种情况下，如果机器人的运动不能做到及时适应，机器人就会掉下来。为了评价该方法的有效性，我们计划对蛇形机器人在不同杆上进行了实验以及对于不同爬杆步态采用算法进行实验。

思路:

通过数据驱动的方式，基于蛇形机器人爬杆时所用的步态——Rolling 步态，主要分成两大步骤：

- 1) OFFLINE 训练：确认参数的变化空间，然后进行离线的训练，采集训练数据（如关节角度，参数值，速度等）。然后对采集的大量数据进行一个预处理，使用聚类方法进行归类。
- 2) ONLINE 算法驱动：通过实时地按照一定频率不断调用算法来调整蛇形机器人的步态参数值。通过利用回归分析来获取所需要修改的参数值来调整蛇形机器人的步态。

方法：

本研究采用的研究方法如下：

- 1) 相关论文查找，归类，阅读及综合分析；
- 2) 实验环境的搭建（仿真模型的建模或者实物机器人的构建和检测）；
- 3) 算法代码的编写实现；
- 4) 进行样例实验检测算法的可行性和对比实验检测算法的有效性；
- 5) 收集实验数据进行实验结果的对比分析；

相关支持条件：

实验所需的软硬件为：

- 1) V-REP 仿真平台；
- 2) 带有 Linux 操作系统的主机一台；
- 3) 蛇形机器人实物；
- 4) 各种元件模块如 wifi，芯片等；

进度安排：

整体进度安排如下：

- 2018.12-2019.01 进行文献查阅，确认算法实现框架；
- 2019.01-2019.02 进行实验环境的搭建和算法代码的编写实现；
- 2019.02-2019.03 进行样例实验以及对比实验，采集实验数据；
- 2019.03-2019.04 进行实现结果分析以及学位论文初稿的撰写；
- 2019.04-2019.05 进行算法或者实验的优化，在指导老师的意见下对学位论文进行更进一步地修改；
- 2019.05-2019.06 准备毕业论文答辩；

Student Signature:

Date:

指导教师意见:

Comments from Supervisor:

1. 同意开题 2. 修改后开题 3. 重新开题

1. Approved() 2. Approved after Revision() 3. Disapproved()

Supervisor Signature:

Date:

表二 毕业论文（设计）过程检查记录表

Form 2: Process Check-up Form

指导教师分阶段检查论文的进展情况（要求过程检查记录不少于 3 次）

The supervisor should check up the working process for the thesis (design) and fill up the following check-up log. At least three times of the check-up should be done and kept on the log.

第一次检查（First Check-up）：

学生总结

Student Self-Summary:

在这一阶段，XXX 工作基本完成，主要在以下几个方面：

- 1) 完成了第一项。
- 2) 完成了第二项
- 3) 完成了第三项。

指导教师意见

Comments of Supervisor:

论文完成情况良好。

第二次检查（Second Check-up）：

学生总结

Student Self-Summary:

...

指导教师意见

Comments of Supervisor:

...

第三次检查 (Third Check-up) :

学生总结

Student Self-Summary:

...

指导教师意见

Comments of Supervisor:

...

第四次检查 (Fourth Check-up) :

学生总结

Student Self-Summary:

...

指导教师意见

Comments of Supervisor:

...

学生签名 (Student Signature) :

日期 (Date) :

指导教师签名 (Supervisor Signature) :

日期 (Date) :

总体完成情况 (Overall Assessment)	<p>指导教师意见 Comments from Supervisor:</p> <p>1、按计划完成，完成情况优 (Excellent): () 2、按计划完成，完成情况良 (Good): () 3、基本按计划完成，完成情况合格 (Fair): () 4、完成情况不合格 (Poor): ()</p> <p>指导教师签名 (Supervisor Signature) : 日期 (Date) :</p>
--	---

表三 毕业论文（设计）答辩情况登记表

Form 3: Thesis Defense Performance Form

答辩人 Student Name	简智勇 Jian Zhiyonf	专业 Major	软件工程 Software Engineering			
论文(设计)题目 Thesis (Design) Title	蛇形机器人爬杆运动的快速自适应控制 Fast Adaptive Control Of Snake Robots For Pole Climbing					
答辩小组成员 Committee Members						
<p>答辩记录 Records of Defense Performance:</p>						
<p>记录人签名 (Clerk Signature) : _____ 日期 (Date) : _____</p>						

学术诚信声明

本人所呈交的毕业论文，是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果，所有数据、图片资料均真实可靠。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他人或集体已经发表或撰写过的作品或成果。对本论文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确的方式标明。本毕业论文的知识产权归属于培养单位。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

本人签名：

日期：

Statement of Academic Integrity

I hereby acknowledge that the thesis submitted is a product of my own independent research under the supervision of my supervisor, and that all the data, statistics, pictures and materials are reliable and trustworthy, and that all the previous research and sources are appropriately marked in the thesis, and that the intellectual property of the thesis belongs to the school. I am fully aware of the legal effect of this statement.

Student Signature:

Date:

蛇形机器人爬杆运动的快速自适应控制

[摘 要] 蛇形机器人是一种通过多个可活动关节进行连接，具有超高冗余度的仿生机器人。然而，蛇形机器人的自主性运动是一个非常复杂的问题。本文提出了一套蛇形机器人自适应爬杆运动中的控制框架。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 100ms，显然对于蛇形机器人在运动过程中能够以十分短的时间内做出正确的步态调整，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

Fast Adaptive Control Of Snake Robots For Pole Climbing

[Abstract] Snake-like robots are a class of biomorphic hyper-redundant robots consist of many chain-connected active joint modules. Autonomy of this kind of robots is however a complex problem. This paper proposes a control framework for the adaptive pole climbing of snake robots. By clustering the unsupervised training data and fast multi-parameter regression, the framework proposed in this paper can help snake-like robots rapidly react to environment changes. Experimental results show that, by using the framework proposed in this papaer, the overhead of choosing a control parameter and setting a new value for it is about 100 ms, which means that snake-like robots can adjust the gaits correctly and fastly during the motions. What's more, snake-like robots can climb poles with different diameters with the framework proposed in this paper.

[Keywords] Snake-like robots; autonomous pole climbing; weighted regression analysis

目录

第一章 引言	1
1.1 选题背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 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
2.1 蛇形机器人关节模块间的连接方式	4
2.2 蛇形机器人步态	6
2.3 关节模块采用正交连接设计的蛇形机器人的滚动攀爬步态	7
第三章 研究方法	9
3.1 研究方法概述	9
3.2 离线工作算法	10
3.3 运行时工作算法	11
第四章 实验与结果	16
4.1 V-REP 虚拟机器人实验平台介绍	16
4.2 训练过程	17
4.3 机器人在直径可变杆上的运动实验	18
4.4 在不同直径杆上的运动对比实验	20
4.5 算法效率	21
第五章 总结与展望	22
5.1 总结	22
5.2 展望	22
参考文献	24
致谢	26

第一章 引言

1.1 选题背景与意义

蛇形机器人是一种具有超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。仿生蛇形机器人通常是由许多可活动关节模块连接组成，这种组成方式赋予了蛇形机器人多样的运动形式，例如弯曲和伸缩，蛇形机器人的模块间结构给蛇形机器人像生物蛇一样做蜿蜒运动，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，高冗余的自由度给蛇形机器人的运动建模制造了很大的困难，特别是在机器人和环境的复杂交互中建模尤为困难。拥有多自由度的蛇形机器人结构使得为其设计对应的控制方案更加的复杂。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。

本文提出了一种新的蛇形机器人在自适应运动中的控制模型。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。

本文的工作包括如下几个方面：

- 提出了一个蛇形机器人自适应爬杆运动的控制模型。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。
- 通过熵方差作为选择指标，将一个多元回归分析模型简化成一个一元回归分析模

型来实时计算最优的控制参数值。

- 通过分析算法复杂度以及实验结果，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。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国外研究现状

Rollinson 等提出了一种基于状态估计的蛇形机器人自适应控制方案^[3]。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，然后选择在该状态下相对应的控制参数空间来控制蛇形机器人的运动。

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，包括在弯道管道，T 型管道和垂直管道中自动行进。

Vitiello 等提出了一种基于神经模糊贝叶斯系统的机器人自适应空间行为的控制方法^[5]。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结合模糊逻辑，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。

1.2.2 国内研究现状

唐超权等提出了一种基于多模态 CPG（中枢模式发生器）模型的控制策略^[7]，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系统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开障碍物。

为了使蛇形机器人去自主适应未知的环境，即能够在未知的环境中做出正确的运动步态和姿态，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 和唐超权提出的控制方案的提出在相应场景下对机器人的控制比人类去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。

1.3 本文的论文结构与章节安排

本文包括如下五个章节，具体每个章节的内容安排如下所示：

第一章：引言，本章介绍了蛇形机器人在自适应运动控制方面的研究背景，意义，国内外研究现状及相关工作安排。

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本文实验中所使用的关节模块基于正交结构设计的蛇形机器人的控制方程。

第三章：研究方法介绍，详细地介绍了本文所采用的研究算法，介绍了算法的框架以及每个步骤的详细分析。

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，同时根据目前理论和实验的不足之处，对下一步的研究工作做展望。

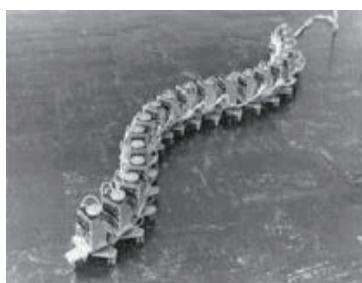
第二章 蛇形机器人结构, 步态和控制方法

2.1 蛇形机器人关节模块间的连接方式

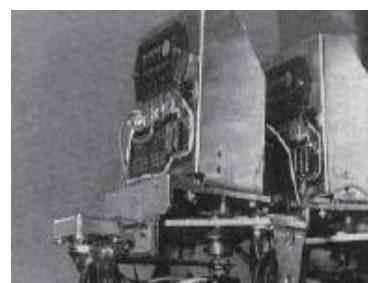
蛇形机器人关节模块间的连接方式有许多种, 包括正交连接, 平行连接以及万向连接等等。在本章节中, 将会介绍常用的蛇形机器人关节模块间的连接方式。以及由于本文采用的蛇形机器人的关节模块为正交连接结构设计的, 所以将会介绍关节模块采用正交连接结构设计的蛇形机器人目前所普遍使用的步态方程和本文实验中所使用到的具体步态。

2.1.1 平行连接

早期的蛇形机器人关节模块间最常见的连接方式就是平行连接, 由 Shigeo Hirose 研发的第一台蛇形机器人 ACM III 的连接方式就是平行连接^[13] (图2-1)。ACM III 蛇形机器人全长 2 米, 总共由 20 个索状关节以平行连接的形式构成。在平面中 ACM III 以蜿蜒曲线步态做运动的速度最高可达 40cm/s。关节模块间采用平行连接设计的蛇形



(a) ACM III 样机



(b) ACM III 的局部连接和驱动装置

图 2-1 蛇形机器人 ACM III

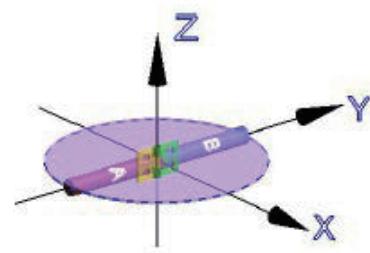
机器人的特点为: 各个相邻关节的转动都是在一个平面内的, 且转动副轴线相互平行且垂直于蛇体的纵轴。对应的最小构成单位为两连杆铰接模型 (图2-2a), 工作空间如图2-2b所示。

2.1.2 万向连接

关节模块间采用万向连接设计的蛇形机器人的连杆模型的特点为: 灵活度高, 运动形式多样化。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



(a) 关节连接



(b) 工作空间

图 2-2 蛇形机器人平行连接结构

动 提 供 了 基 础。

图2-3是由华南理工大学研制的第三代蛇形机器人样机 Snakerobot-scut-v5^①。其头部关节采用的是独立的万向关节连接设计，通过在头部安装摄像头和重力感应器后通过特定的算法控制使得蛇形机器人在运动中能够维持头部关节的稳定，通过稳定的蛇形头采集图像，可用于桥梁缆索系统的检测或远程图像的检测提取工作。

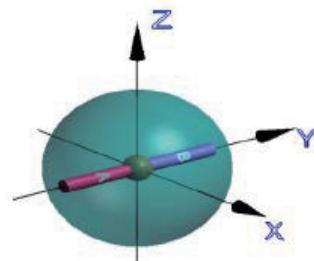
基于这种连接的最小单位连接模型为两连杆铰接模型，其连接模型和工作空间如图2-4。



图 2-3 华南理工 Snakerobot-scut-v5



(a) 关节连接



(b) 工作空间

图 2-4 蛇形机器人万向连接结构

2.1.3 正交连接

为了实现蛇形机器人的三维空间中的运动，Shigeo Hiorse 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]。关节模块间采用正交连接设计

^① <http://robotscut.co>

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态。关节模块间采用正交连接设计的蛇形机器人的单元模块和其转动副连接, 最小的系统模型为三连杆模型, 相邻的转动副呈现垂直的关系。最小系统模型对的关节连接模型如图2-5a所示, 工作空间如图2-5b所示。根据正交连接设计的蛇形机器

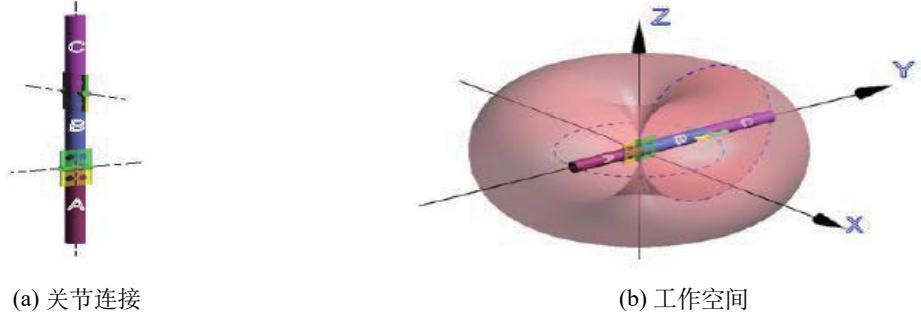


图 2-5 蛇形机器人正交连接结构

人的实物和仿真下的建模如图2-6所示。

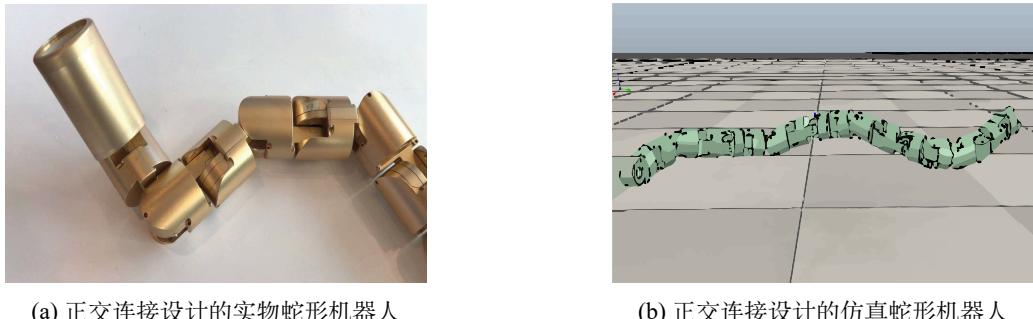


图 2-6 蛇形机器人正交连接设计示例

2.2 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 Serpenoid 曲线模型, 这种运动曲线能够有效地让电机的力矩和摩擦力减小, 同时作为蛇形机器人的运动曲线取得了良好的控制效果, Serpenoid 曲线模型如式(2.1)。

$$\begin{cases} x(s) = \int_0^s \cos \tau d\sigma \\ y(s) = \int_0^s \sin \tau d\sigma \\ \tau = a \cos(b\sigma) + c\sigma \end{cases} \quad (2.1)$$

式(2.1)中的 a, b, c 都是 Serpenoid 曲线的参数。通过对这几个参数进行修改可以

得到不同类型的 Serpenoid 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块是独立的刚体, 因此通过对曲线公式离散化从而应用到多连杆蛇形机器人的控制中, 用蛇形机器人的每个关节去模拟曲线, 以获得每个关节的旋转角度。Serpenoid 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:

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

其中蛇形机器人 Serpenoid 曲线的形状, 即运动的步态由参数 α, β 和 γ 决定。Serpenoid 曲线的传播速率即蛇形机器人运动的速率由 ω 决定。

2.3 关节模块采用正交连接设计的蛇形机器人的滚动攀爬步态

在 Hirose 教授提出了 Serpenoid 曲线模型之后, Tesch 教授提出了一个基于正弦运动模型的蛇形机器人的三维运动参数方程^[16]。该参数方程简化了蛇形机器人的控制策略, 并实现了用少量控制参数来确定机器人的运动模型。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:

$$T_i = \begin{cases} A \cdot \sin(\omega \cdot t + i \cdot \varepsilon) & \text{odd} \\ A \cdot \sin(\omega \cdot t + i \cdot \varepsilon + \frac{\pi}{2}) & \text{even} \end{cases} \quad (2.3)$$



(a) 管内攀爬



(b) 管外攀爬

图 2-7 蛇形机器人滚动步态的管道内外攀爬运动

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, 机器人的螺旋化程度, 蛇形机器人的运动速率会对应地发生改变。与生物蛇不同的是蛇形机器人可以表现出生物蛇无法表现的滚动步态。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

3.1 研究方法概述

本文提出的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）。

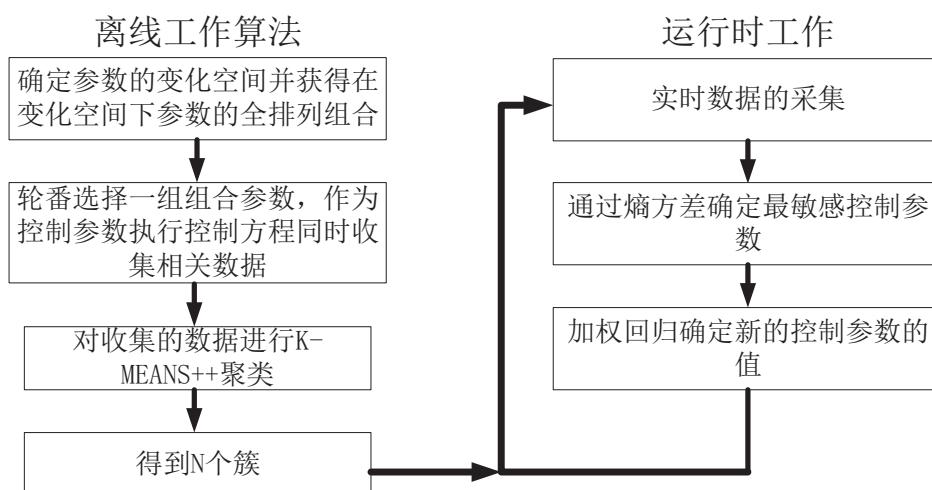


图 3-1 研究方法概述

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 Z 轴方向加速度以及关节角度。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，然后对整个数据集采取 K-MEANS++ 算法实现聚类^{[18][19]}。

在运行时工作算法中，首先给定机器人已初始化好的控制参数。在机器人爬杆过程中，以 2 秒为周期收集机器人实时的关节角度，加速度和当前控制参数的数据值，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，最终挑取影响程度最大的控制参数，即最敏感控制参数。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。

3.2 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，并且在攀爬过程中收集存储数据，存储数据类型如表 3.1 所示。

表 3.1 机器人训练时记录的数据类型

数据类型	Definition
$\theta_{m,i}$	第 i 个关节的关节角度值
M	所测量的所有关节角角度的均值
a_z	Z 轴的加速度值
A	幅度（控制参数）的值
ω	角速度（控制参数）的值
ε	相位（控制参数）的值

我们定义 $M = \frac{\sum_{i=1}^n \theta_{m,i}}{n}$ 其中，n 是关节总数量。 $\theta_m = [\theta_{m,1} \ \theta_{m,2} \ \dots \ \theta_{m,n}]$ 是测量得到的关节角度值集合。控制参数矢量为 $[A \ \omega \ \varepsilon]$ ，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++ 算法在大数据集下工作具有效率高和可拓展性的优点，因此我们采用 K-MEANS++ 算法执行聚类操作。将训练集最终聚类出 N 个簇。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。

$$N = \arg \min_{N_k} \frac{\sum_{N_k} (S_i - E)^2}{N_k} \quad (3.1)$$

其中 $E = \frac{\sum_{N_k} (S_i)}{N_k}$ ， $i \in [1, N_k]$ 。 S_i 是每个簇中成员数据到簇心的距离的均值。

- 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。

算法 3.1: K-MEANS++ 算法

```

1 输入: 训练数据集  $P$ , 簇的数量  $N$ 
2 输出: 簇心的数据集  $X$ 
3 1 FUNCTION INITIALIZATION( $P, N$ ) 开始
4    $X \leftarrow$  从  $P$  中随机选取一个数据矢量
5   当  $|X| < N$  进行
6     对于  $i = 1 \rightarrow |P|$  进行
7        $I \leftarrow \arg \min_i \left( \sum_{j=1}^{|X|} \|X_j - P_i\|^2 \right)$ 
8        $X \leftarrow X \cup \{P_I\}$ 
9        $P \leftarrow P - P_I$ 
10 8 返回  $X$ 
11 9 FUNCTION UPDATE( $P, X$ ) 开始
12   当  $X$  在误差范围内不再变化 进行
13     对于  $i = 1 \rightarrow |P|$  进行
14        $C_i \leftarrow \arg \min_k (\|P_i - X_k\|^2)$ 
15     对于  $k = 1 \rightarrow |X|$  进行
16        $X_k \leftarrow \frac{\sum_{i \in \{C_i=k\}} P_i}{\sum_{i \in \{C_i=k\}}}$ 
15 返回  $X$ 

```

通过使用 K-MEANS++ 算法对训练数据集 P 进行聚类, P 可以被分类成 N 个簇。聚类算法输出的数据格式为两个部分:

- 1) 簇心数据集 X .
- 2) 属于簇心 $X_k (k \in [1, N])$ 的簇的数据 $P_i (i \in [1, |P|])$

3.3 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。

3.3.1 基于熵方差的参数选择

3.3.1.1 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。

$$C = \arg \min_k (\|X_k - P_t\|_2), \quad X_C \in \mathbf{X} \quad (3.2)$$

\mathbf{X} 是簇心数据矢量集 (算法3.1)。 X_C 是离实时数据矢量 P_t 的欧几里得距离最近的簇心矢量。 X_k 是簇心数据矢量集 \mathbf{X} 的第 k 个簇心。通过欧几里得距离算法, 我们可以计算两个数据矢量之间的相似度。

3.3.1.2 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 轴加速度比当前测量数据中的大的数据矢量 ((式 (3.3))。

$$\mathbf{P}_a = \{P_i | a_{z,i} \geq a_{z,P_t}, \quad P_i \in \mathbf{P}_C\} \quad (3.3)$$

\mathbf{P}_C 是属于簇心为 X_C 的簇中的所有数据矢量, $a_{z,i}$ 是 P_i 的 Z 轴加速度分量的值, a_{z,P_t} 是实时数据矢量的 Z 轴加速度分量的值, \mathbf{P}_a 是所有用于回归的优势数据的数据矢量集合。

3.3.1.3 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, 目的是为了更好的分离数据 (式 (3.4)) 以引入熵的概念对数据做分析。

$$a_{new,i} = \begin{cases} \frac{a_{z,i}}{L_D} & a_{z,i} > 0 \\ \frac{a_{z,i}-L_D}{L_D} & a_{z,i} \leq 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

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

$$\mathbf{a}_{new} = [a_{new,1} \quad a_{new,2} \quad a_{new,3} \quad a_{new,4} \quad \dots \quad \dots] \quad (3.5)$$

- 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 ， $S_{i,j}$ 代表的是控制参数 i 在这一个数据集中第 j 可能的取值。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) 中， $p(a_{new,k})$ 是控制参数 i 的值等于其在这个数据集中第 j 个取值的所有情况中，Z 轴加速度的离散化加速度等于 $a_{new,k}$ 的占比比例。在式 (3.7) 中， $E_i^{(H)}$ 为控制参数 i 的所有取值情况下的加速度熵的均值，以及 N_i 为控制参数 i 的所有可能取值的数量。

$$H(S_{i,j}) = - \sum_{a_{new,k} \in a_{new}} p(a_{new,k}) \log_2 p(a_{new,k}) \quad (3.6)$$

$$Var_i = \frac{\sum_{N_i} (H(S_{i,j}) - E_i^{(H)})^2}{N_i} \quad (3.7)$$

- 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。

$$R_{Var_i} = \frac{Var_i}{\sum Var_i} \quad (3.8)$$

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。

3.3.2 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))

$$F_w(P_t) = W^T P_t, \quad W = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_m \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

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, 加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 \mathbf{P}_a 中的数据数量(即 \mathbf{P}_a 的维度减去控制参数的数量)。 \mathbf{Q} 是 P_i 中的最敏感参数的数据矢量。

$$D(W) = \frac{1}{2n} (\mathbf{F}_w(\mathbf{P}_a)^T - \mathbf{Q})^T (\mathbf{F}_w(\mathbf{P}_a)^T - \mathbf{Q}) \quad (3.10)$$

$$\mathbf{P}_a = \begin{bmatrix} P_{a,1} & P_{a,2} & \cdots & P_{a,n} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} Q_{a,1} & Q_{a,2} & \cdots & Q_{a,n} \end{bmatrix}^T \quad (3.12)$$

通过使误差函数 $D(w)$ 最小化来得到拟合度最好的系数序列 W , 根据梯度下降算法原理, 我们通过式(3.10)求导得到了式(3.13)。

$$\nabla_w D = \frac{1}{n} \mathbf{P}_a (\mathbf{F}_w(\mathbf{P}_a)^T - \mathbf{Q}) \quad (3.13)$$

- 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 \mathbf{P}_a 根据其对应的加速度采取加权操作(式(3.14, 3.15))。

$$\nabla_w D = \frac{1}{n} \mathbf{P}_a M (\mathbf{F}_w(\mathbf{P}_a)^T - \mathbf{Q}) \quad (3.14)$$

$$M = \begin{bmatrix} \frac{a_{z,1}}{L_s} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{a_{z,2}}{L_s} & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \frac{a_{z,n}}{L_s} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

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} 。通过将 W_{best} 代入式 (3.17)，我们可以求解得到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。

4.1 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。

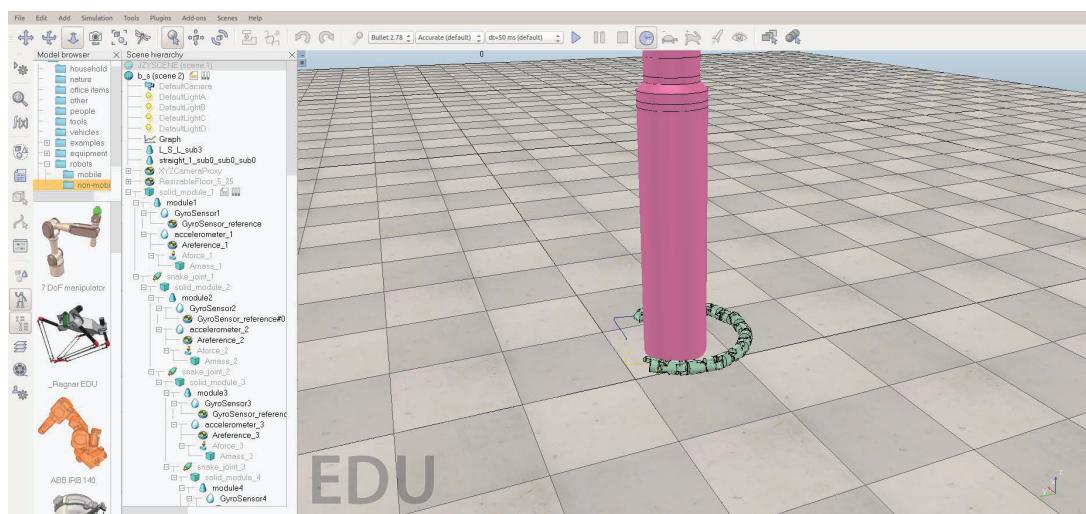


图 4-1 基于 V-REP 平台搭建仿真环境的例子

^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。目前 V-REP 已经广泛用于工厂自动化模拟、快速算法开发、机器人的相关教学、快速原型开发和验证、远程监控、安全复查等领域。图4-1是本文基于 V-REP 平台搭建的蛇形机器人的实验实例。

4.2 训练过程

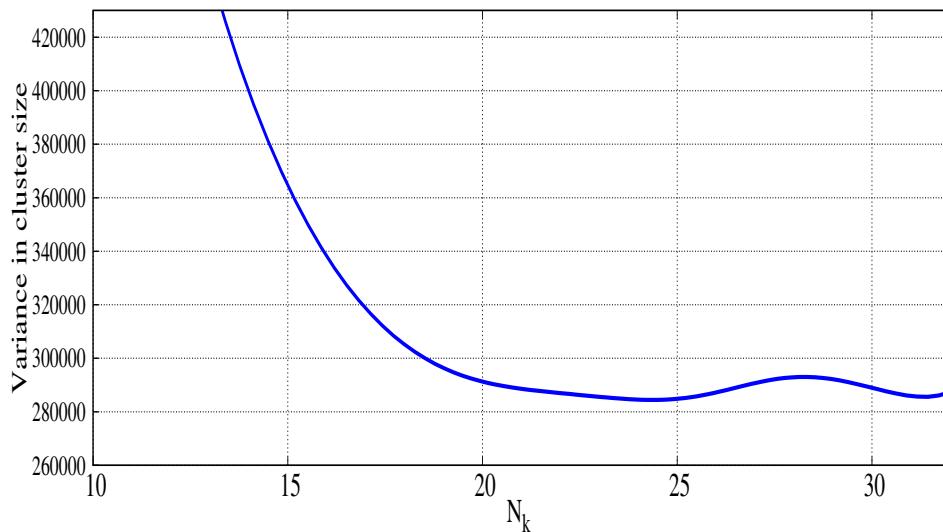
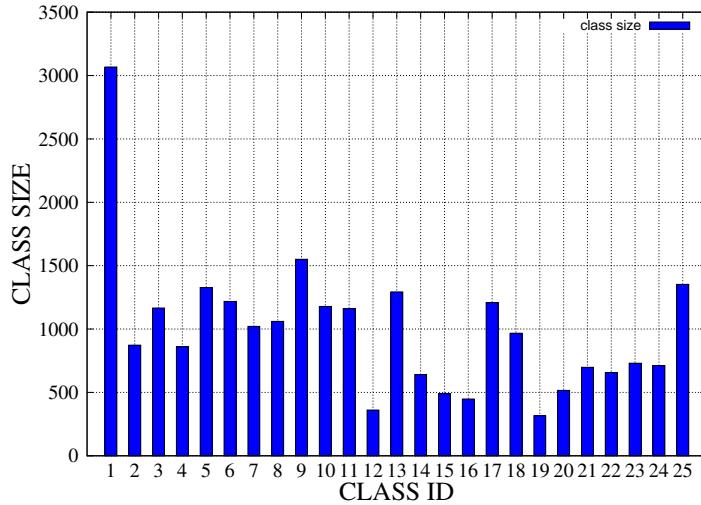


图 4-2 K-MEANS++ 中不同 N_k 取值时的簇方差

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。在数据预处理阶段, 使用 K-MEANS++ 算法对收集到的训练数据做聚类。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++ 算法进行聚类时确定 $N_k = 25$ 。最终 $N_k = 25$ 下的 K-MEANS++ 聚类结果如图4-3, 可以看到大多数簇的成员数量为 1000 ± 500 。

图 4-3 $N_k = 25$ 时使用 K-MEANS++ 聚类的结果

4.3 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加速度的变化。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

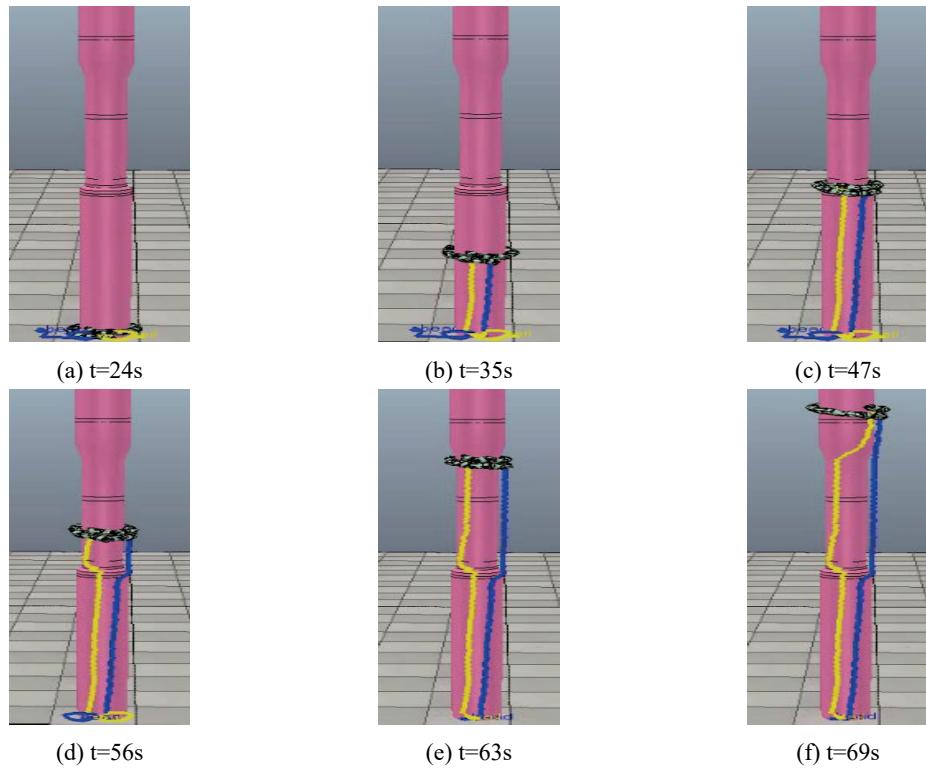


图 4-4 图 (a) 到 (f) 描述了蛇形机器人的攀爬过程。

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 轴加速度的值是接近于 0 的。从 24 s 到 45 s 的运动中，蛇形机器人在直径为 35 cm 的杆上进行攀爬运动。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 轴加速度会接近于 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4-5a, 4-5b 和 4-5c 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。蛇形机器人此时也是自动调整控制参数来顺利地继续向上的攀爬运动。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 轴加速度也是趋近于一个稳定的值。说明了我们的控制策略可以让蛇形机器人去自动调整自身的运动来适应变化的运动环境。

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。

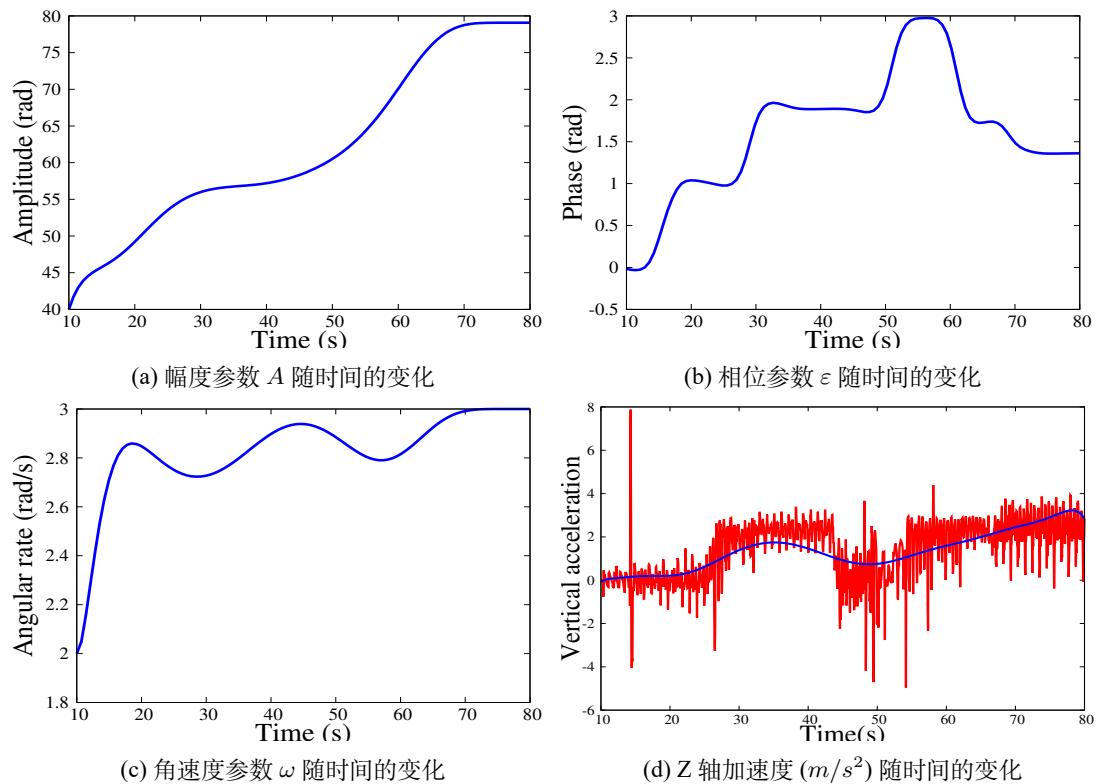


图 4-5 蛇形机器人在可变杆上运动的参数及加速度曲线图

4.4 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。

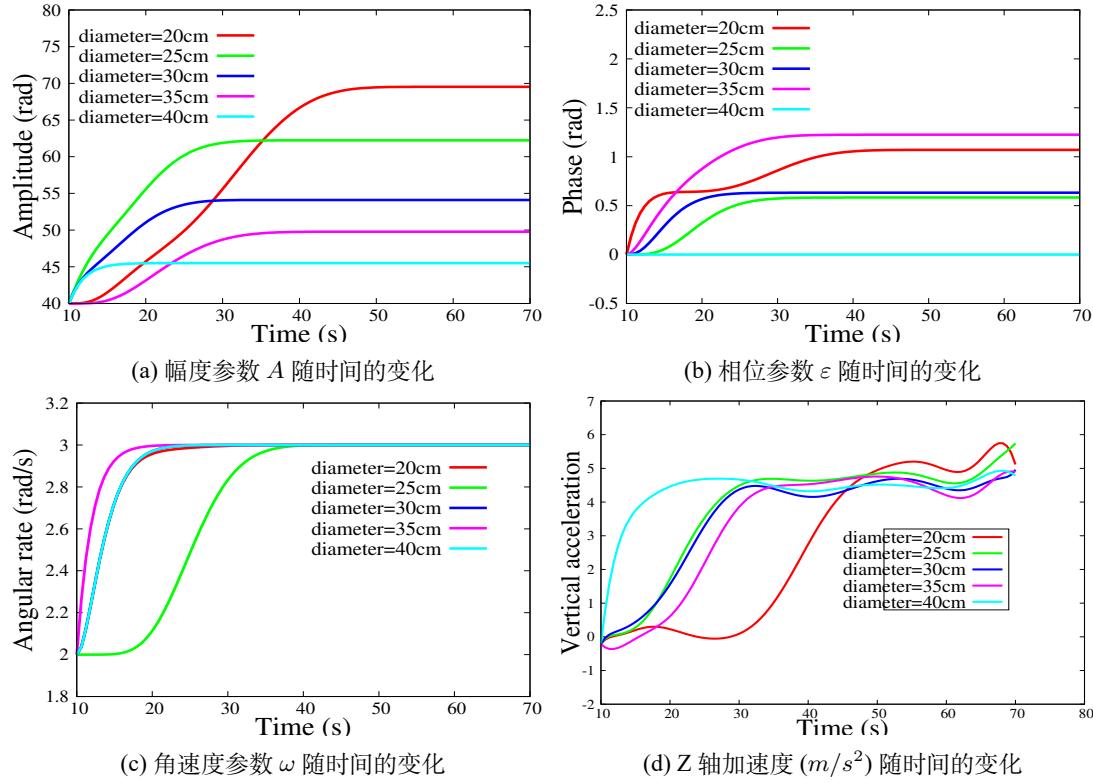


图 4-6 蛇形机器人在不同直径的杆上运动的参数及加速度曲线图

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4-6a, 4-6b）。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，机器人的运动加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加速度曲线的收敛速度，即机器人达到稳定加速度的耗时。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）。这表明了在不同环境中本文提出的控制策略都有一个稳定的表现。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。

4.5 算法效率

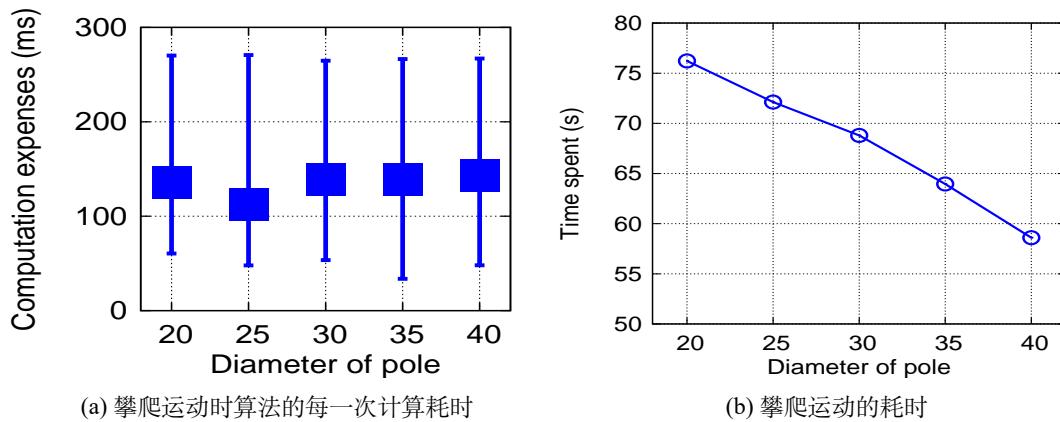


图 4-7 蛇形机器人在 5 米高的不同直径的杆时的算法的最差，最佳以及平均计算耗时和攀爬运动总时长

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4-7a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。

实验结果表明，通过本文提出的控制策略可以实现蛇形机器人的自适应运动。

第五章 总结与展望

5.1 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。首先本文介绍了国内外蛇形机器人自适应控制和自动化运动的研究现状，然后介绍了蛇形机器人常用的设计结构和运动步态。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，通过 V-REP 提供的应用程序接口将本文算法运用在蛇形机器人的运动上。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来挑选最敏感控制参数，从而实现将一个多元回归分析问题转换为一个一元回归分析问题。实验结果表明本文提出方案是有效的，并且取得较好的效果。

本文的研究内容和研究成果如下：

- 利用在蛇形机器人的关节模块上集成角度传感器，加速度计，陀螺仪等实时获取蛇形机器人的运动姿态，收集必要的实验数据，保证了算法的及时性。
- 通过使用 k-means++ 聚类算法对训练数据进行聚类，在运行时算法时实现了一定程度上减少了回归分析的数据量，优化了算法的计算效率。
- 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，因此在回归分析部分实现了多元回归分析简化成一元回归分析。
- 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。从实验结果中可以证明本文提出的蛇形机器人快速自适应爬杆运动的算法是正确有效的。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。

5.2 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，如无人驾驶车辆的自适应运动，蛇形机器人在粗糙地面的运动和模拟 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：

- 1) 本文实现的自适应控制算法未能运用在真实蛇形机器人上。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。
- 2) 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。
- 3) 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文提出的算法控制下顺利运动，但是对于有纵向向下运动趋势的运动蛇形机器人无法顺利进行。这是之后算法改进需要考虑的一点。
- 4) 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，来让蛇形机器人可以在更多更复杂的环境中实现自适应的运动。

本次蛇形机器人的自适应运动控制方法是一次成功的尝试，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。

参考文献：

- [1] CHIRIKJIAN G S, BURDICK J W. The kinematics of hyper-redundant robot locomotion[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1995, 11(6) : 781 – 793.
- [2] LILJEB, CK P, PETTERSEN K Y, et al. Snake Robots: Modelling, Mechatronics, and Control[C] // . 2013.
- [3] ROLLINSON D, CHOSET H. Gait-based compliant control for snake robots[C/OL] // 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2013 : 5138 – 5143.
<http://dx.doi.org/10.1109/ICRA.2013.6631311>.
- [4] KUWADA A, WAKIMOTO S, SUZUMORI K, et al. Automatic Pipe Negotiation Control for snake-like robot[J], 2008.
- [5] VITIELLO A, ACAMPORA G, STAFFA M, et al. A neuro-fuzzy-Bayesian approach for the adaptive control of robot proxemics behavior[C/OL] // 2017 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE). 2017 : 1 – 6.
<http://dx.doi.org/10.1109/FUZZ-IEEE.2017.8015647>.
- [6] NACHSTEDT T, WORGOTTER F, MANOONPONG P, et al. Adaptive neural oscillators with synaptic plasticity for locomotion control of a snake-like robot with screw-drive mechanism[C] // IEEE International Conference on Robotics & Automation. 2013.
- [7] TANG C, MA S, LI B, et al. A self-tuning multi-phase CPG enabling the snake robot to adapt to environments[C/OL] // 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2011 : 1869 – 1874.
<http://dx.doi.org/10.1109/IROS.2011.6094718>.
- [8] WU X, MA S. Autonomous collision-free behavior of a snake-like robot[C] // IEEE International Conference on Robotics & Biomimetics. 2010.
- [9] WU X, MA S. Sensor-driven neural controller for self-adaptive collision-free behavior of a snake-like robot[C] // IEEE International Conference on Robotics & Automation. 2011.
- [10] G. C, RANGANATHAN H. Balancing and control of dual wheel swarm robots by using sensors and port forwarding router[C/OL] // 2017 Third International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics (AEEICB). 2017 : 532 – 536.
<http://dx.doi.org/10.1109/AEEICB.2017.7972371>.
- [11] GERBONI G, DIODATO A, CIUTI G, et al. Feedback Control of Soft Robot Actuators via Commercial Flex Bend Sensors[J/OL]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(4) : 1881 – 1888.
<http://dx.doi.org/10.1109/TMECH.2017.2699677>.
- [12] IJSPEERT A J. Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: a review[J]. Neural networks, 2008, 21(4) : 642 – 653.
- [13] ENDO G, TOGAWA K, HIROSE S. Study on Self-Contained and Terrain Adaptive Active Cord Mechanism[J]. Jrsj, 1999, 18(3) : 419 – 425.

- [14] PRAUTSCH P, MITA T. Control and analysis of the gait of snake robots[C] // IEEE International Conference on Control Applications. 1999.
- [15] OHNO H, HIROSE S. Design of slim slime robot and its gait of locomotion[C/OL] // Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the Next Millennium (Cat. No.01CH37180) : Vol 2. 2001 : 707–715 vol.2.
<http://dx.doi.org/10.1109/IROS.2001.976252>.
- [16] TESCH M, LIPKIN K, BROWN I, et al. Parameterized and Scripted Gaits for Modular Snake Robots[J], 2009, 23 : 1131–1158.
- [17] ENNER F, ROLLINSON D, CHOSET H. Motion estimation of snake robots in straight pipes[C] // IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2013 : 5168–5173.
- [18] WIDODO A, BUDI I. Clustering patent document in the field of ICT (Information amp; Communication Technology)[C/OL] // 2011 International Conference on Semantic Technology and Information Retrieval. 2011 : 203–208.
<http://dx.doi.org/10.1109/STAIR.2011.5995789>.
- [19] DUNDAR M, KOU Q, ZHANG B, et al. Simplicity of Kmeans Versus Deepness of Deep Learning: A Case of Unsupervised Feature Learning with Limited Data[C/OL] // 2015 IEEE 14th International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA). 2015 : 883–888.
<http://dx.doi.org/10.1109/ICMLA.2015.78>.

致谢

四年的大学时光真的在不经意间悄然就到尽头了，一段美妙难忘的本科大学生活即将画上句号。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。黄凯老师在我看来在科研上是一个科学严谨，一丝不苟的学者。在私底下是一个幽默风趣，平易近人的前辈。在学习上，他耐心地，严谨地指导我的科研项目，指出我的不足，解答我的疑问。在生活中，老师也无时无刻不在关心着我们的学习和生活。从黄凯老师身上我学会了许多，也收获了许多。

其次我想对我的父母亲人说一声谢谢，他们是我最坚实的后盾，没有他们的督促我可能在学业这条路上走不了这么远，没有他们的支持我可能无法在很多事情上勇敢地做出决定。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！”

最后我还要感谢下陪伴我渡过大学时光同学挚友们，我们在学业生活中互相砥砺前行，互相扶持，感谢你们，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。还要感谢一直和我联系的小学，初中，高中同学，感谢你们一直的陪伴，给予我深刻和真诚的友谊，望日后我们都能够活出自己，拥抱未来。

简智勇

2019年4月16日

毕业论文(设计)成绩评定记录
Grading Sheet of the Graduation Thesis (Design)

指导教师评语

Comments of Supervisor:

某某同学针对什么问题研究了什么算法/实现了什么系统/针对这个系统做了什么测试,本文选题合理,实验结果表明技术路线……论文写作规范,引用文献充分,符合中山大学本科论文的规范,是篇优秀/良好/中等/合格的论文。

成绩评定

Grade:

指导教师签名

Supervisor Signature:

Date:

答辩小组或专业负责人意见

Comments of the Defense Committee:

成绩评定

Grade:

签名:

Date:

Signatures of Committee Members

院系负责人意见

Comments of the Academic Chief of School:

成绩评定

Grade:

签名

Signature:

院系盖章

Stamp:

Date: