

基于自生长的 CPG 局部网络研究

硕士学位论文基于自生长的 CPG 局部网络研究

RESEARCH ON SELF-GROWN BASEDCPG LOCAL NETWORK

李爱镇 哈尔滨工业大学 2012 年 7 月

哈尔滨工业大学硕士学位论文

国内图书分类号:TP242.6 学校代码:10213

国际图书分类号:621.38 密级:公开

工学硕士学位论文基于自生长的 CPG 局部网络研究
生:李爱镇

导师:李满天副教授

申请学位:工学硕士

学科:机械电子工程

所在单位:机电工程学院

答辩日期:2012 年 7 月

授予学位单位:哈尔滨工业大学

哈尔滨工业大学硕士学位论文

Classified Index: TP242.6

U.D.C: 621.38Dissertation for the Master Degree in Engineering

RESEARCH ON SELF-GROWN BASED CPG

LOCAL NETWORK

Candidate : Li Aizhen

Supervisor : Associate of Prof. Li Mantian

Academic Degree Applied for : Master of Engineering

Mechatronics Engineering

Speciality :

School of Mechatronics Engineering

Affiliation :

July, 2012

Date of Defence :

Degree-Conferring-Institution : Harbin Institute of Technology 哈
尔滨工业大学硕士学位论文

摘要

随着科技发展和相关学科的不断完善, 机器人研究
具有了更广泛的技术

手段, 区别与传统的设计理念, 通过观察、学习、模
仿生物体与环境的交互

行为的仿生学方法来复制和再创造生物的形态、功
能以及控制机制为机器人

研究带来了新思路。多年以来, 模仿和复制生物结
构给机器人研究领域带来

了巨大成功; 同时, 随着神经生物学和仿生机理研

究的不断深入，基于 CPG

网络的仿生控制方法逐渐成为足式机器人研究的热门课题。其中，CPG 网络

的拓扑结构、步态生成方法是研究者共同关注的焦点。目前，在 CPG 网络结

构的形成原理、形成过程等方面的研究尚处于理论初始阶段，而这恰是构造

CPG 网络的基础，因此在该方面开展研究具有重要意义。

本课题在生物神经网络生长发育的相关研究的基础上，进行了 CPG 局部

网络自生长方法的研究。

首先，分析神经元在生物大脑内的分布规律、分布密度等特性，利用概

率统计方法，研究了神经元在有限区域内的分布特性与规律，在此基础上，

建立了在有限区域内多神经元分布的拓扑结构，为 CPG 局部网络自生长提供

基础。

其次，通过分析神经元经自身发育、轴突生长而形成局部神经网络的生

物学机理，获得了神经元极性建立和轴突生长的简

化方法；通过研究引力场

约束下多神经元轴突生长的特点，研究了平面内多神经元轴突生长的规则和

相应的数学处理方法；通过分析大量的网络生长实验结果，获得了从神经元

连接长度到其相互间相位关系的映射函数；

最后，根据前文所设计的网络生长算法，针对两种常见的步态进行了的

网络自生长实验，分别获得了与这两类步态相对应的相位关系，实验验证了

本文所设计的基于引力场约束的网络自生长算法的有效性；利用开源动力学

引擎(Open Dynamic Engine ,ODE)，在 codeblocks 开发环境内建立四足机

器人运动控制仿真平台，建立四足机器人节律运动控制子系统，进行节律步

行实验，实现了基于自生长网络的四足机器人节律步行。

关键词：网络自生长；四足机器人；节律步态；运动控制；ODE

I.

哈尔滨工业大学硕士学位论文

Abstract

With the development of technology and related disciplines, researches on robot have gotten a wider range of technical methods. Different from the traditional design concepts, the bionics method of copying and recreating the form, function and control mechanisms of real animals through observing, learning and imitating the animals' behavior of interacting with their living environment have brought new ideas to research on robot. Over the years, imitation and replication of biological structure has brought great success to the field of robotic research. And also, with the deepening of neurobiology and bionic mechanism, biomimetic control method based on CPG network is becoming the hot topic of the foot robot. In the research field of CPG network based control method, the topology and gait generation method of CPG network

is the focus of common concern. The theory and process of structure formation is

the bases of constructing CPG network, and it's on the starting stage, research in

this field has important significance. In this paper, the research is based on development of biological neural

networks, and study the method of constructing CPG local network. Firstly, statistic features and density of neurons distributed in the brain were

analyzed. The statistics laws of multiple neurons distributed randomly in a

limited square field with equal probability were studied. The basic environment

for the development of multi-neuron network was build. Secondly, the biological mechanisms of neuronal development, axonal

growth and formation of local neural network were analyzed. The simplified

models of neurite initiation and differentiation, neurite elongation, axon path

finding were build. By studying neuron axon growth features under the

constraints of the gravitational field, the rules and mathematical

treatment of

multi-neuron axon growth in the plane were study. By analyzing results of a large

number of network growth experiments, the mapping function between the

connected length of the neurons and their mutual phase relationship was

obtained. Finally, according to the network growth method designed before, the

network self-growth experiments were implemented and got the phase relationship corresponding to two common gait respectively. The experiments

verified the effectiveness of the network self-growth algorithm designed based

on the gravitational-field constraints. By the use of Open Dynamics

II.

哈尔滨工业大学硕士学位论文

EngineODE, the quadruped robot motion control simulation platform was builded to complement the robot rhythmic walking. By integrating the method of

network growth and leg motion controller, the quadruped robot rhythm motion

control subsystem was buildThe experiment achieved rhythm walk of
quadruped robot based on self-growth network

keywords: network growth; quadruped robot; rhythm gait; motion
control;

ODE

III.

哈尔滨工业大学硕士学位论文

目录

摘要 I

Abstract. II

第 1 章 绪论 - 1 -

1.1 课题来源及背景. - 1 -

1.1.1 课题来源- 1 -

1.1.2 课题背景- 1 -

1.2 国内外研究现状. - 2 -

1.2.1 基于 CPG 网络运动控制的研究现状 - 2 -

1.2.2 神经元发育数值模拟的研究现状- 5 -

1.3 本课题研究内容. - 6 -

第 2 章有限平面区域内多神经元分布特性的研究. -8

-

2.1 引言- 8 -

2.2 相关生物学基础介绍- 8 -

2.3 基于概率统计的神经元随机分布研究- 9 -

2.3.1 对有限区域内多个神经元随机分布的统计分析

- 9 -

2.3.2 在不同大小区域内给定神经元数目的随机分布
统计分析. - 14 -

2.4 平面区域内神经元的排布. - 16 -

2.5 本章小结. - 17 -

第3章基于引力场约束的神经网络生长方法研究- 19

-

3.1 引言 - 19 -

3.2 神经网络发育的相关机理分析 - 19 -

3.2.1 神经元的极性建立- 19 -

3.2.2 神经元轴突的延伸与寻路 - 20 -

3.3 基于引力场约束的神经网络生长方法研究- 22 -

3.3.1 基于等概率分布的神经元极性建立- 22 -

3.3.2 基于引力场约束的平面内轴突生长- 23 -

3.4 多神经元网络生长方法研究. - 25 -

3.4.1 神经元平面内生长的规则 - 26 -

3.4.2 多神经元网络生长流程. - 27 -

3.4.3 神经网络的后处理. - 30 -

I.

哈尔滨工业大学硕士学位论文

3.5 多神经网络生长仿真- 33 -	
3.5.1 生长仿真环境. - 33 -	
3.5.2 神经元连接关系与电活动相位差的映射关系-	
34 -	
3.6 本章小结. - 37 -	
第 4 章 网络自生长及其运动控制仿真实验研究 - 38 -	
4.1 引言 - 38 -	
4.2 CPG 局部网络自生长实验及结果分析. - 38 -	
4.3 基于 ODE 的四足机器人仿真运动系统研究 - 41 -	
4.3.1 虚拟样机搭建. - 41 -	
4.3.2 四足机器人节律运动控制子系统 - 43 -	
4.4 四足机器人节律运动仿真实验 - 44 -	
4.5 本章小结. - 46 -	
结论- 47 -	
参考文献. - 49 -	
攻读学位期间发表的学术论文- 52 -	
哈尔滨工业大学学位论文原创性声明及使用授权说	
明. - 53 -	
致 谢- 54 -	
II.	
哈尔滨工业大学硕士学位论文	
第 1 章 绪论	

1.1 课题来源 及背景

1.1.1 课题来源

本课题来源于国家自然科学基金“基于自生长 CPG 网络的足式机器人运

动控制研究”(61175107)，旨在解决 CPG 局部网络自生长方法及其在四足机器人上的应用问题。

1.1.2 课题背景

随着科技的发展和社会的进步，机器人已经在日常的服务（如舞蹈机器人）和工业领域（如自动化机器人）中得到了广泛的应用。这些机器人均是

在结构化的、相对确定的环境中工作，且运动形式相对固定。相对于轮式、履带式机器人来说，具有仿生结构的足式机器人在

复杂的非连续地形上表现
[1]
出其独有的灵活稳定的特点。虽然现今足式机器人在复杂环境下的运动控制研究取得了长足的进展，但是在运动灵活性、对非结构环境的适应性方面还远远比不上真实的动物。足式机器人的在非结

[1]

出其独有的灵活稳定的特点。虽然现今足式机器人在复杂环境下的运动控

[2-3]

制研究取得了长足的进展，但是在运动灵活性、对非结构环境的适应性方

面还远远比不上真实的动物。足式机器人的在非结

构环境下的自治行为始终

是机器人研究的热点问题和主流方向。国内在该领域的研究起步较晚，且普

遍停留在简单的静态步行阶段，对复杂极端地形下的足式机器人自治行为研

究涉及尚浅，进行该方面研究对机器人运动控制的发展具有重要意义。

[4-5]

长时期以来，仿生机理在机器人领域的应用更多地体现在“形似”上。

学习和模仿生物长期进化而来的、对特殊环境有优越适应性的形体构造确实

给机器人的研究带来了丰硕的成果，但是生物拥有对未知易变环境应付自如

的能力，却是来自于其神经系统对肢体的精确控制，因此针对生物神经机理

的仿生研究才能从本质上解决仿生机器人如何在复杂多变环境下具有高度自

治行为的难题。

随着医学和神经生物学研究的深入，生物运动控制神经网络的内部机理

[6]

正逐渐显露出来。大量动物实验结论表明，在缺乏大脑下行信号控制时，

脊髓内神经环路具有完全控制肢体正常的节律动作、接收外部环境信息而产

生适应性复杂行为的能力。模拟生物节律行为进行运动控制为仿生机器人研

究的提供了新的思路。目前医学界将这一类型的脊髓神经环路称为中枢模式

- 1 -.

哈尔滨工业大学硕士学位论文

发生器 (Central Pattern Generators, CPG)。近十年来，基于中枢模式发生器

[7-8]

的节律运动控制方法在仿生机器人领域得到了长足的发展，但是已有的

CPG 网络应用多是基于成熟的、结构固定的 CPG 耦合网络，生成固定的运

动控制方案，实现机器人的简单节律运动控制，完全没有发挥出生物体内神

经网络在复杂运动控制方面的能力。本课题将从神经网络的发育机理入手，

探究形式复杂的神经网络的形成过程，致力于模仿

神经元群从离散的初始状

态逐步形成成熟的、具有特定节律运动控制能力的复杂网络的过程，尝试自

底向上地构建自生长的 CPG 运动控制网络，为足式机器人在复杂环境下自治

行为的研究奠定基础。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 基于 CPG 网络运动控制的研究现状

[9-10]

20 世纪初出现了对生物节律行为神经机制的辩论，到 80 年代已有

[6]

大量生物实验证明节律行为由 CPG 网络控制。直到 1985 年日本人 Matsuka

[11-12]

提出利用多神经元的互抑机制产生稳定振荡的数学模型，CPG 才真正进

入了工程应用领域。Matsuka 的 CPG 模型是基于神经元具有动作电位过冲反

弹的电特性，在神经元一般模型中引入自抑制项，使互连的神经元在缺乏外

部传入信号时仍能通过内部互抑连接产生稳定的周

期性振荡，利用互抑神经

元的拮抗特点分别控制仿生机构的屈、伸驱动器。

自此，利用神经振荡信号

控制节律运动的思想获得了广泛的应用。这种仿生控制方法具有许多有别于

其他仿生控制方法的优点：结构简单；不需要中枢控制的命令就可以自行产

生稳定的周期性振荡，并直接控制相应肢体的节律性运动；能够接受局部刺

激，产生针对个别情况的适应性输出而不改变其周期性和稳定性；能够有选

择地使刺激在整个网络中传导，而使得机体能及时做整体调整；能任意调整

振荡信号的振幅、频率和相位，保证调整过程的输出平滑，实现步态的转换。

日本学者 Kimura 在提出动态稳定行走的必需条件的基础上，通过建立

生物神经系统模型，初步实现了四足机器人 Tekken 在非平坦路面上以中等速

度行走，见图 1-1。Fukuoka 等人使用 4 个 CPG 振子构造节律信号发生网络，

产生髋关节的前后摆动作，膝关节采用在支撑相时

保持角度、在摆动相则实

时控制转角使足端到髋关节的高度不变。他们使用的 CPG 振荡器来自于

Matsuka 所提出的双互抑神经元模型，并将躯干倾翻角、足端接触反射耦合

到 CPG 网络中，构建针对不同生物反射信息的专家系统，使其获得对一定非

- 2 -

哈尔滨工业大学硕士学位论文

[13-14]

规则障碍的辨识和跨越能力。

[13]

图 1-1 Tekken 机器人及其 CPG 控制网络

瑞士苏黎世联邦理工学院的 A. J. Ijspeert 等人在《科学》杂志上发表论

[15]

文，展示了其可从游泳转换到爬行状态的 Salamander 机器人，见图 1-2。

Salamander 机器人使用相位振荡器作为 CPG 模型，躯干和四肢的运动分别由

链式和环形 CPG 网络控制；利用两组控制网络的频率响应差异抑制四肢运动

使其进入躯干波浪式摆动的游泳状态，或使控制四肢的CPG输出低频率大振幅

信号覆盖躯干的摆动使其进入到步行状态；从游泳到爬行的状态切换和方

向改变则通过改变高层指令控制。

[15]

图 1-2 Salamander 机器人

瑞士洛桑理工学院的 Simon Rutishauser 等人基于轻、快、稳的目的，依

[16]

据 PuppyII 机器人设计了四足猎豹机器人，“Cheetah”，如图 1-3。每条腿

上有三个自由度，其中髋关节、膝关节为电机驱动，踝关节采用带有弹性单

元的被动自由度，可以吸收并存储冲击能量，使其可以在非平坦环境下有更

好的适应性和更低的能量消耗。作者使用 4 个 Hopf 振子构建两两相互作用

的 CPG 网络生成控制髋关节运动的关节轨迹发生器，并利用步态矩阵描述

CPG 单元间连接有无和方向，通过改变连接矩阵来实现不同步态的转换。

[16]

图 1-3 洛桑理工学院 Chedtah 机器人

[17]

2004 年，清华大学张秀丽等人在改进 Matsuoka 和 Kimura 的 CPG 模

型基础上，引入步态矩阵定义 CPG 网络与不同步态的映射关系；定义反射信

息阵和反射系数向量，用于 CPG 与环境信息的交互；采用仿真实验的方法研

究 CPG 模型特性，并从仿真数据中总结 CPG 网络的参数整定方法；并模拟

哺乳动物的肢干运动模式，建立膝关节-髁关节间的动作轨迹映射函数。该样

机能够以每秒 $1/4 \sim 1/2$ 身长的速度运动，并具有完成 10° 上下坡、跨越相当

于腿长 13.3% 的障碍的能力，见图 1-4。

[17]

图 1-4 张秀丽等人研制的 CPG 控制四足机器人

[18]

沈阳自动化所的卢振利等人利用 Matsuka 的 CPG 模型，

采用循环抑

制的 CPG 环的方式构建运动神经网络系统控制其蛇形机器人。他们采用数值

仿真试凑法调整单个 CPG 参数，并提出一种通过调整 CPG 自激权重系数来

获得相连关节相位转换的蛇形蜿蜒运动方法，使蛇形机器人能够在预先规划

的模式下蜿蜒爬行，见图 1-5。

[18]

图 1-5 沈阳自动化所蛇形机器人

以上基于人工 CPG 网络的运动控制方法则借用节律行为为神经网络的概

念，通过模仿节律运动的模式简化了运动控制系统的设计过程，部分机器人

在复杂环境中能表现出一定的适应能力，但是普遍存在一个问题：未能深入

分析生物神经网络的发育形成方式，多从工程应用的意义上构造结构类型

单一的 CPG 网络，导致步态模式单一。

- 4 -

哈尔滨工业大学硕士学位论文

1.2.2 神经元发育数值模拟的研究现状

神经科学上，尽管关于神经元电信号的产生、传递以及复杂神经网络拓

扑结构与特定神经功能之间关系等方面的研究占大部分，但在神经元如何通

过生长发育形成精细网络结构的过程方面的研究也显得同样重要。计算神经

生物学上已经在神经元极性建立、轴突伸长、轴突寻路等方面进行了一系列

利用数值方法模拟的研究。

[19-20]

Hentschel 等人认为神经元突起利用细胞表面化学物质的不完全均匀分布，并通过由此激发的正反馈作用使得某突起能以更快的速度成长。他

们利用一组相耦合的常微分方程组描述了化学物质在细胞体内和突起端部的

分布浓度和扩散速率与突起的长度以及细胞膜的电势、突起的生长速率等之

间的关系。其中最关键之处在于各个突起不同的初始状态，当某突起初始设

定的生长速率略大于其他突起时，它就会更快地消耗完突起顶端区域的化学

物质，随后将吸引并获得更多的促生长因子，以这

种正反馈的方式，使其能

够在达到最大生长速率的同时起到压制其他突起生长的效果。神经元极性建

立及其数值模拟过程见图 1-6。利用类似竞争关系进行神经元极性建立在其

[21]

他偏微分方程模型中也有体现。a 生物神经元极性建立过程 b 神经元极性建立的数值模拟

图 1-6 神经元极性建立

[22-23]

对于神经元轴突的延长，Mclean 等人在归纳已有模型的基础上，使

用一系列偏微分方程描述了无分叉轴突顶端附近的微管蛋白浓度与轴突伸长

的关系，模拟了包括生长锥表面伪足的伸缩、微管蛋白流动、细胞骨架装配

等生物神经元轴突的生长过程，见图 1-7。该模型中微管蛋白在主动运输作

用和扩散作用共同影响下向顶端移动并装配使轴突延长，同时又以一定速率

解聚在同样的作用下返回细胞体，利用装配和解聚的速率差表示轴突延伸的

速率。该速率与细胞体制造和主动运输微管蛋白的能力直接相关，又受轴突

的长度限制，因为在传输和扩散的过程中有一定的降解速率，轴突过长时延

长的速率甚至为零，此时轴突达到最大长度。

- 5 -

哈尔滨工业大学硕士学位论文

[23]

图 1-7 轴突 延伸的数值模拟示意图

生长中的神经元轴突的基本能力之一是感受环境中生长方向约束因子，

向吸引作用方向或背离抑制作用的方向生长。在这方面的数值模拟研究主要

在化学导向因子浓度分布、轴突顶端感受化学分子浓度、轴突的转向、轴突

成束协同作用等方面展开。计算生物神经科学研究人员提出了一系列数学模

型，以靶细胞为发出化学导向分子的点源，导向分子以相同速率向各方向扩

散，并在周围形成稳定的梯度分布浓度；将这些化学分子的扩散规律描述为

抛物型偏微分方程形式，由其浓度梯度决定轴突的

生长方向。靶细胞对轴突

生长方向的抑制或吸引作用见图 1-8。左图中,表示化学分子的分布浓度,

看出不同位置点吸引作用的差异;右图显示轴突生长受沿正梯度方向的吸引

[24]

力导向。

[24]

图 1-8 化学导向分子浓度与轴突生长

从以上分析可见,在神经元的极性建立、轴突的延伸和方向引导的数值

模拟方面都已有大量研究,这些数学模型都是建立在生物神经元发育的实验

研究的已有结果上,尽可能详细地描述和模拟神经元发育的动力学过程,但

由于其微分方程组解的复杂性,可能导致系统的不稳定,特别是在利用多个

神经元模拟神经网络的构建,相互的作用将使得系统解的情况更复杂。

1.3 本课题研究内容

针对以上问题,本课题将从生物神经网络的生长发育入手,分析并简化

生物神经元构建神经网络的方式，建立局部神经网络生长模型，以达到通过

- 6 -

哈尔滨工业大学硕士学位论文

自生长方法获得节律步态控制网络的目标。主要研究内容如下：

(1) 利用神经元在生物大脑内的分布规律、分布密度等统计规律，进行

大量重复性实验，分析多个神经元在方形有限区域内的分布特性和规律；建

立在有限区域内多神经元分布的拓扑结构。

(2) 分析单个神经元极性建立、神经元轴突延伸的生物机理，总结多神

经元发育成为局部神经网络的基本方式和这过程中所需的因素；结合随

机分布理论和万有引力思想，建立基于引力场约束的二维平面内多神经元网

络生长模型；研究多神经元在有限区域内进行网络自生长的算法；研究自生

长方法获得的神经网络的连接形式，建立神经元连接与步态的映射关系；

(3) 进行神经网络生长实验，分析实验结果，改进神

神经网络自生长算法，

修正神经元连接与步态的映射函数；搭建四足机器人运动控制平台，建立四

足机器人运动控制系统，进行四足机器人节律运动控制仿真实验。

- 7 -

哈尔滨工业大学硕士学位论文

第2章 有限平面区域内多神经元分布特性的研究

2.1 引言

生物学研究表明，动物的节律行走并不完全依赖于大脑，而是主要由能

够自发产生周期性节律振荡的局部神经网络控制。

该神经网络位于脊椎的某

些节段内，能够对外输出多组与各肢干协调运动相关的节律信号。本章将分

析多个神经元在神经网络内的排布特点，大量进行多神经元等概率随机散布

到有限区域内的实验，分析各神经元之间直线距离的统计规律，以获得在给

定区域内列布多个神经元合理方法。

2.2 相关生物学基础介绍

[25]

Bjaalie 等人对猫大脑视皮层神经元分布的实验研究表明, 神经元在大

脑皮层不同区域的分布密度有较大差异, 密度跨度可以达到为 50~300 个

2

/mm。在该实验中, 还说明了即使对于同种动物的同一脑区, 神经元的分布

2

密度也可能有较大差别, 最大密度差可达 100 个/mm。神经元的分布在任何

局部区域表现为很强的随机性, 其分布可能是密集或稀疏的, 如图 2-1 所示,

图中的空洞为其实验设备固定大脑组织所致。

[25]

图 2-1 实验用猫某脑区神经元分布图

[26]

Kalanithi 等人对人类大脑切片的染色实验表明, 对应于不同神经功能

的脑区, 神经元可能以稀疏散布的形式连接宽泛的脑区或以多个神经元近距

离地组成一个局部网络(如图 2.2 D 中箭头所指)的形式, 分别实现各自的

特殊功能。如图 2-2 所示,A、B、C 部分的神经元呈随机、稀疏的方式散布,

而 D 部分中,中间的某个局部明显由多个神经元组成了一个环状结构。

- 8 -

哈尔滨工业大学硕士学位论文

[26]

图 2-2 染色大脑切片中神经元散布图

以上分析表明,在生物神经系统中,神经元的分布密度在不同脑区或同

种动物身上的都有较大差异,神经元的分布为随机分布,而且神经元以分散

或小团簇的形式在各自网络中实现不同的功能。

2.3 基于概率统计的神经元随机分布研究

由于神经元分布具有随机性,为了获得在有限区域内随机分布的神经元

之间距离的统计规律,本节将进行多神经元等概率随机散布到有限区域内的

实验,并分析大量重复实验的统计结果,总结共性,作为后续神经网络生

长的基础。

对于本小节中所使用的距离、面积,1单位分别表示2um和4um。

2.3.1 对有限区域内多个神经元随机分布的统计分析

为了确定在某一给定正方形区域S内等概率地随机散布多个神经元时,

神经元数目对神经元间直线距离的变化特点的影响,需要分别统计在不同神

经元数目下神经元间距离和平均距离的分布情况。

设在某一正方形区域S内分布着k个神经元,则共有M条边,即有M

$k(k-1)$

个距离:

$k(k-1)/2$

$k(k-1)/2$

$k(k-1)/2$

$k(k-1)/2$

$k(k-1)/2$

$k(k-1)/2$

若这M个距离分别为 $r_1, r_2, r_3, \dots, r_M$,则神经元间的平均距离 \bar{r}

$\bar{r} = \frac{r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_M}{M}$

为:

M

k

rj

j ?1

r 2-2

www.docin.com