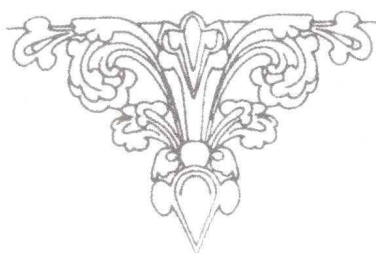


国家高技术研究发展计划（863计划）资助项目



**Biologically-Inspired Motion Control Theory
and Its Application for a Legged-Robot**

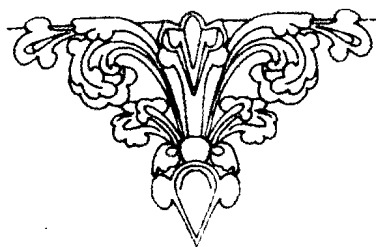
足式机器人 生物控制方法与应用

郑浩峻 张秀丽 等 著

Zheng Haojun Zhang Xiuli et. al

清华大学出版社

国家高技术研究发展计划（863计划）资助项目



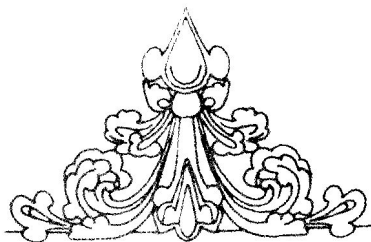
**Biologically-Inspired Motion Control Theory
and Its Application for a Legged-Robot**

足式机器人 生物控制方法与应用

郑浩峻 张秀丽 等 著

Zheng Haojun Zhang xiuli et. al

清华大学出版社
北京



作者简介



郑浩峻 男, 1970年出生于黑龙江省。工学博士, 清华大学精密仪器与机械学系副研究员。

1993年毕业于清华大学精密仪器与机械学系; 1996年和2000年在清华大学精密仪器与机械学系分别获得工学硕士和工学博士学位, 随后留校任教; 2006-2007年在美国密歇根大学担任访问学者。

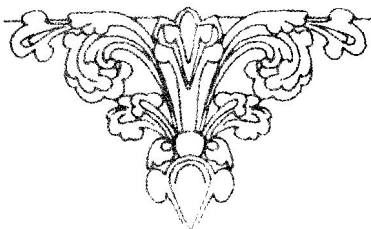
主要研究方向为机器人技术与生物医学工程, 已在国内外学术期刊和学术会议上发表论文70余篇(其中EI收录26篇, SCI收录6篇), 获得中国发明专利6项, 实用新型专利1项; 主持完成国家自然科学基金课题1项, 参与完成国家自然科学基金课题3项, 主持完成国家高技术研究发展计划(863计划)课题1项, 参与完成“863计划”课题2项和国家重点基础研究计划(973计划)课题1项。



张秀丽 女, 1975年出生于河南省。工学博士, 北京交通大学副教授。

1997年毕业于郑州大学, 2000年在郑州大学获得工学硕士学位; 2004年在清华大学精密仪器与机械学系获得工学博士学位; 2005-2006年在香港科技大学从事博士后研究; 2007年开始在北京交通大学工作。

主要研究方向是生物与仿生机器人、特种机器人与自动化系统, 先后主持或参与完成国家高技术研究发展计划(863计划)课题、国家自然科学基金课题、香港创新技术基金(ITF)课题等研究工作, 并参与多项与企业合作课题的研究。已发表学术论文30多篇, 获得3项中国发明专利。2010年入选北京交通大学“红果园双百人才计划”。



前 言

运动控制是移动机器人研究和应用领域中的一项关键技术。常规的方法是采用人工规划,使机器人按预先设定的运动方式进行运动,这需要大量的在线计算及测量,对于具有多个自由度的足式移动机器人系统,要实现实时的多自由度协调控制存在很大困难。随着机器人技术与应用的快速发展,机器人的工作环境日趋复杂,对运动控制的要求不断提高,需要新的,更加简洁、自然、直接、快速的运动控制方法,以满足机器人在各种实际环境下的使用要求。

人们通过观察发现,自然界中的动物一般都采用节律运动实现其移动功能。这种节律运动具有高度稳定性和适应性,是目前任何一种移动机器人所无法比拟的。因此,将动物节律运动的控制机制应用于足式机器人是很有吸引力的研究思路。近年来,很多研究人员已经注意到这个问题,并逐渐把目光集中到仿生控制上来,力图通过将生物运动神经系统的控制机理与仿生运动机构相结合,使机器人的运动更加贴近自然,进而提高机器人的运动性能,促进机器人实用化进程。在此基础之上所开展的仿生机器人研究已成为机器人研究领域的热点之一。

机器人的生物控制方法,是以认识动物的运动神经系统解剖结构及神经调控机理为基础,通过对神经结构的简化和控制机理的模拟,建立相应的物理或数学模型,利用计算机或电子控制系统加以实现,对机器人实施运动控制的一种方法。生物学的研究表明,动物的运动控制系统是一个复杂的网络,涉及中枢神经、感受器、感觉器官以及骨骼-肌肉执行系统。生物学家普遍认为,动物的节律运动是低级神经中枢的自激行为,由位于脊髓中的中枢模式发生器(central pattern generator, CPG)控制。CPG是由中间神经元构成的局部网络,可以通过神经元之间的相互抑制产生稳定的相位互锁关系,实现自激振荡,进而激发肢体的节律运动。动物的运动控制神经网络以CPG为中心,接受来自高层神经中枢的命令,以及来自躯体感受器的反

馈信息,后二者可以对动物的节律运动起到控制、调节作用,使动物的运动具有可控性和适应性。由于生物神经系统的复杂性,动物运动控制及适应能力产生的机制并没有被完全识别,但一些基本原则已经在生物学家中达到共识,如小脑的平衡协调功能、脊髓反射机理等,这些原理可以应用到机器人的运动控制中,提高机器人的运动性能。

以CPG为核心的机器人生物控制方法初见於20世纪90年代的美国、日本。本书的编写团队於2001年承担了国内机器人生物控制领域第一个国家高技术研究发展计划(863计划)项目。该项目研究者从动物节律运动的普遍性出发,利用生物学的研究成果,对动物的运动控制神经网络及控制机理进行工程模拟,根据机器人的结构和运动特点,从中建立具有一定普遍意义的机器人仿生运动控制模型,对整套控制理论进行了仿真和实验验证,初步探索出一套基於生物神经网络的机器人运动控制方法。之后,团队又在若干个基金项目资助下,进行了机器人生物控制理论方面的深入研究,取得了一系列理论成果。近年来,国内也有不少研究机构 and 高校开展了机器人生物控制方面的理论研究或工程应用。作者出版此书的目的在于提高领域内对机器人生物控制方法的认识,为机器人多足协调控制、非结构化环境适应性等机器人控制领域的关键问题的解决提供一种新的控制思路和技术方法。由於机器人生物控制方面的研究具有学科交叉的特点,除了对本领域的积极作用,反过来还可以对相关的生物学、生理学等学科的发展起到一定的促进作用,为动物的神经-运动机理的认知提供一定启发。

本书主要介绍了机器人生物控制方法的生物学基础、基本原理、数学模型、应用技术等,并结合本课题组承担的“863”项目,以实例方式介绍了该方法的工程应用;作为整个应用的必要组成部分,还介绍了相关的机器人结构与运动设计、动力学仿真等内容。全书内容分述如下。

第1章阐述足式机器人运动控制理论和生物控制方法的相关概念、特点、研究现状、存在的问题及技术难点。

第2章阐述动物节律运动的生物学基础,包括动物的肌肉-骨骼系统、分层的神经控制系统、生物反射机制等。

第3章阐述基於CPG的机器人生物控制方法,包括CPG的建模、特性分析与参数整定等。

第4章阐述基於CPG的多足机器人步态理论,包括CPG网络模型,小跑步态(trot)、行走步态(walk)、踱步步态(pace)、奔跑步态(gallop)四种典型模式运动的产生及步态转换方法。

第5章阐述生物反射建模理论与方法,包括动物的典型环境适应性运动表现形式、多反射组织体系、生物反射数学建模,并以动物的屈肌反射、前庭反射和踏空反射为例,具体介绍运动设计和反射建模方法。

第6章介绍足式机器人的结构和运动设计。以四足机器人为例,探讨了可实现节律运动的足式机器人结构设计原则和运动设计思路,介绍了结构仿生和运动仿生方法,提出了多自由度的耦合降阶控制原理,以及相应的髋-膝关节映射函数的构造方法。

第7章介绍仿生机器人的动力学仿真方法和技术,包括虚拟样机技术、ADAMS 参数化建模、ADAMS 与 MATLAB 联合仿真等,给出了四足机器人的节律运动、爬坡、越障的动力学仿真过程、结果及其数据分析。

第8章是实例介绍,通过两种典型的四足机器人应用实例,阐明机器人生物控制方法的实施步骤。这两种系统分别采用不同的 CPG 控制模型和机构方案。

全书由清华大学精密仪器及机械学系郑浩峻负责总体策划,制造工程研究所特种机器人课题组全体人员参加编写,张秀丽最后整理完成。其中,第1章由郑浩峻编写,第2~5章由张秀丽编写,第6~8章由程智锋、赵里遥、关旭、刘鹏、唐孝雄编写。本书所述的理论和实验成果是在国家高技术研究发展计划(863 计划)项目“基于生物神经网络的仿生机器人运动控制系统研究”(编号 2001AA422330)、国家自然科学基金项目“基于生物感知-运动融合机理的机器人自适应运动控制研究”(编号 50905012)、中央高校基本科研业务费专项(No. 2009JBM089)、国家“863 计划”主题项目“高性能四足仿生机器人”—I 期等的支持下完成的。此外,我们在编写过程中还得到了清华大学汪劲松教授(现为电子科技大学校长)和北京航空航天大学王田苗教授的大力支持,他们提出的指导意见对本书的改进、完善起到了重要作用。

作 者

2011 年 4 月于北京

符号、缩写对照表

T_r	上升时间常数
T_a	疲劳时间常数
r	时间常数比($r=T_a/T_r$)
a	神经元互抑系数
b	疲劳系数
c	直流输入
W	步态矩阵
S	反射信息阵
G	反射系数向量
U	神经元状态
V	神经元疲劳状态
Y	振荡器输出
A	幅值
T	周期
φ	相位差
β	负荷因子
k	膝、髌关节幅值比
p	限幅系数($p=c/A$)
θ_0	关节运动平衡位置
α	坡面倾角
CPG	中枢模式发生器
CNS	中枢神经系统
LR	底层反射
MR	中层反射
HR	高层反射

LF	左前腿,1 腿
RF	右前腿,2 腿
RH	右后腿,3 腿
LH	左后腿,4 腿
AEP	前极限位置
PEP	后极限位置

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 机器人的足式运动	1
1.1.1 步行理论	1
1.1.2 常用运动控制方法	2
1.2 机器人生物控制方法	5
1.2.1 生物学基础	5
1.2.2 基本方法	6
1.2.3 主要特点	6
1.2.4 主要研究课题	8
1.3 机器人生物控制方法的研究及应用现状	9
1.3.1 国内外研究现状	10
1.3.2 开放性问题	20
第 2 章 动物运动的神经控制机理	22
2.1 动物的运动	22
2.2 骨骼-肌肉运动系统	24
2.3 运动控制神经系统	26
2.3.1 高级神经中枢	27
2.3.2 中枢模式发生器	28
2.3.3 生物反射	31
第 3 章 机器人生物控制的理论基础	34
3.1 CPG 模型的演变	34
3.1.1 神经元模型	34
3.1.2 耦合的神经元振荡器模型	36

3.1.3	CPG 神经网络模型	37
3.2	CPG 模型参数特性	43
3.2.1	输出	44
3.2.2	输入	46
3.2.3	初值	49
3.2.4	连接权重矩阵	52
3.2.5	时间常数	53
3.2.6	互抑系数、疲劳系数	56
3.2.7	反馈项	58
3.3	CPG 控制系统设计思路	62
第 4 章	基于 CPG 的足式机器人步态理论与方法	64
4.1	CPG 网络拓扑结构	65
4.2	四足机器人典型步态	67
4.2.1	小跑步态	67
4.2.2	行走步态	68
4.2.3	遛步步态	68
4.2.4	奔跑步态	69
4.3	步态转换	70
4.3.1	动物的步态转换	71
4.3.2	CPG 实现步态转换	73
4.3.3	机器人步态转换方法与步骤	78
4.4	负荷因子的调节	79
第 5 章	生物反射建模理论与方法	81
5.1	反射组织体系	83
5.2	屈肌反射	85
5.2.1	动物的越障运动	86
5.2.2	屈肌反射的建模	88
5.3	前庭反射	94
5.3.1	动物的坡面运动	94
5.3.2	机器人坡面运动分析	96
5.3.3	前庭反射的建模	97

5.4 踏空反射	104
5.4.1 沟壑地形	104
5.4.2 台阶地形	106
5.5 其他生物反射	107
第6章 足式机器人机构设计与运动规划	109
6.1 动物的腿结构与机器人机构仿生	109
6.2 机器人腿结构	111
6.2.1 开链式腿结构	112
6.2.2 闭链式腿结构	117
6.2.3 弹性腿结构	118
6.3 多自由度运动设计	121
6.3.1 动物的肢体运动规律	122
6.3.2 多自由度的降阶控制	122
6.3.3 运动映射函数设计	124
第7章 机器人节律运动动力学仿真	133
7.1 虚拟样机技术	133
7.1.1 ADAMS 的主要组件	134
7.1.2 ADAMS 建模、仿真步骤	134
7.1.3 ADAMS 和其他软件之间的数据交换	135
7.2 四足机器人动力学仿真实例	135
7.2.1 建立四足机器人虚拟样机	136
7.2.2 典型节律步态运动仿真	142
7.2.3 自适应运动仿真	148
第8章 基于生物控制方法的四足机器人系统设计实例	152
8.1 四足机器人 Biosbot-I	152
8.2 四足机器人控制系统	155
8.2.1 机器人生物控制系统设计的理论依据	156
8.2.2 运动控制系统设计需求	157
8.2.3 整体方案	158
8.2.4 硬件选型与实现	158

8.2.5	软件设计与实现·····	164
8.3	典型运动实例·····	171
8.3.1	节律步态与步态转换·····	171
8.3.2	自适应运动·····	179
8.4	四足机器人 Biosbot-IV·····	191
8.4.1	闭链腿结构·····	191
8.4.2	腿结构运动学分析·····	191
8.4.3	腿结构动态静力学分析·····	193
8.4.4	腿结构优化·····	195
8.4.5	弹性腿结构·····	196
8.4.6	Biosbot-IV 样机及运动实验·····	197
参考文献·····		201
索引·····		212

第 1 章 绪 论

1.1 机器人的足式运动

随着人类活动空间的扩大和延伸,移动机器人被逐渐应用于太空探索、极地科考、野外作业、核电站维护、采矿以及军事等领域,成为人类不可缺少的重要工具。从发展的眼光来看,这种多功能移动载体极有可能作为一种基础应用技术,成为 21 世纪最具活力和创造性的领域之一,并带来巨大的社会效益和经济效益。

针对各种不同的运动环境,目前移动机器人所采用的运动方式大体包括轮式、履带式、足式、混合式及一些仿生方式。其中轮式和足式作为两种典型的运动方式得到比较广泛的应用。轮式运动具有速度快、稳定性好、易控制等优点,但要求相对平坦、连续的地面条件。足式运动仅需要一些断续、离散的落足点,可以跨越凸台、沟槽等障碍,上下台阶,通过崎岖、松软或泥泞的地面。足式机器人是模仿动物的运动形式,采用腿足结构来完成移动的一类机器人,具有环境适应性强、运动灵活、主动隔振、能耗低等优点。

1.1.1 步行理论

足式机器人按照足数可分为单足、双足、三足、四足、六足、八足等,不同的足数一般仿生自不同种类的生物,如双足机器人常用于对人类的仿生,四足是对哺乳动物、爬行动物的仿生,六足、八足是对昆虫的仿生。奇数足则是人类在观察模仿动物的基础上发展出来的具有特殊运动特性的机器人。足的数目不仅显示了机器人采用的仿生主体的不同,而且影响机器人的运动性能,如运动速度、稳定性、能耗等。

按行走时保持平衡的方式,步行运动可以分为静态稳定行走与动态稳定行走,其中静态稳定行走是通过足够数量的支撑腿来保证机体重心垂直投影始终落在支撑足着地点的垂直投影所形成的凸多边形内,运行速度较慢;动态稳定行走是指机器人的零力矩点(ZMP)位于支撑平面内,运动速度较快。

多足机器人步行理论主要涉及步态理论(gait),即研究机器人的行走模式,包括抬腿序列及其空间轨迹。在这方面,美国的 Hildebrand、McGhee、Song 和日本的 Hirose 等科研人员作了大量的工作^[1~5],为足式机器人步行理论奠定了坚实的基础。现有的较为成熟的足式机器人行走步态及其运动特点如表 1-1 所示。

表 1-1 足式机器人的步态

步 态		步态 稳定性	适用的 地面	计算执行	功率消耗	运动的 平顺性
周 期	波动步法	好	理想	容易	不均匀	好
	EPH 步法	好	理想	容易	均匀	好
	向后落脚波动步法	较好	理想	容易	不均匀	好
	向后落脚 EPH 步法	较好	理想	容易	均匀	好
	灵活的周期步法	好或较好	较好	较易	均 匀 或 不均匀	好
	连续的 FTL 步法	较好	较好或 恶劣	较易	不均匀	好
非 周 期	不连续的 FTL 步法	很好	恶劣	难	不均匀	不好
	LOG 步法	较好	障碍	较易	不均匀	不好
	准确落脚步法	很好	恶劣并 有障碍	很难	不均匀	不好
	自由步法	好	恶劣	难	不均匀	较好

此外,步行理论的研究还涉及足式机器人腿机构^[6,7]、设计参数优化^[8]、步行稳定性分析^[9,10]、运动学及动力学分析^[11~17]、足式机器人控制系统^[18~21]、路径规划^[22]、视觉信息处理及导航^[23,24]等。

1.1.2 常用运动控制方法

Kimura 将机器人的控制技术总结为基于模型方法和生物启发方法两大类,每一类根据其核心技术又分为若干种,如表 1-2 所示。

表 1-2 足式机器人运动控制技术^[25]

基于模型方法	生物启发方法			
ZMP 控制技术	极限环控制技术		人工智能技术	
	基于神经系统模型	基于机械装置	联结主义	行为主义

足式机器人是动物仿生在工程领域应用的结果。广义地说,足式机器人的运动控制就是在动物和机器人之间建立一座桥梁,将动物的运动映射为机器人的运动。不同的控制方法有不同的映射途径。目前应用比较广泛的控制方法主要有三种^[26]:基于模型的方法、基于行为的方法、生物控制方法,图 1-1 是三种控制方法的映射途径。

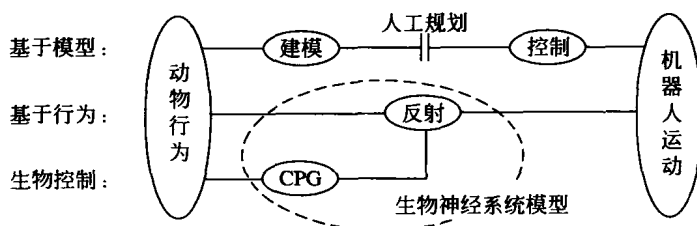


图 1-1 三种控制方法的映射途径

1. 基于模型的方法(dynamic model-based approach)

基于模型的运动控制方法应用十分广泛,它以经典运动学、动力学为理论基础,采用建模-规划-控制的思路:即首先对机器人本体及环境进行精确建模,然后通过人工规划得到机器人的最佳运动轨迹,再利用反馈技术,控制机器人实际运动轨迹与理想轨迹之间的偏差,使机器人的运动尽可能趋近理想轨迹,这种前馈加反馈的控制模式,能够实现复杂、精确的运动。基于模型的方法比较有代表性的应用实例有本田的 P 系列、ASIMO,索尼的 SDR-XX、QRIO 等仿人机器人。

从图 1-1 中可以看出,基于模型的控制方法的映射比较复杂,人工规划的加入使映射过程变得不连续,具体来说存在下述劣势:

- 需要繁琐的动力学建模;
- 运动规划复杂。由于存在冗余自由度,多足机器人运动学或动力学逆解不唯一,繁琐的解算过程会降低控制的实时性;
- 规划过程不连续。传统规划方法是单周期规划,考虑各周期之间的转换条件。这种单周期规划与机器人连续运动之间存在矛盾;

- 环境适应性的实现比较困难。在户外、战场等复杂、非结构化的环境中,不可能对机器人的工作环境进行预先建模。

随着模糊控制、人工神经网络、遗传算法、学习算法等先进控制方法的发展,机器人控制领域也采用这些方法与传统规划方法相结合,提高机器人的智能水平及运动性能^[27]。但这些方法相对比较复杂,需要大量的计算及在线测量,在需要多自由度协调的机器人控制任务中,缺乏足够的实时性,效果不尽理想或者成本太高。

2. 基于行为的方法(behavior-based approach)

基于行为的方法由美国麻省理工学院的 Brooks 于 1985 年提出^[28],被称为“无思考智能”,是对昆虫智能的仿生。昆虫没有存储、规划、控制全身各部分运动的中央控制系统,是根据身体各部分对内部指令或外界刺激的不同反应,将一些局部看来漫无目标的动作合成为有意义的生物行为,其运动简单、灵活。基于行为的方法采用感知-反射的控制思路,即,机器人的运动由一系列简单的形式化动作或“能力”组成,每个“能力”包含各自的传感输入和驱动输出,由传感信号直接引发相应动作,各个动作通过竞争、组合等方式决定机器人的整体行为。基于行为的控制方法在输入和输出之间没有复杂的计算处理过程,通过自组织实现系统的复杂行为,具有即时出现(emergence)的特点。因此,在非结构化环境中具有较好的适应性。基于行为的控制方法的应用实例有 Brooks 的“Genghis”六足机器人、“Hannibal”六足机器人、“阿蒂拉-I”机器人、瑞士洛桑大学的“克伯拉”机器人以及美国 Los Alamos 国家实验室的“Vbug”系列机器人^[29]等。

基于行为的方法的缺点在于无法产生高智能的行为。由于机器人的“基本能力”不可修改,系统的智能水平或行为的复杂程度取决于“基本能力”的多少以及反射规则的合理性。另外,由于没有全局控制模块,机器人的可控性较差。

3. 生物控制方法(biologically-inspired approach)

生物控制方法是 20 世纪 90 年代发展起来的一种新的控制方法,是生物科学与工程技术交叉融合的一个研究方向。由于足式机器人和动物采用类似的运动方式——节律运动,因而可以将动物的节律运动控制机理应用于机器人中。生物控制方法是将整个生物神经系统模型作为映射途径,核心是中枢模式发生器(CPG)神经电路模型的引入。机器人的生物控制方法

的研究目标是通过动物节律运动控制区 CPG、高层调控中枢、生物反射等一些生物模型或控制机理的工程模拟、简化和改进,形成一种新的,更加简洁、自然、直接、快速的运动控制方法和理论,实现机器人的节律运动及环境自适应运动,提高机器人在各种实际环境中的工作性能。采用生物控制方法,从生物亿万年的进化历程中汲取灵感,将动物的运动控制机制应用于机器人,是一条很有潜力的发展思路。

这三种足式机器人运动控制方法各有特点,适用于不同的情况,表 1-3 为三种方法的特性比较。

表 1-3 足式机器人三种运动控制方法特点比较

	基于模型方法	基于行为方法	生物控制方法
仿生对象	无	昆虫	脊索动物
运动描述方法	动力学模型	功能单元之间的关系	
控制方式	高层控制	感知驱动	高层控制与感知驱动
行为特点	精确	自组织、即现	非精确、自组织
方法复杂性	复杂	简单	中等
整体可控性	可控	不可控	总体可控
运动稳定性	较好	一般	较好
运动快速性	慢	快	
运动误差来源	建模、标定、控制	控制	
适用任务	全局位置控制	简单行为	周期任务

1.2 机器人生物控制方法

1.2.1 生物学基础

生物体中广泛存在一些运动形式固定的周期性运动,如走、跑、跳、泳、飞等肢体运动,以及呼吸、心跳、咀嚼、胃肠蠕动等生理行为,这些运动被称为节律运动。生物学家普遍认为动物的节律运动是低级神经中枢的自激行为,由位于脊椎动物的脊髓或无脊椎动物的胸腹神经节中的 CPG 控制^[30~33]。

CPG 是由中间神经元构成的分布式振荡网络,通过神经元之间的相互抑制实现自激振荡,产生具有稳定相位互锁关系的多路或单路周期信号,控制肢体或躯体相关部位的节律运动。CPG 中各神经元之间的突触连接具有可塑性,可以产生不同的输出模式,使动物展现多种节律运动行为^[34]。