

# 什么是机器人技术。 我们为什么需要它，我们如何才能得到 它？

Daniel E. Koditschek,  
宾夕法尼亚大学电气和系统工程系，宾夕法尼  
亚州费城。 19104

122,月 2020

## 摘要

机器人学是一门关注编程工作的新兴合成科学。机器人技术的发展迅速，超出了现有科学的洞察力。随着它们对社会的渗透加深，将需要更安全的基础知识来实现更好、更可靠和更安全的能力。目前缺失的基础包括基本物理极限的识别、新的动力系统理论的发展和基于物理的编程语言的发明。这门新的学科需要在大学里有一个部门的家，它可以在智力上和吸引新的不同人群的能力上证明它是由人类对机器人的古老迷恋所激发的。

**关键词：**机器人学、合成科学、编程工作、活性材料、基本物理极限、混合动力系统理论、应用拓扑学、应用范畴理论、应用类型理论、学术学科、学术部门、技术的社会影响、科学家的多样性

# 内容

1 简介	3
2 什么是机器人技术？	3
2.1 来自计算机科学的教训	4
2.1.1 计算基质	4
2.1.2 从模块到程序	4
2.1.3 设计三要素	5
2.2 摆在机器人学科面前的问题	5
2.2.1 物质资源：工作的基质	5
2.2.1.1 能源和信息费率	6
2.2.1.2 制造和打破纽带	6
2.2.2 编程：在环境中进行的任务的架构	7
2.2.2.1 描述机器人-环境界面	7
2.2.2.2 规格：内部层和模型	8
3 我们为什么需要它？	9
3.1 知识进步的基础	9
3.2 研究和教学的基础	10
3.3 社会影响的必要性	11
4 我们如何才能得到它？	11
4.1 构建和测试机器人、理论和程序	11
4.1.1 机器人	12
4.1.1.1 资源：权力、信息、控制力及其交易。	12
4.1.1.2 分布：合规性、模块化和代码设计	13
4.1.2 理论	14
4.1.2.1 不确定性和成本的内在模型	14
4.1.2.2 通过接地符号从目标基元到任务	15
4.1.3 编程	16
4.1.3.1 任务规范的构成	16
4.1.3.2 基础类型理论	17
4.2 建立和深化合作	17
4.2.1 机构	18
4.2.2 人	18
5 结论	19
动力系统	21
A.1 链条	22

A.2	李亚普诺夫函数.....	22
A.3	双曲性和拉萨尔函数.....	23
B	机器人-环境界面模型.....	23
B.1	工作界面。机器人混合动力.....	23
B.1.1	机器人-环境机械学.....	24
B.1.2	内部状态与行为模式.....	24
B.1.3	守护和重设.....	24
B.1.4	协商准确度与可操作性的交易.....	24
B.2	信息接口。一个零散的叙述.....	25
B.2.1	信息界面的建模.....	25
B.2.2	建筑学.....	26
B.2.3	环境.....	26
B.2.3.1	设计模型.....	27
B.2.3.2	学会的模式.....	27
C	推测性问题解决。迈向工作的类型理论.....	28
C.1	趋向问题 1.....	28
C.1.1	自由度。迈向动态的兰道尔极限.....	28
C.1.2	编码设计和形态学计算.....	28
C.2	趋向问题 2.....	29
C.2.1	从信号到接地的符号.....	29
C.2.2	目标基元的规范.....	29
C.2.2.1	参考动议.....	29
C.2.2.2	最优动力.....	30
C.2.2.3	参考动态.....	30
C.2.3	从构成到类别.....	30
C.2.3.1	模板的构成.....	31
C.2.3.2	迈向混合动力系统的类别.....	31

## 1 简介

机器人学是一个不断增长的技术体，目前正处于发展其学科领域的早期阶段。在生物学家、计算机科学家和工程师之间数十年的合作下，它的商业存在迫在眉睫，这仅仅是未来巨大社会影响的预兆，它的影响力已经开始超过其仍然微不足道的基础的把握。

本文提出，机器人学注定要成为（最终被理解为并明确推进为）一门新的合成科学，关注编程工作--机器与环境之间的能量和信息交换，以实现一些特定的目标。在探讨了这些术语的含义之后，论点转到了 2 中探讨了这些术语的含义之后，论点转向了这些术语对推动该领域发展的价值。 3.文章在第4节中对这门新学科如何诞生提出了推测性的看法，然后在第4节中得出结论。 5最后，文章简要介绍了写作的原因以及谁可能从阅读中受益。<sup>1</sup>

## 2 什么是机器人技术？

与自然科学--揭示现有经验领域的理论体系--不同的是，合成科学寻求的是预测可能存在的东西的理论<sup>[1]</sup>。这就需要我们超越费曼经常引用的“我不能创造的东西我不理解”<sup>[2]</sup>的说法，坚持不仅要用我们创造的东西来检验我们的直觉和理解，而且要把我们的理解编入设计原则中，在创造之前预测其人工制品的经验特性。<sup>[3]</sup>因此，机器人学科必须有一个正式的理论体系，赋予一些目标规范的语言和机械的材料结构蓝图，这些机械将以可证明的方式与环境交换能量，以实现目标。这样的规范必须包括环境的类型，以表达目标必须或不能实现的环境。特别是，该理论必须防止规范那些在任何环境中都无法实现的目标，因为它们的实现会违反基本的物理限制。

---

<sup>1</sup>补充附录对动力系统理论的观点进行了支持性的（但必须是简略的）概述（A），对机器人与环境的接口模型的一些细节（B），以及对如何推动机器人学科发展的猜测的进一步细节（C）进行了支持。<sup>4</sup>主文中的讨论；由这些字母引导的参考文献（通常与标点数字结合）指的是补充附录中的相应章节。使用斜体小写字母而不是数字的脚注同样指的是补充附录中的脚注；这些脚注介绍了额外程度的技术细节，这些细节取决于补充附录中介绍的概念（因此，必须归入补充附录）。

<sup>2</sup>将这句话的反义词解释为“如果我理解，那么我就能创造”，合成生物学家也开始思考这句话与它的反义词“如果我能够创造，那么我就理解”之间的差距<sup>[2]</sup>。2]--这是本文的核心焦点。

<sup>3</sup>在这里以及整个过程中，诸如综合、设计原则、设计方法等术语都是为了说明一个正式的工具集，据此规范可以映射到行为。几个世纪以来，比本文作者能力更强的思想家们一直在思考从工具的科学到工具应用的艺术这一深刻而迷人的提升。<sup>[3]</sup>远远超出了本文的范围。

## 2.1 来自计算机科学的教训

计算机科学关注的是机器与环境之间的信息交流的编程[4]。在二十世纪上半叶的过程中，作为数学逻辑、语言学、神经科学和电气工程的交叉点，出现<sup>4</sup>了一套理论和实践[8]。它花了下半年的大部分时间来赢得作为一门学科的逐渐认可[9]。在关于它还能成为什么的许多争议中[10]，这门学科可以说是在朗道尔[11]确定基本物理成本后赢得了合成科学的殊荣。[11]确定了信息的基本物理成本，此后又发现了大量关于计算的基本限制的内容[12]。

计算机科学给机器人带来的教训包括：我们表达设计目标的能力和物理基质实现这些目标的能力之间富有成效的相互作用(2.1.1)；模块化的重要作用及其在程序中的神化(2.1.2)；以及设计三要素的核心重要性--区分和联系任务、完成任务的架构以及寻求完成这些任务的环境(§2.1.3)。

### 2.1.1 计算基质

很少有人会质疑，将正式指定的架构[13]与物理底层的关系[14][15][16]在过去半个世纪的信息技术革命中起到了决定性的作用。理论上的显著进步使研究人员能够将逻辑操作的抽象特征与物理制造和设计联系起来，并考虑到兰道尔极限[17]等绝对障碍。[17]几乎跨越了20几个数量级--从纳米级设备 ( $10^{-8}$  W) 到区域性数据中心 ( $10^6$  W) [18]--这是对计算作为一门物理合成科学的成功的惊人证明，也是其不可避免的社会影响的基础。从一个新生的机器人科学家的羡慕眼光来看，更引人注目的是计算机工程师定义和操作设计贸易空间的关键能力，其尺寸可以自由地混合和比较信息指标（如指令字宽、数据与指令内存地址空间、指令循环长度等）与能量指标[19]。巧妙的技术变通，继续减轻兰道尔对摩尔定律的热力学威胁[20]并没有否定，而是强调了明确识别和设计这些基本物理限制的价值。事实上，机器人学和计算机科学之间的一个关键区别是由贝内特对可逆计算的求助所阐明的[21]。几十年后在物理上实现的[22]，可逆计算可能有望使仅仅与环境交换信息的机器摆脱兰道尔的限制。然而，无论如何，计算机工程师们的聪明才智迄今已在很大程度上使用户的抽象得以运作，仿佛这就是事实。相比之下，计算可能是很酷的，但机器人技术必须是热的 (§2.2.1.1)。

### 2.1.2 从模块到程序

这场惊人的信息技术革命的关键是编程语言的作用。米德和康威的[23]形式化的设计规则，可以随着计算基质的变化而变化[15]推动了用于规范指令集处理器的寄存器传输语言的发展[24]。麦卡锡[25]认识到Church的 $\lambda$ 微积分可以用来表示程序，把它们提升为一流的数学对象[26]，最终被重新设想为具有构造数学本身的全部表达能力[27]。

通过可互换部件的套件进行模块化设计已经有几千年的历史了[28]。在西蒙的两个钟表匠的寓言中，它的优点是分层构成[29, 第26页]。[1]模块化促进了重复使用，邀请语法--重新组合的一般规则来适应不同的任务。乔姆斯基层次结构根据离散有限自动机的记忆容量和访问权限指定的计算模型来校准一种语言，即一个词串的子集合，可以识别或生成它[30]。[8]。但机器人学最初关注的是一类不同的动态系统  $\mathcal{S}(B)$ 。此外，合成的要求不仅仅是一种语言，而是一种编程语言[31]。[29]--一种规范的语法[30]--其基本论述遵循丘吉尔-图灵假设的类型论分支[32]的丘吉尔-图灵假设，首先由麦卡锡转向人工智能[31]。

<sup>4</sup>二十世纪末这种向计算的并发模型转变的技术先见之明--对计算机世界信息界面的规范化[5第41章]。[41]--现在不仅有大量的通信应用[41, 第41章]得到了充分的证明。[6]，而且，不断出现的机架和芯片级的互连瓶颈，甚至已经开始侵袭算法复杂性理论[7]。

### 2.1.3 设计三要素

在他的《人工科学》一书中，西蒙[1]呼吁我们注意设计者的问题三：一个人工制品在其环境中寻求的目标。然而，在他帮助创立的人工智能领域中，他那令人难忘的蚂蚁被其周围环境引导的形象似乎很快就被遗忘了。尽管有一些重要的例外[...32]，人工智能一直专注于它的架构和它们在实现目标方面的功效，对它们的环境行为的经验研究也很少保留系统的关注，更不用说试图从理论上说明哪类环境会助长或阻碍它们。<sup>5</sup>该学科更广泛的范围开始接受并拥护计算机科学的中心地位。理解并正式规定代理人与其环境的互动[]。4].然而，即使是人工智能领域中最有学术价值、最全面和同时代最有价值的文本[33]，在强调这种互动的同时，也没有为其规范和分析提供一个统一的形式主义--这是机器人学继承的难题 (§B.2)。

## 2.2 摆在机器人学科面前的问题

机器人的基本工作是<sup>6</sup>对其用户指定的环境进行工作。因此，机器人学学科必须解决三个主要问题。

问题（1机器人）。建立一个配备了物质资源的物理体，能够在正确的时间沿着正确的自由度将能量从（通常是化学）储存器转移到环境中。

问题（2机器人程序）。接受一个关于机器人状态空间的目标规范，并宣布由于资源不足而失败，或者执行一个解决问题的方案。1的解决方案，以实现该目标。

问题3（机器人设计）。接受一个世界模型（一类环境）和一个任务域（一类目标）的规格，然后返回一个资源规格以及问题3的解决方案。1和问题2的解决方案，以实现这些环境中的任务，并给出这些资源。

第2.2.1节概述了关于问题的挑战的已知情况1-实现工作底层。第2.2.2节2.2.2解决问题2介绍了机器人-环境界面的模型，并研究了阻碍抽象目标的编程和执行的概念性差距。问题3将在第二节中讨论。4通过对任务域和环境类别等术语的公正性所需的更多推测性讨论来解决这个问题。<sup>7</sup>

### 2.2.1 物质资源：工作的基质

问题的解决方案1--肢体和身体，以及它们被赋予的驱动、感知和操纵能力，自大约半个世纪前出现第一个现代设计以来，已经表现出实质性的进步[38].但是，可能除了更好的芯片和传感器带来的好处之外，没有任何迹象表明

---

<sup>5</sup>在本文中，如果要讨论基准--在策划的环境中的经验表现--在机器人技术中的适当作用，那将需要一个太长的离题。就其本身而言，对基准的关注不能被理解为适当的实证科学。当然，针对基准的测试不能被误认为是理论化（形成精确的假设，在新的假设类型的环境中进行测试），即什么类型的环境的什么特征会引起人工制品的什么类型的行为。另外（有点危险地转向脚注3中禁止在本文中考虑的科学实践的艺术），很难想象任何新的经验性的发现会来自于为总结一个设计问题中已知的困难而选择的一系列例子。基准测试可以发挥重要的作用，帮助评估一个架构在环境条件或任务规格方面的可能表现，这些条件或规格超出了其（通常是令人失望的保守的）可证明的充分成功条件的范围，就像本节中讨论的那样。3.1.

<sup>6</sup>为了限定其范围，本文着重于人类尺度（长度约为米 $10^{-2}$ 到 $10^2$ ）的机械机器人（其能量交换由经典力学描述）的特定情况。延伸或改进这些想法，以实现低于毫米尺度的动力和信息自主机器人的承诺[34]和通过化学原理工作的机器[35]将成为未来新兴学科的迫切任务。

<sup>7</sup>同样，空间和时间的限制排除了本文对代理权的考虑--一个系统发展（也许执行）其自身目标的能力。不可避免的是，实现用户目标所需的自主性等级将开始包括越来越广泛的决策能力和动机动力[]。36]，因为规格变得更加抽象，环境偏离了设计者的预期类型。机器人技术的体现情况为以经验为基础的自主性科学的发展提供了理想的环境[]。37]，值得我们专门讨论。



在信息技术革命的前20年里已经明显地加快了进展[...]. 13, 14]. 研究人员才开始探索机械电路--其分配的任务需要交换焦耳和比特的互连系统--如何以及为什么从根本上说比超大规模集成电路 (VLSI) 更难进行模块化、设计和扩展的问题[]。39]<sup>8</sup>

本节提出, 对基本的物质资源和它们必须的方式关注不够。

在解释和加快其缓慢的步伐方面, 相互作用以推动进展仍然是一个关键障碍。机器人技术的物理环境是由三种特定的资源 (能量、信息和纽带) ; 它们的速率; 以及最重要的是, 它们之间复杂的相互作用, 这是利用和有效地部署它们中的任何一个所必需的。题为 "问题1的挑战" 的侧边栏总结了本节其余部分关于机器人技术的这些基本物理资源的讨论。

**2.2.1.1 能量和信息速率** 由于快速完成工作的重要性, 功率--执行器可以移动焦耳的速率--是第一种稀缺资源。在惠更斯于1670年代发明火药驱动的线性致动器之前, 肌肉是唯一可以完成任务的机械工作的来源[]。43]. 不同排列的肌肉纤维和骨骼附件作为马达、制动器、弹簧和支柱工作, 其驱动能力变化巨大, 例如, 在10赫兹时可达10瓦<sup>3</sup>/千克或10瓦<sup>2</sup>/千克[]。44], 质量范围跨越七个数量级,  $-10^{-4}$  到  $10^3$  公斤[45]. 同时, 二十世纪的少量物理原理和

机制可用于合成执行器的设计[46]已经开花结果, 成为活体启发[43]. 这些丰富的变化揭示了诸如功率密度、带宽、以及许多超过了生物性能的限定子集[ ]。47]. 然而, 没有任何一种协同方法似乎接近于与动物肌肉组织的多能性相匹配, 更不用说其自我组装、再生和内在适应的能力[]。43].

而计算不需要在本质上产生能量成本[21], 但机器人必须消耗能量, 不仅是在明确地对其环境进行工作时[48], 而且要实现下面所提倡的以动态吸引子盆地为基础的任何任务 (第 4.1.2.2). <sup>9</sup>这促使人们提出这样的问题: 特定力量的基本极限是什么? 似乎不可避免的是, Landauer的极限捆绑的动态版本不仅仅是能量和信息, 还有功率和比特率 (C.1.1) 在任何关于机器人的基本物理约束的表述中都将发挥重要作用。在过去的十年中, 对这些关系的理解已经成为一个活跃的理论研究领域[...55]和越来越多的实际设备设计 [56]在纳米尺度上。这篇文章认为( 4.1.1.1), 在传统机器人学的中尺度上探索这种基本约束的含义将在建立该学科方面发挥关键作用。当然, 同样重要的是, 如何有效地使用机器人被赋予的任何特定力量 (§4.1.3.1).

**2.2.1.2 制造和打破纽带** 无论在设计时是否固定, 或者, 关键是, 设计成在任务过程中沿着与机器人目标相关的自由度制造和打破, 纽带必须足够坚固, 以承受它们所传递的力量。显然, 抓地力--赋予摩擦力和粘附力的材料特性, 它们的去除, 以及它们对更高的交替率的设施--也很稀缺。

<sup>8</sup>VLSI的一位联合创始人[]对挑战的一个传闻但却很有说服力的衡量标准就是他的努力。23VLSI的一位联合创始人[]在模拟电路设计方面掀起了一场类似的革命。40一个令人振奋和有影响力的[现在有数以千计的论文在这个有前途的框架内工作[]。41]但肯定不是 (至少还不是) 类似的范式转变的发展。第B.2.2节讨论了模拟计算在机器人技术中可能发挥的关键作用及其最近的进展, 例如[]。42].

<sup>9</sup>与经典的哈密尔顿系统不同, 片状无损整体性系统的混合组合可以维持稳定的、部分渐近稳定的吸引子[49, 50, 51], 这一现象已被利用于鼓舞人心的高效腿部运动[,,]. 52, 53]. 然而, 第4.1.2.2节中所提倡的环境容量盆地是不可能的, 所以所产生的稳态行为是中性稳定的, 并且可以被推来推去--也许控制器可以达到有用的效果[54], 但也很容易被环境推到对规定目标不利的地方。

### 问题的挑战 1

解决这个问题需要1)材料具有可扩展的数学能力和信息处理能力 (§)。2.2.1.1), 以及握住 (§2.2.1.2). 能够指定其的设计方法学在内部体积和界面表面的分布作为任务-环境配对的一个函数, 机器人身体的工作需要机器人-环境工作信息的模型 (§2.2.1.1), 其中包含了以下的明确表示这些物质资源。

材料的连接是人类最古老的技术之一[ ]。57在本文中，框架成本一词指的是在不同材料之间实现足够强大和稳健的永久机械结合所产生的额外质量，这通常是将执行器和传感器等部件集成到目标形态中所需要的。材料科学和工程的快速发展预示着一个最终的未来，即凝聚态物理学的基本原理驱动着从均质材料中打印出工作装置和复杂结构，类似于从几个彩色墨水杯中打印出任意图像的二维喷墨打印[ ]。58].目前，通过切割和折叠同质片材来设计多能材料的算法思考[59]正在实现顺应性和形状可调的机器人肢体[60]，而类似的活性材料的可编程时空复杂自组装似乎也在路上[61].机器人技术的一个主要挑战是开发一个系统的框架，用于指定材料特性在永久（或者，也许是发展中的--甚至是进化中的）集成体的内部体积和界面表面的分布(4.1.1.2).与此相反，一个更大的挑战是开发与环境相连接的材料，这些材料能够根据指令迅速建立和打破牢固的结合。尽管用高质量的粘附力（正常）和摩擦力（剪切）来连接可能很困难，但要安排快速的、不费吹灰之力的分离，也确实令人生畏。多细胞生命在许多规模上都是通过粘附来实现的；特别是，动物使用快速可逆的强制抓取器来进食、爬行、攀爬，并在所有可以想象的陆地环境中捕获猎物[ ]。62].反过来，在动物世界中，令人印象深刻的操纵行为比比皆是[ ]。63].不出所料，几十年来，抓取器的结构问题一直是机器人学界关注的焦点[ ]。64].但特定动物抓握的物理基础直到最近才开始被理解[ ]。65]，首次揭示了[...66]只是在几千年的困惑之后。本节研究4.1.1.1了确定抓取的基本限制的前景，同时也触及了如何确定和使用任何抓取的问题。

环境的重要性。

## 2.2.2 编程：在环境中进行的任务的架构

机器人与作为物理机器的计算机截然不同；因此，它们的拉格朗日内部模型[6768]与计算机的离散有限自动机模型[ ]是不同的。8].但程序是一个数学对象，正如麦卡锡的[26]>微积分表示法，以及更广泛地作为一个定义于类型理论的函数--可用域和码域的规范[ ]。27].类型是“编程语言理论的中心组织原则”[ ]。5，第xvii页]，对语法施加约束，确保其评价总是产生一个有效的函数--其“行为”由理论中提供的结果域和码域定义。在这种观点中，由语法指定的数学对象的意义是由任何评价步骤的操作语义给出的[ ]。29].

要实现Prob- lem所要求的以物理为基础的类型理论，有两个基本挑战 2.首先，以任何形式条款规定系统在其环境中的行为，都需要对它们之间的界面进行描述，然后才能指定目标。第二节 2.2.2.1本节评估了接口描述的可用性，这些描述清楚地表明了底层的物理资源，这样就可以根据它们的要求和在不同环境中的运行情况来考虑替代架构。其次，由于复杂的系统需要有一个层次的接口[ ]，因此，一个有行为意义的机器人需要有一个层次的接口。1]一个行为上有趣的机器人将需要一个深入的规范，需要许多层的编程语言，并有明确相关的操作语义，通过这些语言，任何给定层的规范的意义都可以清楚地表达在它所调用的子组件和兄弟组件的行为上[ ]。30].第二节 2.2.2.2讨论了识别有用的内部层和适当的抽象障碍以分离它们的挑战。题为《问题2的挑战》的侧边栏总结了本节其余部分针对机器人编程问题的讨论。

### 2.2.2.1 描述机器人-环境界面

一个机器人的工作界面是由 (a) 它的actuarium（由B.1.1节的第一个方程建模的能量端口的表示）的属性指定的。<sup>10</sup>

其容量的基本特征是以瓦/千克为单位的比功率；(b) 其感应器[一个代表其信息通道的发送[ ]，其特点是比特率（B/s）；以及69]]，其特点是比特率，单位为B/s；以及(c)其张力（代表它可以抓取的速度和力量），其特点是速率大小为

<sup>10</sup>关于这种界面的更普遍的行为表现的前景，见B.1.2节的简要讨论。



反转力比 (N/s)。<sup>11</sup> 这些厚颜无耻的拉丁语术语旨在强调日益丰富的智能材料[.....]。71]提供了分配这些能力[如W/(kg m<sup>3</sup>)或B/(s m<sup>2</sup>)]的新机会, 而不需要考虑传统执行器所产生的框架和其他扩展成本[46]或通过在网络通信通道中整合本地可扩展的计算[]。72]。

这些规格的一个潜在的令人困惑的方面是, 所有的资源都在两个界面上发挥作用。在通过端口交换的工作中存在着信息(哪个自由度得到什么速率), 信息通道(关于计算和通信)不可避免地有能量成本, 而抓地力在工作和接收关于环境的信息方面起着核心作用。值得注意的是, 参与驱动和传感的自体设备长期以来在机器人技术中发挥着重要作用。

[73], 并使能力的描述复杂化, 因为它们丰富了机器人的行为套件。

在机器人技术领域, 人们一致认为, 在.....的工作中。

与环境的界面导致了一个关于机器人-环境状态的内部模型,  $x_{uv}$ , 由接触方式,  $v \in V$  (B.1) 索引。尽管281一共识很可能被先进材料的引入所削弱,<sup>2</sup>因为它们有望实现分布式界面[.....]和无处不在的顺应性。71]和无处不在的顺应性[...], 这一共识很可能被先进材料的引入所削弱。74], 但在考虑机器人架构的规范和部署时, 它仍然是一个有用的出发点。有了这一点, 为了便于阐述, 我们可以将工作界面的标准模型设定为B.1.1节中第一个方程式的形式。

考虑到这个工作界面模型, 动力资源由该方程中的输入信号 $u$ 的属性体现出来--最简单的是它相对于状态向量 $x$ 的维度(作用不足的程度), 或者更准确地说, 由一系列越来越详细的内部动力学模型来体现, 例如, [757677][最终需要建立特定的机器人-环境模型[.....]。78]], 如B.1节所述。相比之下, 由于该学科的不成熟, 似乎还不可能为机器人的信息 $s$ 界面提出一个标准模型 (B.2)。在过程代数文献中可以找到这种模型的一个可能的一般候选者[69]; 因此, 即使只是作为一个概念性的占位符, 它也是很方便的。<sup>12</sup> 使用在讨论对一个国家的代表的要求和前景时, 应使用术语渠道 (B.2.1)。机器人的信息资源。

**2.2.2.2 规范: 内部层和模型** 尽管机器人感知的核心重要性[...8182], 由于缺乏与端口 (B.1.1) 的工作界面相对应的通道 (B.2.1) 的共识模型, 使得设计机器人深层的挑战更加严峻。这是一个本质上充满问题的事业, 因为内部处理界面--信息处理模块和它们的相互关系--是混乱的不受约束的。从B.1.1节的第一个方程的工作界面来看, 从概念上来说是很直接的(尽管在技术上往往是很有挑战性的), 要为一个架构成功实现相对于特定环境的特定任务制定充分的条件, 因为纽托-尼安力学在物理上是不可避免的。此外, 在解决局部行为的问题上 (B.2.2), 仔细的控制理论推理可以产生必要的条件, 其通用性甚至足以根据巧妙的实验来约束动物的结构。838485].在描述任务领域时, 精确性的一个核心动机, 正如在第1节中所讨论的那样4.1.2.2所讨论的, 在描述任务领域时, 精确性的核心动机是至少可以证明充分性。以内部结构的必要条件为形式的更深层次的概念进展将需要对生成模型进行仔细的推理[IV]。86, 37] 来确定基本的资源限制如何制约它。<sup>13</sup>

这些最后的观察强调了记忆的作用和结构显然是至关重要的, 但仍然是不可捉摸的。

<sup>11</sup>这个非常具有猜测性的建议是, 在时间速率和负载与预载的大小以及反转率方面的适当抓取单位[70]在本节中作了介绍。  
4.1.1.1.

<sup>12</sup>思考这里的挑战是令人生畏的, 因为最终的概念装置将需要涵盖广泛的错综复杂的纠缠现象, 从传动系统的“透明度”(4.1.1.2)到臭名昭著的对应问题[79]和统计学上的主动感知[80](B.2.1)通过模拟计算的表示和使用(B.2.2)。

<sup>13</sup>动物结构为任何动物机构的性能模型提供了诱人的必要条件。然而, 这种约束条件是否比行为能力模型更有价值, 而行为能

## 问题的挑战 2

解决问题 2 需要推理出完整的综合三要素 (S2.1.3), 包括机器人与它的接口环境 (S2.2.2.1) 和它的结构与它的有针对性的任务, 以及环境的协调性。实现它们 (S2.2.2.2). 开发机器人内部的模型形成界面, 以配合其工作的共识模式接口仍然是一个关键的挑战 (SB)。

力模型对于规定机器人内部结构在特定环境中完成特定任务所需的属性是足够的（而且可能是首选的），这一点还有待探讨。

事先关于机器人和环境的信息以及他们相遇的历史。不幸的是，对人工智能痴迷于设计架构中的表征的必要批判，已经被“把世界作为自己的模型”的魅力呼吁所掩盖[.....]。87, p. 140]。<sup>14</sup>真正的学科问题是关于建筑的表征：阐明设计三要素的内部界面规范( 2.1.3)。这个基本问题似乎历来被人工智能的内部模型和反应行为阵营所回避。除了最粗略的经验性轶事之外，这两个传统都回避了对机器人-环境配对的任何研究[93]。但是，机器人学不能放弃这种奢侈：关键的挑战是开发工具来推理某个特定环境的内部模型（以及与之相关的机器人-环境状态）在多大程度上对实现特定目标是必要的或足够的[]。<sup>94</sup>。

在界面层中，有两个紧密相关但不同的深度维度需要考虑。第一个，体现了任务规范的需要，来自于人类对抽象的偏爱，作为驯服行为复杂性的一种手段，特别是受到信号-符号划分的挑战( 4.1.2.2)。第二种，由信息和抓握的物理资源引入，产生于环境中越来越多的时空距离，随着行为复杂性的增加，必须机械地参与或感知地体验。这里的概念瓶颈在于环境的适当抽象模型，这些模型既是设计者赋予的 (B.2.3.1)，也是从经验中学习的。

§

(§B.2.3.2)。本文试图推进这样一个观点（将在第1节中首次阐述，并在第B.2节和第C.2节中以更多的技术细节进行阐述），即无论在哪个层面上，感觉运动一致性的艰巨挑战--保持符号的一致性--都将是一个挑战。4.1.2.2在B.2节和C.2节中以更多的技术细节进行阐述），即无论在什么规格水平上，都可以通过把它们都建立在能量景观的子水平集上，来克服感觉运动一致性的艰巨挑战--保持来自学习模型的符号和它们的感觉所指与编程的任务表达有关。<sup>16</sup>

## 3 我们为什么需要它？

### 3.1 知识进步的基础

机器人正在变得更好吗？当然，他们的计算机和传感器是。如果我们设立比赛，我们可以很好地辨别出什么时候是赢家，衡量两次迭代之间取得了多少进展[.....]。98]，并且肯定能从非专业人士的事后嘲讽中认识到技术的不足之处[.99]。但为什么呢？不断地重新认识到，技术项目是非常困难的[]。100, 101, 102, 103]似乎并没有减少其数千亿的资本流入[.104, 105, 106]。但是，仅仅投掷更多的钱，用另一个测试取代一个测试，似乎也不能带来技术进步，超越那些很容易归因于改进的组件硬件或从不同领域引进的算法的进步。<sup>17</sup>

机器人技术的重要概念进展肯定是累积起来的，可以通过以下方式粗略地描绘出来在这一领域中，有许多具有里程碑意义的专著。运动规划的算法基础[109]由于贝叶斯滤波法在导航和制图中的应用，极大地丰富了运动规划的算法基础，并使之变得切实可行[110]，可以预见，这一领域的学习所产生的巨大影响将在一段时间内产生一个影响巨大的下一个总结性报告。对操纵机制的洞察力已经大大增强[111112]的。

<sup>14</sup>高二的控制工程师曾考虑过仅用位置反馈来稳定一个力控制的质量-弹簧-阻尼器系统，他们明白有必要用某些环境的内部表征来增强感觉线索，以完成某些任务[.88例6.2.1]。更一般的形式推理显示，对于任何能够稳定和稳健地拒绝干扰的控制结构来说，相关环境干扰的完整内部模型是必要的[. 89]。对几十年前分层排列的内部和外部（或次要）循环的重塑[90]揭示了这种机器人技术的“新方法”[]。87揭示了这种机器人学的“新方法”是不符合科学规律的，也是不致力于科学的。B.2.3节通过考虑一系列的设计设置，简要地重新审视了这类问题。在这个范围内，任务-环境配对的极限是“戒除感应习惯”[]的极端。91]完全通过开环程序，完全不需要测量世界状态--在这样的结构化设置中，可以保证和经验证明是成功的[92]。

<sup>15</sup>鉴于最近计算学习的胜利出现[95]，特别不幸的是，空间和时间的限制排除了对其对机器人学的重要性的任何近似考虑。它们在控制方面的巨大潜力已经被理解了几十年[96]。在建筑设计中的精确使用[]。97]，它们对机器人技术的价值至少是相当的；见下文脚注 16和B.2.3.2节，以了解有关这一问题的简短推测性评论。

<sup>16</sup>这些与感觉运动一致性有关的术语和概念在脚注m、脚注n和补充附录中叫出它们的文字中都有简要的技术描述。脚注k对这一概念在该更多的技术背景下提供了一个推测性的但简洁的一般性陈述。

<sup>17</sup>几十年来，经济学家已经明白，如果没有适当的科学基础，需求方的压力不足以产生新的技术。107，第14章。14]至少有一些经验性的证据表明，机械装置领域的激进发明可能是由基础知识的新进展推动的[108]。

动态运动的经验基础[113]通过引入非线性反馈控制的更正式的思想而得到了极大的加强[114]。但是对于一个学生来说，甚至对于一个有成就的实践者来说，可能并不清楚这些书之间的关系。事实上，目前似乎还不清楚如何建造同时受益于这三种传统见解的机器。特别是，其稀缺性最显著地阻碍了性能的物理资源在每一种中似乎都是不同的：用于导航的信息流，用于操纵的抓握力，以及用于运动的动力预算（尽管这三种都在每一种中出现）。这些不同种类的机器人能力是如何结合起来的？它们中的任何一个或所有的性能的基本限制是什么？

仔细提出并回答这些问题是一门科学学科的工作。形式上的综合--在设计建造之前就精确地陈述了设计必须具有的属性的假设--是更好的技术的一个深刻的推动者，即使它仅仅被理解为一个调试工具。如果一个正确的定理指出，一个特定的结构必须能够在某种环境中实现特定的任务，而经验证据与这个结论相矛盾，那么我们就知道，在假设中的假设和物理世界的普遍条件之间存在着某种差异。要么架构未能实现某些被列为必要的特定能力，要么环境未能符合假设类型的属性。

这最后一种可能性强调了明确提出的假设和它们促成的证明在智力上的重要性。没有这些假设，我们就没有办法有条不紊地深入研究使综合问题变得困难的细节。根据定义，环境模型是一个抽象的概念，会错过物理环境的细节。明确说明为了使架构合适，必须假定哪些环境属性，这就使该架构在实现任务中的作用具体化了。它可以明确基准测试的适当目标（例如，按照脚注中讨论的思路，促进关键的范围外设置的策划）。5)因此，这种抽象化在挑出哪些细节是必须考虑的，哪些具体的不利条件会带来哪些具体的设计挑战方面起着核心作用。

### 3.2 研究和教学的基础

建立机器人学科的一个后勤理由是，当代文明将学科奉为圭臬，在大学里投入大量资源，为人类知识的最广泛利益进行传播和推进的部门。这可能会改变--许多人预言，有些人已经找到了巨大破坏的证据。但为了目前的目的，通过研究型大学的部门表现，设想机器人学科的前景是很方便的。在这里，教学上的要求赋予了最大的智力利益。为新手提供最好的动力和证据，使他们能够深入理解。刚才讨论的各种基准专著之间的概念障碍，强调了他们令人印象深刻的作者和感激的读者都会从向机器人专业的大二学生解释他们如何结合在一起的义务中获得巨大的好处。

机器人系的下一个最重要的作用是雇用其替代者。虽然明智的教师任命的标准仍然是创造性的才能和智力上的雄心，但伴随着关于向什么方向推进以及为什么要这样做的争论在一个学科的成熟过程中起着至关重要的作用。在一个人最近发表的五篇文章的领域里，系里需要的不仅仅是一个，而是三个学者，这种喋喋不休的说法最终在总体上赋予了重要的知识价值，然而在当下几乎是无法忍受的。因为对未来的愿景必须进行争论，不仅仅是在拨款中以一滴为单位，而是以蒲式耳为单位--或者，如果运气好的话，在职业生涯中以吨为单位。随着机器人技术影响的加深，这些关于基本问题所在的重要争论在被压缩到相邻学科的模式中时，越来越被掩盖或扭曲。相应地，它们的潜在利益也就失去了，因为这个领域目前的一致性和未来的发明都依赖于它们。

如果计算机科学的历史拥有本文所敦促的机器人学的教训，那么该学科创建的最重要的作用将是对理论和实践的角力进行裁判。在一种令人信服的解读中[115]计算学科从专门的企业培训项目中脱颖而出(20世纪50年代)，教育大学颁布的软件工程实践(20世纪60年代)，不久又被封装在一个学术性的理论典籍中(20世纪70年代和80年代)，超越这个典籍是由一个持续到今天的学科问题解决信条设计的。紧张的循环，范围的扩大，以及关于课程和基础议程的共识的重新出现，这些都是学科的部门化身的特点，似乎为任何拥有加速社会影响的技术提供了必要的压舱物，而现在的论点就是这样的。



### 3.3 社会影响的必要性

无论是否准备好，机器人似乎终于要来了。它们已经改变了工厂。大公司的大胆宣布和收购预示着它们将在整个商业领域中以更大的自主权和更少的结构化环境中出现。但机器人主义者明白，这种声明是非理性繁荣的标志[ ]。116] 和危险的误导性产品广告 [...]。117].经过近十年的破坏性承诺，处于SAE J3016分类4级的自动驾驶汽车[ ]似乎不太可能安全运行。118在未来十年内，面对一般公路上的危险情况，自动驾驶汽车似乎不太可能安全运行，而第五级的完全自主运行还要等上几十年[ ]。119].当然，鉴于当地城市景观的巨大重要性，等级的概念是值得怀疑的，这种环境背景的重要特征还处于非常初级的阶段[ ]。120].同时，在结构化程度较低的环境中，机器人的部署并不具有任何可重复的模式。成功的应用来自于精心设计的、单人的、多人的团队努力，并且仍然没有以任何可预测的方式运作，在不同的环境中经常失败--或者更糟糕的是，意外地成功[ ]。121].

尽管累积了多起致命的事故[.....]。117]，商业和国家行为者已经在向人类和自然环境中释放被赋予了理解不充分、构思不严谨、明显危险的部分自主权的物理体现的代理。虽然在软件行业中并不缺乏类似的草率做法，但越来越多的证据表明，形式化方法的日益强大和实用性开始在至少是对生命至关重要的应用中发挥重要作用[ ]。122].机器人，只要它们是有用的，就必须被推定为属于这一类生命关键的应用。对这种技术的需求方压力正在迅速增长，许多潜在的客户不会想推迟受益，更不会想暂停使用明显有用的机器，无论其特征如何不完善。但是，目前还没有正确的机器人技术的正式方法，以备工业界寻求它，或社会需要它。

## 4 我们如何才能得到它？

合成科学是如此年轻，以至于要为机器人学调整正确的模式，既需要刻意的反省，也需要历史的洞察力。运动学，这门专注于机械运动设计的学科，是合成科学的第一个追求者[123].它在机器人学中发挥的作用几乎与计算学一样关键，但似乎不那么具有指导意义，因为它涉及到架构不需要内部状态的行为，而且似乎从未关注过物理极限。控制论在二十世纪中期的科学中突然出现，它提出新兴的信息流及其调节理论可以统一对动物神经系统、计算机、经济、机电电路、语言、心理病症和社会组织的研究[ ]。124].在这些令人叹为观止的负担的重压下--即使是其倡导者令人眼花缭乱的光辉（和脆弱的情感）也无法支持[ ]。125.在这些令人叹为观止的负担下，该领域被打碎成新的工程学科，其狭窄的焦点反映了其起源于动态控制理论的不同方面[ ]。126].拥抱数学合成，这些新兴学科--现代控制、通信和信号处理--通过拒绝对任何特定物理环境的承诺而逃离了合成科学的领域。合成生物学是机器人学的一个迷人的年轻表弟，它的基础似乎更加不稳定。还有一个例子是计算机科学。

从这个角度来看，机器人所面临的问题（以及人类必须帮助它们克服的问题）可以用代理人-环境状态的空间来表述，在这个空间中，代理人发起的行动促使其向新的状态过渡，以达到某些任务指定的目标子空间[127].不确定性是普遍存在的。模型的抽象意图是错误的，而信息是不完整和嘈杂的。因此，不可避免地，解决方案--向目标前进的政策( 4.1.2.2)--必须反复应用，要求代理人检查其进展，并根据预期和实际完成情况之间的不匹配重新计划，尽管它有嘈杂的感知( 4.1.2.1).这种反复的重新规划的观点定义了一个闭环，将问题的解决锁定在动态系统理论的环境中<sup>S</sup> (A)。第二节 4.1将这一动态系统的观点应用于机器人身体和程序设计的问题上，正如边栏标题《问题的挑战》3.中所总结的那样。4.2对一门新学科的诞生所面临的问题采取了类似的观点。

## 4.1 构建和测试机器人、理论和程序



要推测处理“问题”的方法，就必须<sup>3</sup>对其前因后果作一些说明。这一节讨论4.1.1了机构的问题（问题1），第二节提出了一个理论框架，该框架可能产生对工作语言的支持（问题）。4.1.2提出了一个理论框架，该框架可能会产生对工作的编程语言（Problem 2），而第二节4.1.3想象一下，在让机器人执行任务时实际使用这些语言会是什么样子（问题3）。

#### 4.1.1 机器人

随着商业化的机器人技术提高了其在更多不同环境中的操作能力，机器人设计和建造的学科项目也变得更加精细化。研究人员<sup>18</sup>研究人员必须明确哪些基本资源（如功率、信息速率或抓地力）--也许是一些更仔细的改进或新确定的基本限制，在本节中没有考虑。2.2.1-在他们的新设计中得到更好的再协调，否则他们的贡献就更适合由市场来评估，而不是由同行评审。<sup>19</sup>

在这种情况下，问题1可以更仔细地阐述如下。假设设计者得到了一些材料预算，其中包括具有已知和可靠的比例和分布特性的传感运动和抓握设备。现在，在所发现的环境中，所需的任务是如何决定一个形态，以及在空间和时间上分配给它的功率、比特率和握持资源的分布？本节4.1.1.1评估了开发具有良好特征的适当的机器人材料资源的前景。4.1.1.2节回顾了如何分配这些资源的已知情况。<sup>20</sup>

4.1.1.1 资源：动力、信息、抓地力和它们的交易  
在可预见的未来，机器人专家必须仔细研究特殊问题三要素的要求（2.1.3），以设计他们的机器人执行器。本文在第二章中提出了一个案例。

4.1.3.1使用模板的规定（C.2.3.1）§作为模版。

这样做的框架。最近关于弹丸发射对抗重力的工作[131]提出了一个典型的例子，说明如何对任务领域--这里是指单次跳跃或锤击--进行这种挑战性的分析。对动力约束（速度-扭矩曲线）、顺应性非理想性（弹簧惯性）和抓握限制（锁扣几何）之间复杂的相互作用进行建模，以实现在一系列环境（负载质量）下的发射能量，从而获得对该任务领域的哪些区域可能需要或足够的动力系统的基本洞察力[ ]。[131].类似地，第一个垂直动态攀爬机器人[132]是通过生物启发模板的洞察力实现的[133] 揭示了平行弹簧的必要性，以协助可用的马达特定功率来支持机器的三个数量级的负载增加（尽管是在假设完美抓地力的情况下的简化）[ ]。[134].

<sup>18</sup>时间和空间的限制再次将本文的范围限制在对通用环境的通用机器人架构的考虑上。例如，这种限制性的范围完全忽略了一些关键的应用领域，如针对物理[128]或心理学[...129]人与机器人互动的设计。

<sup>19</sup>同样，关心推进其技术基础学科的机器人公司必须愿意向广大研究界公开（有适当的保密保护）允许测试新理论的硬件接口。

<sup>20</sup>另一个超出本文范围的重要的、迷人的话题是用于传感的新材料的开发。例如，鉴于嗅觉在动物认知进化中发挥的巨大作用[130]，令人瞩目的是，机器人学还没有找到一种方法来广泛整合一些相应的技术。

## 问题的挑战 3

解决问题3是与解决其前因后果相联系的。在建造和编程机器人方面的进展要求对如何推理它们的设计有一个具体的看法。

### 问题 1

在使用任务-环境模板来推理资源需求方面正在取得进展（

§4.1.1.1）和透明度--灵巧的权衡，在部署它们时（§4.1.1.2）。悬而未决的挑战包括寻求基本的限制，以功率、比特率和握力（§4.1.1.1），并正式确定原则将可用的资源分配到各部门的代码设计的例子身体的内部和表面与环境的界面（§4.1.1.2）。

### 问题 2

在机器人混合动力系统的定性研究方面取得了进展（§B.1）。

4.1.2.1）产生的共识工作界面模型（§B.1）和随之而来的接地符号的前景（§4.1.2.2）。突出的问题是挑战包括推进和深化分类帐户的模板组成（§4.1.3.1），并对其进行重新加工，以确保相关功能程序的经验效用明的语言（§4.1.3.2）。

### 问题 3

一个定义明确的任务域概念可以被认为是由现有的基础构成运算符（§4.1.3.1）对可用的基础符号词典（§4.1.2.2）通过所产生语言（§4.1.3.2）定义的，关于环境类型的推理似乎是建立在进一步的为机器人的信息界面建模的进展（§B.2.3）。

在这种任务-环境配对的背景下，对抓地力的需求似乎更加复杂，要对其进行表征和交易<sup>21</sup>。作为一种超材料特性，抓地力似乎在二十年前的合成干胶文献中得到了最仔细的研究，可以说是由发现壁虎脚趾附着和分离的范德瓦尔斯力机制开始的[66]。主要的优点包括强度（通常以表面能量来衡量）和可逆性（相关的数量包括时间率和负载-预载和反转比率的大小）[]。70]。但许多额外的标准，如耐用性、结垢倾向与自洁性，以及进行许多相关测量的难度，使其物理特性大大复杂化[]。70]。工程师们日益增长的洞察力源于仔细了解的生物灵感[136, 137, 138]以及改进的材料和制造方法，通过巧妙地安排分层机制，在快速可逆的高强度键方面取得了明显的进展。

[139] 利用各向异性的顺应性[140]。相应地，环境的affordance [141]的抓地力至少引起了对其本地组成的相当程度的关注[]。142143] 或设计

[144]以及通过远程预测[]或直接本体感觉[]进行评估。145]或直接的本体感觉[146147]。似乎有理由认为，随着任务-环境轴的这两极的进展，迫切需要的握力特征可能正在出现。

相比之下，同样重要，但在机器人技术中几乎完全被忽视的问题是，抓地力、功率和信息率之间的交易是基本的还是仅仅是目前可用的（甚至可能是糟糕的）技术的人工制品。显然，所有这三种资源都是结合在一起，并且在机器人对任何一种资源的利用上，都是同时协调和共同限制的。更大的力量意味着有能力更迅速、更安全地抓取和释放特定物体表面的任何附着力。相应地，摩擦系数较高的基质会产生更广泛的地面反作用力锥，从而增加姿态移动距离，给定的驱动力预算可以增加运行体的动能。同时，需要更及时的接触信息来增加相同动力系统和牵引条件下可借给身体的冲力。或者，同样是对等的，抓得越牢，从本体感觉上收集到的物体质量分布信息就越快。机器人学科的一个紧急议程是揭示这些资源之间的关系和它们最终的物理共限（C.1.1）。

计算机工程师用能量换取信息的能力是公认的[19]。文献中开始出现了与机器人技术相关的类似信息-能量速率限制的性质和影响的初步探索。经验观察表明，质量特定的力（结合强度）而不是功率从根本上限制了执行器的工作率[148]。然而，机械功率和快速接收、计算和传输的信息之间的制约性相互作用，已经开始在中尺度上被确立为影响输出端口[76]和输入通道[149]。

4.1.1.2 分布：顺应性、模块化和代码设计 顺应性的理想特征是无记忆的力-延伸函数，或者说，一个标量值的势能函数。无记忆一词意味着没有内部状态；因此，在没有任何内在时间常数的情况下，理想的顺应性元件不会产生任何功率限制，可以支持任意快速的能量流而没有损失。弹簧是好的[150]：考虑到对驱动力不可避免的限制，设计者有强烈的动机在体内引入顺应性元件，这些元件可以在执行器从能量供应中缓慢提取焦耳和负载与目标质量状态所需的动能转移相关的快速时间常数之间进行转换。然而，顺应性的引入通常会降低本体感觉界面的信息率：降低透明度（在其通道中）和灵巧性（通过其端口）。<sup>22</sup>

由于一旦与惯性负载耦合，顺应性元件就会极大地改变过载的情况，所以通道就会变得更加复杂。所有的系统时间常数。对透明度的渴望（执行器能够快速、准确地读取负载的状态）促使了直接驱动（既不是齿轮也不是顺应性）机器人技术的引入[]。73]，极大地提高了比功率，尽管代价是对运动系统的比力进行了棘手的权衡[151]。在端口，串联顺应性长期以来一直被理解为可以提高输出力的准确性[]。152]，但其代价是严重的带宽损失[153]。另外，平行顺应性可以

<sup>21</sup>关于抓取的讨论是一个特别有启发性的背景，可以理解资源要求只能根据任务和环境的配对来描述。例如，运动限制了动物对其显著的抓手的使用，同时，已知动物的步态会因基质的摩擦和粘附特性而发生巨大的变化[]。135]。

<sup>22</sup>再一次，由于篇幅的限制，本文无法对所谓的软体机器人进行适当的处理--这是一个流行的术语，指的是通过材料科学和工程方面的最新进展，系统地引入可调整的顺应性。

可用于放大力的大小，但只在工作循环中特别指定的阶段使用[132]，限制了可以执行的任务的普遍性。

透明度（本体感觉通道的准确性-带宽权衡）和灵巧性（通过本体感觉端口的准确性-带宽或幅度-时间权衡）的丧失，促使人们考虑感官运动的专业化，例如，在身体核心部位（即质量中心的近端），可将顺应性与高功率驱动联系起来[154]，在那里，灵巧和状态信息都不是关键，而高度灵巧、敏感、低功率的驱动可以放在身体与环境相遇的外围（即质量中心的远端）[.....]。155].相比之下，可组合资源的吸引力促使人们提出了可编程性[156]和可重新配置[]的建议。157]的建议，其中一些建议源于在熟悉的机电一体化的传统中[158159160]和其他来自微电子机械系统的传统。161]或材料科学[71].生物形态学的层次性、多尺度性给足以实现它的工程设计带来了决定性的优势[]。138]，增加了寻找构成形态或功能的简单配方的挑战。

如何合理分配机器人的物理资源以在一类环境中执行一系列任务的一般问题被称为代码设计问题（C.1.2）。这个问题的一个更有约束性的版本受到了常用的preflexes的启发[162, 163](B.2.1)所观察到的，旨在设计被称为形态学计算的东西(C.1.2)。加快提出和解决这类设计问题的进展，有望推动该领域对如何提出问题的洞察力。3.

#### 4.1.2 理论

B.1.1节的第一个方程所表达的工作力学使任何关于机器人的推理都充满了对动力学研究。采纳Newell和Simon的迭代版本[.....]的一般问题解决公式，进一步意味着闭环动力学。127]的一般问题解决公式，进一步意味着由反馈产生的闭环动力学。<sup>23</sup>如果没有一般的信息接口模型（B.2.1），现在可以方便地假设这种反馈采取的形式是将传感器读数的整个历史的一些函数分配给执行器。

这些假设带来了动态系统的理论（A），并由此带来了拓扑学的工具，它与机器人学的关系大致类似于逻辑学与计算机科学的关系。源于Poincaré对天体力学的研究[164]，拓扑学通过动力学（§B.1）与机器人学接触，对不确定性和成本（§B.2）提出内在的、稳健的说明。4.1.2.1)，并<sup>24</sup>提出接地符号的形式化特征（§4.1.2.2)。

4.1.2.1 不确定性和成本的内在模型 机器人与环境的接口所依据的模型和测量的不确定性，促使人们考虑链[166]--具有任意的、小的、但任意持续的误差的动态系统的解决方案§(A.1)。从基础上看，这种完全非结构化的不确定性模型非常有吸引力。它是内在的，因为不需要进一步的信息模型（B.2.1）。令人高兴的是，链的正式概念可以被扩展到混合环境中[167]，以及随之而来的稳态行为的版本[168]，至少对于从参考文献[]导出的工作界面模型（B.1）的一大类物理上可行但行为良好的版本而言。§169].然而，对不确定性的有用的结构化表示，如参数化的模型系列，导致了也可以纳入有用的混合系统模型的differential inclusions []。170].似乎迫切需要确定哪些经验上有效的机器人模型承认或不承认什么版本的链，并伴随着良好的稳态保证。<sup>25</sup>

这些保证包括存在一个内在的标量值的李亚普诺夫函数，该函数为流量必须沿途减少到它们的稳态吸引集（§A.2）。虽然不存在典型的

<sup>23</sup>例如，如果考虑到被动的政策必须在执行前构建，而深思熟虑的政策将不可避免地以某种方式迭代，那么在当代机器人学的成语中根深蒂固的深思熟虑和被动规划之间的区别就变得模糊了。在最好的情况下，人们可能期望这些类别描述一种关系，在这种关系中，政策对于它们呼唤的更精细的时空尺度的其他政策来说是深思熟虑的，而对于反过来呼唤它们的更广泛的时空政策来说则是反应性的。

<sup>24</sup>由于空间和洞察力的限制，本文的重点是B.1节中规定的机器人与环境之间的工作交换。这是以更详细的不确定性和成本模型为代价的，这些模型的仔细表述有待于信息接口规范的开发（B.2）§。当然，与此同时，随机过滤和控制的方法[110]和优化[165]都有理由深深扎根于机器人的实践中。它们的正式整合对于最终的学科来说无疑是至关重要的。在本节中，我们将简要提及优化的观点。4.1.2.1.

<sup>25</sup>在这里和整个文章中，稳态是一个方便但有可能误导的术语，指的是动态系统表现出来的稳健的长期行为。[A.1](#)节简要介绍了建立这种吸引集的出现和持续的强大理论，这些吸引集的复杂时空结构远远超出了这个术语的口语化使用可能直观地暗示的整齐的平衡或振荡行为。



一般来说,选择这样的函数,当转到混合机器人动力学的设置中时(B.1),假定它们将与物理总能量密切相关是合适的[171]。本文采取了一个推测性的步骤,即简单地假定有这样一个自然的类似能量的函数,来扮演特定动力学的任何版本的李亚普诺夫函数的角色(A.2)。然后,在平滑的情况下(A.3),其沿系统运动的导数将产生一个机械功率(瞬时能量消耗)的表达。此后,我们可以简单地将这些标量值函数的各种版本称为能量景观,将其标量值下降率函数称为功率景观。

4.1.2.2 通过基础符号从目标基元到任务 机械行为的模型(B.1.1)描述了时空连续的、因而不可计算的量(能量和信息流)的相互作用;但是语言是在可计算的字母上定义的。有了前面讨论的工具和概念(4.1.2.1),我们就有可能解决这个问题的基本障碍。3信号和符号之间的鸿沟(C.2.1)。我们的结论是,能量景观的山谷--由其量子水平集在感知上标记的吸引不变流形的盆地<sup>s</sup>—是可行的物理基础符号的候选人。令人高兴的是,这些符号化的目标基元也准备好了实际的任务规格,如下所示。

历史上,机器人任务仅限于在假定的已知工作空间内进行运动规划--最初是欧几里得空间,只需要机器人运动学模型[172],随后是在被固定障碍物刺穿的空间中进行刚性放置[173]。因此,路径规划是机器人学的第一个算法问题,并且仍然是该领域的核心问题[174]。确定性解决方案的计算复杂性必须在自由度上呈指数级增长[175],促使人们转向基于抽样的计算方式[176],这只能是概率上的完整。然而,在给定的初始-最终配置对之间寻找自由路径本质上是一个拓扑学问题,其复杂性可以通过在配置对空间上的词库的cardinality来量化,其中每个符号是一个连续的路径规划函数[177]。现在不可避免地需要重复重新规划,这迫使我们用动力学术语重新表述:迭代地图或矢量场流,将(几乎)任何初始选择带到所需的最终配置上[178]。

这种重述首先用人工势能来表示[179],并随后在原则上证明了任何运动规划问题的几乎全局动态解[180]。<sup>26</sup>人工势能盆地的顺序组成[184](C.2.3.1)是由继承自人工智能的预像反链的概念[185]继承自人工智能[186]。使用人工潜能函数作为规范的建议机器人应该向环境呈现的有效阻抗[187]代表了通过参考动力学而非参考运动对目标基元进行编码的重要平行起点(C.2.2)。<sup>27</sup>这些想法可以扩展到为大量的机器人动力学模型(如B.1.1节的第一个方程所模拟的那种模型<sup>s</sup>)生成人工势能函数的算法上[189]。因为通过对矢量场规划器所揭示的盆地邻接代数的诉求,可以极大地降低符号操作的组合复杂性[190],<sup>9</sup>即使仅仅从计算效率的角度来看,这种任务规划的方法似乎也是值得拥护的。在这种观点下,似乎迫切需要解决拓扑学上的困惑[182](见脚注26)的任务域,与正在进行的表征拓扑复杂性的进展相平行[191]。更广泛地说,盆地的相邻或断开揭示了由特定环境<sup>a</sup>ordance产生的过渡性任务的内在拼写规则[19219394]或任务关系[194]的方式,在B.2.2节中有所触及。

现在出现的问题是,如何在B.1.1节的第一个方程所给出的工作机器人的动力学中建立这种规划矢量场。按照其起源的方式来设想,作为人工势场[179],相关的准静态梯度场的<sup>m</sup>目标和反目标可以通过求助于开尔文勋爵关于耗散二阶系统渐进地达到其势能的最小值的见解,立即被呈现为动态的基础符号[171195]。然而,运动规划

<sup>26</sup>这里,术语“几乎全局”意味着缺陷(即吸引最终目的地的盆地的补充)在配置空间中具有空的内部。在典型的应用环境中(事实上,除了病态的疯狂情况;M.D. Kvalheim,手稿正在准备中),盆地与它们的吸引集具有相同的同构类型[181]。因此,单点目标通常有可收缩的盆地(拓扑盘),不能覆盖整个不可收缩的配置空间。这就促使了必须要有多少盆地才能做到这一点的问题,如参考文献[182],在参考文献[183]中被创造为拓扑学的困惑。[183]。

<sup>27</sup>这一观点在动物运动科学中已经有了足够的影响力,并在人类康复治疗中取得了临床应用[188]。参见脚注30参考动物运动科学文献,这些文献将这一概念进一步扩展为运动基元的构成,其方式类似于本节中为机器人学所描写的方式。4.1.3.1。

文献已经适当地强调了运动动力学计划的重要性[196] 带来了具有专门定制的瞬态特性的轨迹。类似的定制属性可以强加在规划场上, 这些理想的瞬态属性由适当补偿的工作机器人动力学密切接近[]。197198199], 如C.2.2.3节所示。

补充附录还简要介绍了从成本函数中直接生成参考动态的替代方法[200] 使用最优控制的方法 (C.2.2.2)。对通过直接参考动态生成任务的偏爱出于多种考虑。但是, 驱动力来自于这样的结论: 参考动力能更好地服务于下文第1节中所阐述的组成目的。4.1.3.广义上讲, 在深层规范层次的任何一个层面上诉诸最优方法的危险在于其狭隘的性质。<sup>28</sup>

### 4.1.3 编程

本节考虑了在机器人与环境的最基本界面上使用功能性编程语言的前景。本节 4.1.3.1讨论了刚才介绍的接地任务规范基元的接地组合的可用性( 4.1.2.2).第4.1.3.2节探讨了是否有一种类型理论能够将这种组合视为形式化的组合器[29], 其评价在如此组合的任务规范的形式属性中具有操作语义。<sup>29</sup>

4.1.3.1 任务规范的构成 比本节的运动规划设置更广泛的领域 4.1.2.2似乎不仅需要在集合理论目标方面的规范, 还需要在参考动态方面的规范。生物学中的许多例子表明, 动物解决自由度问题[202], (C.1.1)通过使用低维的抽象模板[203](C.2.2).更广泛地说, 以链为基础的目标符号( 4.1.2.2)代表了内在的稳态行为, 而机器人的大部分工作§都会涉及到过渡性动作。因此, 至少, 编程工作的议程似乎需要一种语法, 以建立包含动态基元组合的行为规范。要求这些组合是有基础的, 就是要指定组成任务基元的哪些形式属性被组合的结果所继承。

将参考动态的构建和嵌入 (C.2.2.3) 理解为一个层次性的组合 (C.2.3.1), 体现了锚定模板[]的概念。203]--一个可以通过基于物理体现的感觉运动行为的符号来表示和组成的行为模块( 4.1.2.2).在这里§组合的保证属性是, 所产生的高维锚定空间中的行为向低维子空间收敛, 其动态变化是远离模板的坐标[]。204205].

从本文所追求的议程的角度来看, Raibert的跳板[113] 为二十世纪的机器人学贡献了最重要的进展。一方面, 他们对动态平衡的依赖(稳定的极限循环而不是单纯的点吸引器) 强调了能量在机器人任务中的主要作用。另一方面, 他们开创了平行组合的经验性候选方案 (C.2.3.1)。从纯粹的形式上看, 没有什么比这更简单的了: 两个函数的并行组合只是把两个函数对应的集合的笛卡尔积作为域和共域, 并对它们进行独立评估。这个想法的一个适当的阐述版本可以用来定义混合动力学类别上的产物[167].然而, 在机器人学中, 正如在任何机械电路的设置中一样[39], 连接两个物理系统不可避免地会产生交叉对话。一个紧迫的问题是要表达更宽松的[206]的并行组合, 以区分安全的和有害的交叉交谈[]。207, 208] 的分类设置 (§C.2.3.1)。在这里, 基础要求是产品系统的稳态动力学被保证包含在构成者的稳态动力学的乘积中。

一个使用Lyapunov子水平集的顺序组合版本[184]也被分类表达了出来[167].然而, 目前的工作版本只定义了与链式分析产生的吸引子相关的盆地, 而不是与通过光滑吸引集建立的双曲吸引集相关的盆地。

<sup>28</sup>考虑一下简洁的评价: "过早的优化是编程中所有罪恶的根源 (或者至少是大部分)" [.....]。3, p. 671].在VLSI革命前夕, 层级优化专家对组合方法的反对, 也同样从历史的角度雄辩地论述了这个问题[201].

<sup>29</sup>读者会注意到, 这与本节中所敦促的规范语言的深度层相差甚远。2.2.2.作为回应, 作者将再次为一个年轻的领域的不成熟性辩护, 以应对那里概述的巨大挑战。有可能的是, 在这个直接环境界面层面上出现的语言将被视为类似于计算机的汇编语言, 在此基础上可以建立更抽象、更有用但仍有基础的语言 (§C.2.3.2)。



分析, 如图所示。1补充附录(C.2.3.1) 中的分析, 以及强大的、精致的分岔理论的应用[209] 的分叉理论[.210]。这是一个主要的动机, 以了解如何以及在什么条件下混合动力学类别的参考[167]的混合动力学类别如何以及在什么条件下可以被细化到与更高分辨率(但更僵硬)的吸引流形一起工作(A.3)。这里的基础要求是, 成对序列的稳态动力学包含在成对的第二个系统的稳态动力学中。使用相关能量景观的子级集来强制执行这一特性, 可以产生一种有效的手段来串联高能量的过渡性演习[211]。

**4.1.3.2 基础类型理论** 刚刚讨论过的组成框架, 现在要重提一下章节中简要强调的从模块到功能程序的概念性通道。2.2.2建议从计算机科学移植到机器人学的类似发展中(C.2.3)。<sup>30</sup>最重要的是, 模块的目的是在不同的组合中被重复使用, 促进从具有已知的、可靠的属性的较简单的成分中构建更复杂的行为。正如上文所暗示的, 这相当于要求对基元和它们的分类理论[216] 处理基元及其组合的要求。这一要求是以一种不可避免的联系方式出现的, 在这种联系中, 类型内在地从类别中产生, 同时又内在地定义了类别[。217]。换言之, 类型理论的物理基础是通过其范畴理论模型建立的。

机器人学的类型理论早已被提出, 但其相关的类别通常仍未被提及, 因此也没有基础。例如, 函数式反应式编程的信号[218]在实数中取其域, 有一个未指定的(显然是任意的)码域; 因此, 用于组成其用户可访问的信号函数的组合器没有物理上指定的操作语义。因此, 他们吸引人的广泛的、优雅的类型理论[.....]适用于任何特定的机器人架构。219] 在任何一类环境中对任何特定的机器人架构的适用性是不确定的。

相反, 长期以来, 关于以物理为基础的机器人运动控制组合的符号规范的文献[. 220, 221, 222]产生了一个版本, 以上下文自由语法的形式呈现[.223]。在乔姆斯基层次结构中定位规范语言的复杂性对于管理表达的难易程度和评估的成本之间的权衡肯定是很重要的。然而, 这并不能替代对指定行为的描述。如果没有对这种语法构建的数学对象进行分类分析, 我们猜测其操作语义与任意混合系统的操作语义大致相当, 后者最有趣的定性属性通常是无法确定的[224]。

一个相反的行为规范方法来自于对纯语言表述的诉求。对于将B.1.1节的第一个方程中给出的耦合的混合机器人-环境动力学描述转化为模态逻辑的代价, 求助于模型检查可以得到以相同语法写出的计划和控制器的计算上有效的行为验证(即正确性保证或故障诊断)[225]。在乔姆斯基的层次结构上, 已经为用更有表现力但计算成本更高的上下文自由语法写出的模型、任务和策略开发了类似的验证工具[ ]。226]。结构化自然语言的形式化界面[227] 和人类自然语言的概率接口[228] 进一步丰富了表达的便利性。这种机器人编程方法的一个实质性进展是对整个问题三要素的明确表示: 结构、任务和环境。一个核心的挑战是接地的差距--计算的复杂性[229]和僵硬性[.230]--面对任何物理世界的语言表述[。231]。

已经为当代流行的机器人操作系统开发了非常实用的函数式编程环境[。232], 而且越来越强大的自主高级任务规划器已经用这种工具的更正式的版本建立起来[. 233]。剩下的就是用物理基础上的分类生成的类型理论来锻炼它们(C.2.3.2)。这里出现了一个新的挑战, 即确保形式主义服务于安全和有表现力的任务规范的目的, 而不是产生无用的、不切实际的诺斯-特鲁姆。这只能通过设计的假设和经验检查的反驳之间的不断相互作用来实现。

## 4.2 建立和深化合作

这篇文章的重点是, 需要更深入地接触作为机器人技术基础的物理、数学和目的论基础。 在文章的结尾, 我们可以看到, 我们有必要向外延伸。 协议---

<sup>30</sup>在动物运动科学中也可以发现类似的概念通道, 它从识别肌肉协同作用[212], 然后是多模块[213] 到形成构成性假说[214], 并最终形成其临床应用的前景[。215]。

因此，第1节 4.2.1概述了机器人学在大学中的跨学科关系的重要性（包括建立一个明确的部门身份的重要性）。4.2.2敦促利用这一平台来领导科学和社会中更大的公平和多样性。

#### 4.2.1 机构

前面的讨论已经充分说明了其他学科在机器人技术中必须发挥的关键作用。事实上，今天该领域的主流概念似乎是一个技术温床，电气、机械和材料工程师都可以与计算机科学家合作，产生奇妙的装置。当然，对这些其他学科来说，机器人技术在激励他们最喜欢的专业方面可以发挥多么有价值的作用是显而易见的。由于本节中提到的原因 3.2在大学里，如果没有明确的部门身份，其他单位的加入并不一定能推动该领域的发展。

重新审视戈恩[234]在半个多世纪前提出的关于“计算机和信息科学”学科的建议。这个三方论点规定了知识的重点（机械语言），通过列举其相邻的学科（电子工程、语言学、数学、哲学和心理学）来描述其边界，并对部门启动的政治进行了规划（逃离

邻居部门对其服务课程的需求所推动的）。<sup>31</sup>正如刚才所说的，本文几乎只关注第一个问题。戈恩的第二个论点似乎值得在更接近机器人系广泛建立的时候独立处理。还有许多其他相邻的和更远的学科，都对机器人学有所贡献，并从中受益。除了明显的

在计算机科学、工程和数学等相邻学科中，本文一直提到与生物学的重要相互作用。<sup>32</sup>与历史和哲学也有类似的深刻联系。机器人学的触角显然延伸到了人文科学的更深处，也遇到了艺术。所有这些联系都是建立机器人学学科所需要的。

#### 4.2.2 人

吸引最好和最聪明的年轻人当然是任何领域最重要的驱动力。但是，当代机器人学的研究人员主要来自那些在性别、种族和民族方面最臭名昭著的同质化的既定学科，因此将继续支持创新的步伐。<sup>235</sup>直到更多的努力能够实现更大的多样性。持久的、自相矛盾的[236]和有害的[237]机会不平等的性质已<sup>33</sup>被记录在每一个步骤中[]。<sup>239</sup>漏水的STEM管道的每一步都有记录，包括甚至在博士阶段的导师指导方面的差异[]。<sup>240</sup>，在越来越高的级别上达到了越来越不相称的数量[]。<sup>241</sup>越来越多的证据表明，无论是具体的公立学校的重新设计<sup>242</sup>越来越多的证据表明，无论是具体的公立学校的重新设计[]，还是在引出竞争时诉诸于竞争[]。<sup>243</sup>越来越多的证据表明，无论是具体的公立学校的重新设计[]，还是在引起竞争时诉诸竞争[]，都没有实质性地扩大获得成就的机会，这促使人们越来越多地寻求新的活力，有意识地招募现有的社会[244]和法律[245]结构，以打破单纯的教育改革所不能解决的许多相互交织的障碍。

但是，机器人技术预示着一一种独特的社会影响，该学科必须接受并提供给人类利益。一方面，紧迫的道德问题[246]制造业工作岗位50年来的急剧下降和[似乎随之而来的[]]复杂化。<sup>247</sup>一方面，迫切的道德问题[]加剧了制造业工作岗位50年来的急剧下降，以及收入与GDP增长的脱钩[]。<sup>248</sup>迫使自动化技术的创造者认识到其隐含的政策伴随物[]。<sup>249</sup>并变得更加深思熟虑

谈到他们的社会影响[250]。<sup>34</sup>另一方面，该技术是不可抗拒的魅力所在。因此，在所有学科中，机器人学的魅力在于其内在的吸引力，这一点从人类几千年来对无生命物体的梦想和恶梦中可以看出。机器人学研究人员有责任在招聘、保留和晋升方面利用这种大众的魅力，以确保他们的参与。

目前代表性不足的群体。除了知识进步的承诺，我们还需要最广泛的

<sup>31</sup>看来，这第三个论点，即戈恩对服务课程的明智呼吁，作为从殖民化邻居那里宣布独立的基础，仍然是一个诱人的幻想，等待着机器人技术对社会的更大渗透。

<sup>32</sup>大量的困惑涉及到动物与机器人的关系，以及它们的并置在推动这两门科学方面所要发挥的作用。一个适当的评论至少需要一篇与本篇幅相当的专门文章。

<sup>33</sup>这些不平等现象主要针对美国国内人口进行了仔细研究。历史上美国与国际科学、技术、工程和数学精英的接触所带来的强大的智力优势，以及他们所带来的创新的文化多样性，并不能减轻美国国内人口的损失。<sup>238</sup>历史上美国接触到的国际STEM人口的精英和他们带来的创新推动的文化多样性所带来的强大的智力优势，并不能减轻因错过得不到服务的本地人才而造成的损害

。

<sup>34</sup>其他观察家强调了几个世纪以来技术驱动的工作中断导致更高的生产力和加速创造新工作的经验[]。251].然而，社会排斥可能仍然不是由就业的全线撤退引发的，而是由无法教育劳动力以跟踪不断上升的高端需求引发的[]。252].

可能的学科专家的多样性，以集体平衡自动化的好处和人类工作的未来，同时确保我们蓬勃发展的技术能力有助于对抗社会不公正，并在不同文化和阶层之间传播这些好处。

## 5 结论

下面的“未来问题”列表总结了本文提出的总体性的下一步措施，这些措施对于推进机器人学的基础尤为迫切。但这篇文章首先是为了帮助新的研究人员通过利用排列组合、探索联系或揭露沿途观察和论证所引入的谬误来磨练他们的建议。如果这里的某些声明影响了某人的下一篇科学论文的引言--最好的是，可以想象，影响了其结论，以支持或反驳这些众多意见中的一个意见，那就更好了。对于这样的读者，希望补充附录能提供更有用的具体攻击目标，而引领它的摘要要点列表旨在概述这里提出的概念性问题和解决这些问题的技术机制之间的联系。更广泛地说，如果这篇文章能够刺激其他研究人员，不管是年轻人还是老年人，阐明机器人学的连贯性基础，改进、质疑或直接拒绝并取代这种说法，从而更好地促进可操作的基础研究，那么这篇文章就达到了很大一部分目的。从长远来看，无论如何都会出现一门合成的机器人科学，而回顾一下吸引人们关注的问题和困扰前学科时代劳作者的困惑，至少在历史上是有趣的。

## 披露声明

如文中所示，这篇评论反映了作者对整个机器人领域的个人看法--不一定是它今天存在的样子，而是它作为一门知识学科可能出现的更清晰的形式。作者断言，对所有引用的文章的讨论都是准确、公正和不偏不倚的，并且不知道任何可能被视为影响其在本评论中的客观性的隶属关系、会员资格、资金或财务持有情况。

## 鸣谢

完成这篇论文所需的时间和思考由海军研究办公室拨款N00014-16-1-2817支付，作为国防部负责研究和工程的助理部长的基础研究办公室赞助的范尼瓦尔-布什教师奖学金。该材料最初是作为2011年亨利-佩恩特讲座向马萨诸塞州理工学院机械工程系的教职员工构思和发表的。我非常感谢Hari Asada教授和他在麻省理工学院的同事，他们邀请我发表演讲，并在当天晚上提供了生动的反馈（事实上，在之前和之后的许多讨论过程中），大大推进了我对这些想法的思考。我向以色列理工学院自主系统项目的教师们发表了高德曼2012讲座，这是发展这些主题的下一个机会。

我感谢Elon Rimon教授和他的Technion同事在与这些想法有关的另一个非常刺激的一周（以及之前和之后的许多年）的交流中的亲切接待。

## 未来的问题

1. 推进新兴机器人技术的能力和安全所需的科学基础将需要确定基本的生理极限，以及描述各类机器可望在其中适当运行的环境类型的模型。
2. 要以这些基础来支撑这些技术，需要在假设的类型理论之间进行持续的相互作用，以便在环境中为架构分配任务，并在未定的环境中对物理机器进行经验研究，以支持这些理论或重新确定它们。
3. 促进这种知识进步所需的学科发展包括建立能够与相邻学科进行系统合作的机器人系，并由最多样化的思想家组成，而人类与机器人的古老结合有望实现这一目标。

那些对我的工作有最基本了解的人已经知道，在我的文章中，在这里或其他地方找到的任何好的想法的来源，都是我的个人教训，以及在我周围创造的集体文化，这些都是我在近四十年的职业生涯中有幸成长起来的惊人的博士生和博士后研究员。我的许多杰出的合作者（学生、同行和长辈）都对这里讨论的具体技术见解负有责任，我已经试图通过适当的引用来确认这一点。<sup>35</sup>我的老师，K. S. Narendra教授，教我如何思考。

---

<sup>35</sup>我特别感谢Sam Burden、Jean-Luc Cambier、Paul Gustafson、Matt Kvalheim、Matt Mason、Lisa Miracchi和Vassilis Vasilopoulos的详细评论和建议，这些评论和建议大大提升了本文的质量。

# 补充附录

本材料是对《世界日报》正文的补充。

Koditschek DE. 2021. 什么是机器人技术？我们为什么需要它，我们如何才能得到它？Annu.Rev. Control机器人。Auton.Syst. 4. In press. <https://doi.org/10.1146/annurev-control-080320-011601>

这篇文章的目的是提供一个技术性更强的概念和书目重新来源的概述，这些概念和书目重新来源是文章中确定的以下问题。

具体来说，本补编对动力系统理论的观点进行了支持性的（但必然是极其简略的）概述（A），对机器人与环境的接口模型进行了一些详细介绍（B），对如何推动机器人学科的发展进行了进一步的详细介绍（C）。

## A 动态系统

一个动态系统通过一个时间模型对一个空间模型的作用，理想地描述了进化过程[253]。对于机器人学感兴趣的所有动态系统变体，对内部状态演化和相关的输入/输出（行为学[]或语言学[]）有不同的看法。[254]

观点。或语言学 [8]) 的恰当性 (§B.1.2)。本节重点讨论内部模型

机器人学的三个主要动力系统理论在其空间和时间模型方面各不相同。作为通信理论基础的离散有限自动机[8]需要一个离散的时间模型和对称的（即有限的或最多可数的）空间模型，拥有一个精确校准的伴随输入输出的行为表示。拉格朗日系统[255]的工作运动链[.....]需要一个连贯的、连续的运动链。[67]需要一个连续的时间和空间模型，该模型具有拓扑学上的典型分解符号 (A.1)，但缺乏一个完善的相应的输入-输出理论 (B.1.2)。混合动力系统，在机器人学中产生于与环境的接触和断裂[169]，叠加了一个诱导性的动力学家族，需要一个以事件为标志的离散时间模型，在B节中讨论，其质量特性仍然是一个非常活跃的研究领域。A.1节简要地概述了一个粗略的，但非常robust的

## 总结要点

- 1.迫切需要对材料特性进行研究，包括物理实验和推理。功率、信息率和握力的共同极限 (§4.1.1.1);和一致的力学模型，用于Hybride系统 (§B.1.4)。
- 2.迫切需要进行研究以帮助推动D-信息接口模型的开发 (§B.2) 包括制定必要或充分的条件观念。对于内部环境的表述，在机器人结构 (§B.2.2)；计算上的electec-环境的几何学抽象模型。或工作能力 (§4.1.1.2)；以及计算能力有效的测试，保证了产品的质量特性。当代学习技术 (§B.2.3.2)。
- 3.迫切需要对混合系统的特性进行研究，包括哪些模型可以支持哪些版本的经典特性，如：。康利的基本定理 (§4.1.2.1)；拓扑学-哲学上的困惑 (§4.1.2.2)；结构稳定 (§A.1)。平滑的李亚普诺夫函数 (§A.2)；以及轨道去构成和双曲性 (§A.3)。
- 4.迫切需要对分类属性进行研究，包括扩大适用性，以捕获更多的物理elective规范，如。宽松的平行组合与交叉对话 (§4.1.3.1)；具有渐进性的层次构成阶段 (§C.2.3.1)；以及增加hy-的调色板。br /> 构成性操作符，以实现有基础的类型理论，可以满足更抽象的高层任务具体化语言的更大表达能力 (§C.2.3.2)。



全球稳态理论，它依赖于拓扑学工具。<sup>a</sup>A.2节简述了  
一个重要的结果

---

<sup>a</sup> 最初，拓扑学的重点是邻域和它们的连续转换，拓扑学的进一步抽象继续蔓延到更广泛的应用领域[216]，最近，计算机科学也参与进来，为数学本身回归一个新的类型理论基础[256].

该理论认为：动态系统会产生一个类似于能量的李亚普诺夫函数，该函数已经在众多变异的内部状态动态中被发现，而且数量越来越多，其中包括混合机器人的候选动态。

稳态的概念 (B.1)。A.3节将其与一个更僵硬、分辨率更高的稳态概念进行了对比，后者配备了一个更松散的能量类Lasalle函数，其对机器人混合动力学 (B.1.1) 的扩展还不太清楚。为了便于论述，文章的主体模糊了这些重要的细节，并推测性地进行，好像这两种工具都是可用的，并假设相关的标量值函数可以被选择为物理能量的合理表现（正如所有经典的拉格朗日系统一样[171]，但对于B.1节中介绍的机器人杂交来说，这只是猜想而已。<sup>c</sup>

## A.1 链条

本节概述了康利关于“粗略模型”需要研究“粗略条款”的见解所依据的理论[166]。他的[166]基本定理[257]引入了链的分析(4.1.2.1)，以保证任何行为良好的经典动力系统都能被分割为一个可数的暂态开放盆地集合，这些盆地与构成其各自稳态命运的封闭吸引集不相干，以及最后补充的封闭排斥集的组成部分。具体来说，链式分析法可以将一个经典的动力系统分解为一个封闭的、稳态的链式递归集和它的瞬态补充集[166]。当链式递归集的一个组成部分正好位于其盆地的内部时，它被称为吸引集。<sup>b</sup>第二节4.1.2.2建议将一个目标表达为吸引集的联合体：那么它的符号意义就由它们相关的盆地的联合体来给出。

在这种对“有误差的流动”的最粗略的分析中，吸引集上的动态被洗掉了：从它那里选择的任何状态序列都可以被通过它的一些链子所近似[166，第1.8.3章]。然而，这种强制的非确定性的最大优点是它的结构稳定性：一个盆地的拓扑结构（在同构类型的意义上）在模型的小扰动下持续存在--这似乎是康利指数延续性的结果[166，第IV.1.4章]，[216，Thm.7.14]。相比之下，轨道的确定性研究（不允许有误差的流的拓扑学）只对维数为2或更小的系统提供通用的结构稳定性[260]。此外，该经典理论的核心双曲性概念取决于光滑性假设，而这些假设对于被挤压和折痕的“混合物”来说通常是不适用的[261, 262]。产生于闭环机器人的动力学模型。因此，对于康利理论的混合扩展，似乎也迫切需要建立什么样的结构稳定性保证，例如[168]。

## A.2 李亚普诺夫函数

康利带来了李亚普诺夫理论的一般化，保证了一个连续标量值函数的存在，该函数在链式递归集上是常数，在补集上沿流严格递减。这个全局性的李亚普诺夫定理对机器人学的重要性类似于控制的经典稳定性理论[263]和相关的系统应用[264]。此外，虽然没有典型的经典程序[265]，能量在构建机械系统的李亚普诺夫函数中起着核心作用[195, 171]。因此，推测至少“自然控制”的机器人（例如，其反馈力和扭矩被设计为模仿势能耗散的物理学）[266]将承认编码吸引的能量成本的全局李亚普诺夫函数，从而使代码设计的前景(4.1.1)到基本极限(2.2.1.1)。<sup>c</sup>本文采用了这一猜测性的假设，作为一个方便整洁的避难所，以避免令人不安的技术对冲。似乎迫切需要发展一个更具建设性的形式见解，以保证或排除机器人混合动力学的能量-康利函数的存在。

<sup>b</sup>当该成分是链式传递的（即在它的任何两个元素之间有一条链），那么它可能被称为吸引子[258，定义。3.4.22]。初始条件的开放集的渐进流进入这样一个孤立其盆地内部的链式递归集的分量是一个与Lyapunov意义上的渐进稳定性相一致的概念[259]，将在A.3节中讨论。传统上，吸引子一词被更狭义地保留给包含密集轨道的吸引集[210]。一个或另一个定义的适当性似乎最好由第1节中讨论的感知模型决定。4.1.2.2.

<sup>c</sup>这不仅适用于“自然控制”[267]--一种对熟悉的比例-衍生反馈调节器的非线性机器人设置的直接概括。更为普遍的反馈策略，

例如，图误差控制器（公式。4）和它的泛化，也将产生表达机械能消耗的Lyapunov函数。

### A.3 双曲性和拉萨尔函数

刚刚回顾的拓扑理论为机器人混合系统 (B.1) 提供了一个重要的工具箱, 该系统的突发保护性复位 (公式) 可能会阻碍平滑动力系统理论中更多常规工具 (微积分和线性代数) 的应用。2) 可能会排除平滑动力系统理论中更常规的工具 (微积分和线性代数) 的应用 [168]。也就是说, 第 4.1.2.2 节中提出的这些工具所产生的符号必然是粗略的, 非常稳健, 但很可能达不到第 4.1.2.2 节中提出的那种任务规范符号所要求的精确程度。

4.1.2.2. 相比之下, 平滑动力学通过双曲率的概念引入了丰富的局部结构说明, 捕捉到了瞬时行为的关键方面 [210], 这些都是康利定理所依据的纯拓扑学方法所没有注意到的 [258]。伴随着这个局部分析的是一个强大的、几十年来丰富的分岔理论 (吸引集的拓扑结构和或稳定性的定性变化) [210], 它可以用来以一种几乎与模型无关的方式诱导出非常详细的行为结构 [209]。此外, 一个实质性的组成系统理论 [ ] 已被建立起来。 [263] 已经利用与这一类模型相关的平滑李亚普诺夫函数建立了大量的组合系统理论 [ ]。 [268] 虽然这类方法可以扩展到紧凑的不变集 [ ], 但通常情况下, 这类模型是不可能的。 [269], 但通常的情况是, 我们试图通过 C.2.2.3 节中介绍的模板动力学来编码的瞬间行为, 最简单的是通过对无界不变集的限制来表示, 如下面的例子 (C.2.2.3)。在这种情况下, 我们转向拉萨尔函数

[270] 来扮演捕捉感兴趣的质量特征的标量景观的角色。这假定了对一个真正编码物理能量的度量的承诺 [271, 第 425-426 页]。 <sup>d</sup>

For example, the critically damped unit spring-mass system whose phase portrait is plotted in Figure 1 has a singleton at the origin that comprises the entire attracting set in the sense of Conley. However, it is also the case that the reference dynamics—the scalar potential field on the sole proper invariant subspace spanned by the unique real eigenvector,  $[1, 1]$  — is actually itself attracting in the sense that the velocity “graph error,”  $V(x_1, x_2) := |x_2 - f_{\text{ref}}(x_1)|^2$  plays the role of a LaSalle function for  $f_{\text{ref}}(x_1) := x_1$ . A 根据这种动态指定的目标进行的更精细的分解, 依赖于二进制的平滑结构。

拓扑学、A-ordering 微积分和通过局部坐标图的线性化分析 [272]。在这个平滑动力系统的经典设置中 [ ]。 [210], 维度的坍塌到参考动态中, 是建立在该领域的民间传说中的, 并作为层次构成的现成范式 [203]。

幸运的是, 在许多情况下 [273, 206], 闭环混合系统可以被证明至少与经典动力学有局部共轭, 经典动力系统理论的全部力量 (例如, 双曲性、分叉理论、平均化等等) [.....] 可能适用于至少在稳态行为的附近。 [210] 可能会适用, 至少在稳态行为的附近。因此, 另一个迫切需要注意的问题是, 这在多大程度上是真实的, 以及哪些更普遍的混合动力学类别将接受经典动力系统理论的这种更精细的工具集。再一次, 这个观点的相关性似乎取决于是否有一个足够精细的感知系统, 以适应轨道而不是链的观点 (A.1)。然而, 为了本文的目的, 现在可以方便地进行下去, 好像那些必要的成分都已经到位: 例如, B.2.3.2 节推测, <sup>k</sup> 符号基础的所需感觉运动连贯性脚注 16 可以通过求助于对新出现的工作的概括学习来实现 [274275]。

## B 机器人-环境界面模型

B.1 节中提出的关于机器人-环境工作交流机制的一个仍未定论的但粗略的共识模型, 需要与 B.2 节中讨论的许多重要的、被广泛研究和使用的、但仍有很大差异的信息界面的描述进行比较。

### B.1 工作界面。机器人混合动力

本节概述了 (公式 1) 产生一类混合动力系统的方式, 大致是按照 [ ] 的发展。 [169] 在介绍了与 (公式) 相似的环境模型系列后, 我们将对其进行分析。 1) ( B.1.1), 并对比了伴随的行为模型的前景 ( B.1.2), 注意力转向了守卫和复位的离散过渡机制 ( B.1.3), 最后简述了这类模型的准确性和可操作性之间不可避免的权衡 ( B.1.4) <sup>s</sup>

。

康利定理 (A.1) 的一个令人满意的版本已经<sup>s</sup>被开发出来[168]的一个有点驯服的版本[169], 但经典的双曲理论( A.3)有多少可以推广到这个环境中, 还有待观察。最终, 似乎有可能将一些合适的莫尔斯分解<sup>s</sup>[276]分解为知觉上的

---

<sup>d</sup>感谢Matt Kvalheim指出这个参考。

有基础的<sup>1</sup>吸引子盆地最终将叠加一个合适的空间离散性，以产生一个与机器人学相关的物理基础的离散有限自动机表示。

### B.1.1 机器人-环境机械学

从操纵<sup>1</sup>和运动<sup>1</sup>的角度看，这两个方面的问题都很突出。<sup>67]</sup>和运动<sup>[68]</sup>，对机器人-环境工作界面的共识是采用牛顿定律的Lagrange-d'Alembert公式<sup>[277]</sup>提出了一个机器人系统，其形式为

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} = \tau(q, \dot{q}, \ddot{q}, \gamma, \nu) \quad (1)$$

其中， $2QQ_q$ 表示机制配置的一些局部坐标表示，通常是一个Lie Group，通过其内部致动的扭矩或力 $\gamma$ 作用，通过接触力 $\gamma$ 与 $\nu$ 环境耦合，通过它世界可以约束、接收或传递能量。考虑到作动器限制的模型必须为作动输入信号 $\gamma$ 建立一个进一步的内部模型。其中最简单的是引入了一个速度-扭矩模型<sup>[.....]</sup>。<sup>75]</sup>，但最近将大量的计算资源引入到电机驱动电子学中，鼓励对信息与功率的交互方式进行更复杂的表述<sup>[.7677]</sup>。

鉴于其未定的地位，目前的论述目的似乎最好是将"环境"描述为一个形式为(公式)的互补系统家族。  
1).每一个都是在一些"外部"配置系列上定义的， $\tilde{q}_v, \tilde{\nu}, \nu V$ ，每一个都有可能断言它自己的扭力或力， $\gamma_v \sim$ ，同时通过相互制约 $\gamma_v(q, \dot{q}, \ddot{q}, \tilde{q}_v)$ 与机器人结合，定义了一个 $\nu$ -索引的状态 $x_v := (q, \dot{q}, \tilde{q}_v, \ddot{q}_v)$ 的二 $\nu$ 微分代数动态控制系统家族，其约束范围为一些适当定义的总空间， $X_v$ 通常称为模式。

### B.1.2 内部状态与行为模式

从长远来看，端口的观点<sup>[278]</sup>将是指定和理解通过(公式)中指定的界面交换的工作流的一个重要工具。<sup>1)</sup>及其在给定模式 $x_v := (q, \dot{q}, \tilde{q}_v, \ddot{q}_v)$ 的状态上的扩展二 $\nu$ 差代数动态系统<sup>2</sup>。目前，该关系这样的行为模型<sup>[254]</sup>和它们的内部状态伴随物(公式。1)仍在为这里感兴趣的动态系统进行研究--这是物理意义上的组合的一般理论的一个有希望的开始<sup>[279].<sup>e</sup></sup>

机器人学界的共识是，这些耦合的机器人-环境模式可以 $\nu$ 被描述为一个良好的控制系统，执行器的输入力和扭矩可以被任意分配为传感器报告的全部历史输出信号的函数，并根据要处理的"环境"是否包括机器人的身体(运动)进行轻微调整<sup>[...68]</sup>。从长远来看，这种观点可能会被证明是不够普遍的，有待于采用仔细指定的信息接口。

### B.1.3 守护和重设

追踪发生模式间关键转换的物理情况是由事件图给出的， $E := (V, E)$ 对于一些 $E \rightarrow V \rightarrow V$ ，通过复位的方式

$$r_{(v, \tilde{v})} : G_{(v, \tilde{v})} \rightarrow X \quad (2)$$

从启动模式 $\nu$ 的守卫 $G_v \rightarrow X$ 。关于这个一般设置的正式说明可以在<sup>[280]</sup>，并附有对大量前人文献和结果的明智的简要讨论。

### B.1.4 协商准确度与可操作性的交易--O<sup>1</sup>

只要我们考虑到在本节中介绍的通过可逆键进行接触和断开接触的关键性<sup>2.2.1.2</sup>的共识模型(公式)的扩展。<sup>1</sup>通过混合动力系统模型(<sup>§B.1.3</sup>)的守护和重设(公式)来扩展共识模型(公式)。<sup>2</sup>混合动力系统模型(<sup>§B.1.3</sup>)的扩展受到了刚体力学的限制。

<sup>e</sup>这与乔姆斯基的语言层次([ ]意义上的"行为"类)与离散有限自动机的记忆容量和访问([ ]意义上的状态表示)之间的确切对应关系形成鲜明对比。<sup>254]</sup>和离散有限自动机([ ]意义上的状态表示)的记忆容量和访问之间的确切对应关系。<sup>254]</sup>在计算机科学的图灵分支所研究的离散时间离散空间动态系统中实现的。<sup>8]</sup>中讨论的。<sup>2.1.2.</sup>



以及发展中的动态系统理论领域（肯定但只是缓慢的）（A）。在上个世纪中叶，经典动力系统在一套广泛接受的基础定义和结果上趋于一致[.....]。253, 210, 257]，而在过去的二十年里，混合动力学的不同表述[IV]。281, 170, 282] 享有各自的优势，并支持有点不同的从业者群体，但对其形式关系或比较经验适用性的研究很少。同时，协商一个刚体的冲突和矛盾的理想化[IV]。283, 284]已被证明足够令人困惑，以至于最近才开发出一个明显可行的模型--例如，带有塑性冲击、持续接触、无质量肢体等无处不在的简化--以保证形式上一致的混合动力学[ ]。169]。加入一个类似的实用但形式上一致的摩擦模型仍然是一个迫切的重要的积极研究领域[]。285286]。

## B.2 信息接口。一个零散的叙述

尽管感知在该领域的历史上具有核心的重要性[。287, 81, 288]以及计算推动其发展的明显方式，机器人学还没有发展出一套独特的信息处理理论。澄清比特流在指定和完成工作中的基本作用，肯定是由专注于与环境的闭环互动的研究途径来推动的，比如主动感知[82, 289, 80]、导航[.290, 291]，以及操纵 [185, 91, 292, 293]。本节将在B.2.1节中回顾实现机器人信息界面的共识表示的前景，然后在B.2.2节中区分与机器人有关的进展和B.2.3节中与环境的表示有关的进展。信息的明显首要地位--它在内部计算中的使用以及它通过端口和渠道的收集、处理和传播--促使我们更好地理解这一资源，特别是考虑到当代对数据驱动方法的蓬勃兴趣（§B.2.3.2）。

### B.2.1 信息界面的建模

与物理端口的建立和中断大致对应，感知的互动在机器人与环境的工作交流过程中来来往往。本体感觉和相关的信号处理显然是这样的 [...294, 146, 151, 147]。但是，外感觉模式也会受到这种间歇性的影响，著名的是受对应问题的困扰[79]，由于需要语义（即稳健和可重复识别的命名）[.....]而大大加重。295] 通道的需要而大大加重。即使考虑到有足够的结构知识，可以假定语义通道能够可靠地运行，移动性--无论是机器人[]还是环境[]的移动性。274]或环境[296]--意味着无常，而且感知上可用的渠道的可能组合将强加一个额外的混合动态维度[]。275]。

类型理论包括支持多个移动的计算线程之间的信息交换的命名通道，它支撑着被称为进程bras的函数计算[]。69]。这些通用编程语言[5，第41.7章]被广泛认为是并发计算和交互的无序世界的任何有效表述的基础[]。297]。早期以这样的术语定义机器人的信息接口和相关编程模型的努力[298]可以说，它仍然代表了该领域为确定工作交流的具体方面所做的最好尝试。为什么在机器人感知和算法设计方面取得了几十年的进展之后，仍然没有明显的信息处理理论来对应（公式）的机械工作界面表述？1)?

这可能不是一个直接的原因是，符号和信号似乎在信息界面上不加区分地混合。最近提出的组合过滤器的概念[299]体现了明确阐述机器人的符号感觉的好处。当以感知等价类的网格为基础时[300, 301]，符号过滤提供了一个原则性的框架，用于提出和评估感知处理问题的资源要求[，]。302]以及对物理感觉器方面的洞察力[，]。303]。但是，模拟通信和计算在机器人与环境的信息交流中起着重要作用。

例如，preflexes [304]--反馈回路，据此影响输出力和扭矩的数据， $\boxtimes$ （公式。1），通过身体的材料特性来收集、处理、传播和执行，是内在的模拟和对动物[]的关键。162305163306] 以及机器人 [51307308208] 控制和协调。执行器中的本体感觉[V]。73, 294, 151] 同样是模拟的。此外，大量的内部计算解决了通过界面的信号流（位置、速度、力等等），使用的是根据（公式）开发的结构及其环境的模型。1)。虽然该领域已经成长为使用

<sup>1</sup>目前似乎还没有一个完整的过程计算的表达方式。

传统的数字计算机来实现这样的信号处理和控制，在商业混合模拟和数字计算中出现的摩尔定律的证据[]。  
309]，表明模拟硬件最终可能会发展到在这里要求发挥其自然作用的地步[。41]。

总而言之，代表机器人信息界面的核心挑战似乎在于开发一个以感知为基础的符号处理模型[...]. 300,  
301]，其中包括模拟通信和计算。这样的模型为编程的过程代数类型理论奠定了基础[69]。

### B.2.2 建筑学

反过来，机器人信息处理架构的一个核心挑战是需要将刚才描述的通道的界面模型和相关的编程语言与B.1  
节中港口的工作界面模型所产生的语言联系起来。它们之间有着复杂的联系，这在直觉上是令人信服的。  
例如，适当的基础符号可以极大地改变与一个任务相关的计算复杂性。<sup>g</sup> 这些模型迫切需要关联的一种方式  
是，什么内部的环境模型是必要的或足够的支持任务-环境配对的问题，这个问题很熟悉，但在很大程度上  
上仍然没有解决[ 2.2.2.2]. §

合成生物学和神经体质工程对模拟计算的兴趣日益浓厚[]。311]已经推动了有希望的抽象的发展[312]，  
包括类型理论和相关的编程语言，用于将动态系统规范编译成可以计算它们的物理基质[]。42].一个不那么  
明显的挑战是，需要将符号行为描述编译到模拟信号处理器和控制器的preflex []层面。304B.1节中建模的工  
作流的水平，与B.2节中讨论的代码设计问题相交。4.1.1.2.一个有趣的建议是在工作的混合动力学中对信息  
进行更普遍的编码（公式。1)的建议是建立具有足够的非线性内部状态动力学的控制器，以便通过脉冲族  
的同构类直接表示符号[313].更广泛地说，似乎没有文献将任何这样的内部动力学规范扩展到通信和移动过程  
的类型理论框架中[]。69]。

更广泛地说，A.3节中介绍的挑战仍然存在，即开发足够精细的感知信息，以使混合动力学分解可由正常  
超线性工具解决。由于与本节所讨论的内在稳健性有关的原因，第A.3节中所提到的长期行为是不可能的。  
4.1.2.1由于与本节讨论的内在稳健性有关的原因，任何传感器套件在链式递归水平上的长期行为都会普遍显  
现出来。但是，这种水平的分辨率太粗糙了，无法捕捉到本节所倡导的模板/锚点组合。4.1.3.1.因为这些必  
须包括由局部线性化动力学支配的瞬时现象，而这些现象通常是快速过渡性机动的成功的关键[...].  
211314]。<sup>h</sup>相反，当康利定理失效时，很可能没有持续的结构化行为，这就提出了一个不同的感知挑战。例  
如，最近对某些典型的过渡性机动的研究[192, 193] 揭示了肢体招募的组合选择和所产生的行为之间复  
杂但有拓扑规律的关系（一个简单的复合体）。就我们的目的而言，这种在有目的的混合动力系统中出现  
的规律性说明的主要优点是拓扑学对学习进步的前景的影响。

### B.2.3 环境

一般来说，一个机器人可以说是完成了一项任务，它的行动将环境中可感知的特征投射到它的传感器上，  
从而达到指定的目标条件。当设计者的环境模型足够精确，其工作界面提供了足够的协调性，以至于任务  
的完成可以从任何连在一起的机器人-环境初始条件的纯开环互动中推导出来时，就会出现一个重要的极端  
情况[92].从这个极端来看，至少有两个重要的放松维度：任务-环境配对，相对于此，一个固定的架构需要  
更多或更少的感觉信息[91]；以及结构-环境配对，相对于此，需要更多或更少的活性材料来实现一个固定  
的任务，通过前向参与[]。71].沿着这两个维度，一个模型的

---

<sup>g</sup>基于采样的运动规划方面的重大进展现在开始允许计算移动机器人操纵可移动物体的计划[310].然而，随着物体数量的增加  
，在自由空间的边界上明确分解为各个阶层（机器人-物体-接触）的计算成本会有巨大增长。相比之下，离散的组合复杂性可以  
通过对继承自接地关系的符号空间施加拓扑结构（相邻关系）来缓解[]。190]。

<sup>h</sup>有一些机器人混合动力学的典型例子，可以证明其产生的行为并不比经典动力系统（从形式上讲，它们是局部拓扑共轭的）  
所表现出来的更疯狂[。273206]。

支持这样的推理需要环境, 而且似乎很清楚的是, 为了推进这种迫切需要的调查, 需要进行大量更多的经验性的研究[.....]。315].

**B.2.3.1 设计的模型** 在本节中叙述的过去半个世纪的机器人任务发展的高度简略的简图, 包括以固定几何形状为特征的环境。4.1.2.2中所叙述的过去半个世纪的机器人任务的发展的高度简略的概述, 包括以其固定的几何形状为特征的环境。考虑到透视导航从根本上说是一个拓扑问题, 需要在计算上进行有效的表述, 因此需要用驯服的拓扑结构来表达工作空间[...]. 216, 第3.5章]。i涉及到与这种仅仅是惰性的、几何学概念的环境进行接触和断开接触的任务, 需要复杂的模型, 这些模型仍在非常积极的开发之中[, 第3章]。286], 而可移动的物体带来了臭名昭著的建模挑战, 即使是被认为是 "刚性 "的物体[. 284].事实证明, 要开发具有计算效率的(即包络参数、有限维度)环境模型来捕捉工作交换的动态变化, 难度更大。最近出现的地球动力学[142]的出现, 以及它在 "机器人物理学 "这一更广泛的追求中的绽放[320] 的出现大大促进了机器人学科的发展前景。以低维能量景观来表示环境的工作能力的建议[], 代表了该领域特别重要的新进展。143] 代表了这一努力的一个特别重要的新进展。随机表示法[321] 可用于推理安全和通过杂乱环境的问题。

当然, 希望对自己的设计进行推理的机器人设计者所面临的对环境模型的同义需求对设计本身并不具有这样的影响力。一个机器人需要多少内部模型, 多少可以通过积累经验来实现, 以及在设计时必须赋予什么样的描述, 这些都是基本问题, 除了上个世纪控制理论的见解之外, 这些问题的进展相对较少。<sup>14</sup> 几何学上的内部描述和拓扑结构简单的环境[.180]可以被实时测量所取代, 而不会有导航方面的损失能力[322].用来将真实环境变形为这种简单的拓扑模型的几何学细节[323]可以从经验中学习, 并使用实时测量进行实例化, 假设拓扑模型的正确性, 也有同样的形式导航保证[.275].这些形式上正确的导航架构在各种物理环境中表现出良好的经验性能, 而这些环境远远超出了形式保证的范围[ ]。274].一个紧迫的问题是, 面对导航失败, 机器人应该寻求学习什么样的环境新信息, 这在逻辑上涉及到环境的某些范围之外的方面。

**B.2.3.2 学习模型** 这些最后的例子表明, 需要更广泛地研究将最近爆炸性增长的学习架构的能力整合到学科机器人技术中的前景。324, 95] j早已被证明在非线性控制应用中具有巨大的前景[. 96].一个关键的但进展缓慢的文献正在出现, 它可以使结构化的架构[97]或计算上有效的测试。[325] 来保证这种函数近似器享有理想的形式定性属性。

导航架构 [.274, 275刚刚讨论的(B.2.3.1) 引入了深度学习模块的补充[, ]. 326, 327], 作为感觉的 "神谕", 被假定为在感知上为某些基本的超水平集合提供基础 n(具体来说, 就是反目标 m)的任务规范能量景观。相对于架构可以被证明足以完成任务的环境的 "范围", 相当于那些由神谕者已经成功 "学会 "标记的物体组成的环境。k未来研究的一个迫切需求是, 是否有可能将诸如[]中实现的定性保证扩展到足以保证景观的标准。325]中实现的定性保证扩展到足以保证其子级集近似到特定精度的景观标准。

---

<sup>i</sup>这是对由不等式系统定义的集合的研究, 这些不等式系统被证明允许进行拓扑学分解[316] 让人联想到柯林斯的圆柱形代数分解[317], 具有类似的计算复杂性[.318].定义方程不需要仅仅是多项式, 而是根据o-minimal geometry[]的规定。319], 可以包括适当的限制性分析函数。

<sup>j</sup>在过去的几年里, 可能还会有更多的时间, 将这些数据驱动的函数近似技术拼接到机器人技术项目上, 已经消耗了学术领域。这有一个潜在的好处, 就是大大增加了可建造机器人的经验能力。到目前为止, 关于机器人学习的文献似乎在很大程度上受制于技术上传闻演示的偏爱, 而不是旨在反驳或支持明确的假设的实验。

<sup>k</sup>这个想法的一个潜在的令人信服的(但仍然是非常推测的)概括可能会实现动态和感知基础的符号之间的关键一致性(这个概念在脚注的点上首次提出 16).也就是说, 不可抗拒的是, 想象新的学习技术[324]可能会被更广泛地训练, 不只是识别反目标

，而是识别潜在的一般（甚至可能是任意的）子级集合的类别<sup>1</sup>从控制产生的能量景观中产生。

## C 推测性问题

## 解决方案：迈向工作的类型理论

### C.1 趋向问题 1

#### C.1.1 自由度。迈向动态的兰道尔极限

显然，将更深的平滑盆地打包到固定体积的（紧凑的）空间中，必然导致更陡峭的障碍。这些高幅度的梯度反过来又会出现功率景观中（因为不管一个给定的控制器实现的具体矢量场如何，链式规则决定了功率景观采取其与能量景观梯度的内积形式）。将吸引子盆地解释为机械代理的基本行为符号，并要求抗噪屏障将其隔开，这就为建立我们在动物身上看到的那种高DoF体提供了令人信服的动机：在相同的基长尺度下，高维空间的体积呈指数级增长；因此机械的“多功能性”（不同行为之间的快速转换）[328]产生更大的功率负担或更多的分布式机构

-或者两者都有。上述（本质上是准静态的）论点在更高能量的制度中会更加尖锐地咬住，在这种制度中，动力学没有被过度阻尼，轨迹更紧密地遵循水平集（而不是沿着子水平集的陡峭下降），势垒必须更高（以排斥障碍物附近的高能量初始条件，正如在[171]中提出的，并以导航函数的要求为例[.....]。[180]）。关键的是，能量景观的陡度（即梯度的大小）--还是相对于噪声水平而言--似乎是决定稳定行为之间转换的功率成本的关键参数。请注意，随着导数的参与，噪声功率谱的尾部行为的影响增加。

一般来说，随着行为复杂性的增加，身体将需要同时招募多个盆地的组合，例如在完全空间双足跑中[329]。现在，多功能性需要协调的和异步切换的盆地的平行通道，每个通道都会产生自己的噪声功率权衡- $\alpha$ 。这种直觉产生了兰道尔边界的动态类似物：每个通道有一个最小的能量成本，只能以降低噪声底限（更大的信息）为代价来减少。同时，还有一个最大的传输速度（对于来自周边的本体感觉数据来说，通过结构振动的声音速度；根据顺应性的程度，速度较慢；对于通过轴突的离子来说，速度快得多；对于通过电线的比特来说，速度是光速）。在全部时空尺度上研究这些界限的细节（下限分子大于上限分母），可以得到动态兰道尔极限，这似乎证明了对机器人技术理解的重大突破。

#### C.1.2 编码设计和形态学计算

协同设计是一个一般的术语，它指的是一个框架，通过正式的（也许是简单的计算）手段，将设计三要素的特定方面(2.1.3)相互之间和/或与可用的物理资源(2.2.1)。<sup>§</sup>

可能是第一个通过计算提出的问题版本，将身体和控制器的设计进行了共性化，以便让进化算法同时塑造它们，使其在模拟的三维平地中实现更好的动态运动[ ]。[330]。最近的一个重要进展是开发了一个物理资源与任务能力交易的形式主义，产生了确定不可行性或最佳设计的充分条件（和一个计算上有效的程序）[ ]。[331]。一个用于指定和执行模块化机器人系统的身体重新配置的计算框架，以响应在参数化的物理环境系列中的导航任务[ ]。[159]已被扩展到允许自主规划和执行环境重构，以使其完全可导航[ ]。[160]。

编码设计问题的一个重要但更受限制的版本是希望系统化地巧妙利用资源，使同一材料同时满足多种功能，如“预发体”<sup>§</sup>（B.2.1）中。Preflexes的设计往往来自于生物的灵感[.307, 208]。这样的设计挑战是机器人学的核心，以至于它们已经开始积累了重要的专业文献，大约聚集在“形态学计算”的标题下[ ]。[332333]。



## C.2 趋向问题 2

### C.2.1 从信号到接地的符号

以一个空间上的符号词库的工作定义为例，它是一个可数覆盖的元素（即一个可数的子集集合，其联合产生该空间）。如果一个机器人混合系统的状态空间上的词汇表（公式：）是动态接地的，那么这个词库就是动态的。<sup>1)</sup>，如果它的符号可以用不变集上的拓扑操作(即联合、相交和互补)来表达，就是动态接地的。在这种观点中，康利定理 (A.1) 提供了一个符号目标基元的内在词典：吸引集和它们相关的盆地。<sup>m</sup>

如果一个词库的每一个符号都可以通过应用于其感觉器官和记忆的一些计算来定义，那么这个词库就是以感知为基础的。显然，一个精心设计的机器人将使用既是动态的又是感知基础的符号进行编程。由于缺乏B.2.1节中所讨论的既定的信息接口模型，目前看来，希望通过第一原理的推理来提出如何做到这一点是没有结果的。相反，为了本文的目的，我们可以简单地宣布，相关的李亚普诺夫水平集<sup>n</sup>是有感知基础的，就像[]中的反目标一样。<sup>274, 275]</sup>中的反目标，以及更普遍的，通过学习<sup>k</sup>的反目标--然后继续。

### C.2.2 目标基元的规范

节中概述的段落的辅导性说明 4.1.2.2从路径规划[173] 到运动规划 [109]到运动动力学规划[196] 到矢量场规划[178]的部分内容在[]中进行了阐述。<sup>174]</sup>。为了本文的目的，这些区别可以在一个微不足道<sup>1</sup>的设置中得到说明，即一个单位点质量的 "机器人"  $x \in \mathbb{R}^2$  受到用户指令的力 $u$ 的影响，其模型是一个双积分器 $\ddot{x}=u$ ，如下所示。

C.2.2.1 Reference Motions Suppose the robot is required to reach the origin from some initial configuration,  $x_0 \in \mathbb{R}^2$ . The path planning problem is solved by the line segment joining  $x_0$  to the origin. The generic motion planning problem is solved by the time parametrized function  $m(t) := (1-t)x_0$ . A kinodynamic version of the problem additionally imposing the requirement of zero velocity at each end point is solved by  $k(t) := (1+4t^3-3t^4)x_0$ , while further restrictions, (e.g., on allowed accelerations [334]) would entail higher order spline solutions. All of these approaches require a controller to force the actual robot to track the proposed motions, achievable.

例如，在经典设置中--例如在 (公式) 的一个模式中--这可以很容易地通过反动力学控制器来实现， $u := \ddot{r} + (\dot{r} \cdot \dot{x}) + (r \cdot x)$ ，其中 $r$ 的作用可以由 $m$ 或 $k$ 来扮演，<sup>k</sup>取决于标准。<sup>1)</sup>--这可以很容易地通过反动力学控制器来实现， $u := \ddot{r} + (\dot{r} \cdot \dot{x}) + (r \cdot x)$ ，其中 $r$ 的作用可能由 $m$ 或 $k$ 来扮演，取决于标准。在混合设置中，运动规范的问题要复杂得多。最近，一个构思精巧的例子介绍了这种规划敏捷的腿部机器人运动的方法，见[...]<sup>335]</sup>。一个精确的运动规划器选择了连续的模式结点，这些结点选择了要加入的姿态模式的保护套中的子目标对，并受到动力学 (公式) 所继承的约束。<sup>1)</sup>。立体花键 (比上面的四元参考花键 $k$ 低一个代数度) 是在 "较低级别的" 姿态控制器将跟踪它的假设下选择的，例如使用逆动力学方案。

从本节介绍的迭代再规划的观点来看，所有这些运动参考方案的弱点是没有全局恢复策略。<sup>4.1.2</sup>的观点来看，所有这些运动参考方案的一个弱点是缺乏一个全局恢复策略。当实际执行情况仍然接近于指定的参考时，假设不需要恢复--低级别的控制器将继续行动直到错误消失。然而，如果控制器严重失灵，也许是因为底层规划模型有问题，那么唯一的办法就是用更新的环境信息启动精确的规划程序。

<sup>m</sup>我们通常对目标 (期望的目标状态) 和 "反目标" (需要避免的状态) 都感兴趣。在经典系统中，后者的作用是由与其配对的吸引集对偶的排斥集来扮演的 (在这个意义上，它们在反向时间吸引的解决方案在正向时间接近吸引集)。但机器人学的混合系统一般只支持正向时间的唯一性属性 (不同的守卫可能有相交的重置图像)。现在，与一个给定的吸引集相对应的排斥集被认为是互补的前向极限集[168, 脚注4]。因此，使用李亚普诺夫函数超水平集来定义反目标是很方便的。

<sup>n</sup>一个标量值函数 $V$ 的子级集。 $X \subset \mathbb{R}^n$ 是它在区间上的预映像， $V^{-1}[(c, \infty)] := \{x \in X \mid V(x) < c\}$  for  $c \in \mathbb{R}$  和它们的补集被称为超水平集。为方便起见，本文将粗略地使用这个术语来指代这样生成的集合的整个代数--即它们在并集和补集操作下的最小闭包。读者可以想象 "等级带" 的联合， $X \cap V^{-1}([a, b]) := \{x \in X \mid a \leq V(x) \leq b\}$

for  $a < b \in \mathbb{R}$   
是典型的典范。

和/或。

C.2.2.2 最佳动力学优化方法可用于生成目标，其形式为参考轨迹（所产生的方法学类似于上面刚刚勾画的）或反馈控制器。另外，机器人学从控制理论中继承的一个主要观点是，设计者的目标应该用标量成本函数来表达，这些成本函数沿着动态系统的运动进行适当的折现后，应该由反馈控制策略来最小化。在二十世纪末发展起来的关于这一思想的许多变体中，最持久的--可以说对机器人具有最大价值的--是所谓的模型预测控制（MPC）框架[200]，其中成本只在有限的范围内累积，而下一个控制动作是在该范围的下一次迭代中重新计算的，实现了流行的直觉，即计划应该是长期的，但在短期内通过经常更新的行动来执行。

对这种方法产生的闭环系统进行稳定性分析的传统由来已久[200]，并且有活跃的文献继续追求其对B.1节的机器人混合动力学模型的扩展。

o

C.2.2.3 参考动态 相比之下，一个矢量场规划器可以由势能函数指定， $(\mathbf{x}^*) := \mathbf{x}^2/2$ ，产生梯度场。

$$\mathbf{f}(\mathbf{r}_{\text{ref}}|\mathbf{x}) := \mathbf{r}^*(\mathbf{x}) = \mathbf{x}_o. \quad (3)$$

相关参考动力学的解决方案 $\mathbf{r}^* = \mathbf{f}_{\text{ref}}(\mathbf{r})$ 解决了从任何特定初始配置 $\mathbf{r}_o := \mathbf{x}_o$ 开始的运动规划问题，并可用于上述定义的逆动力学控制器。或者，任何潜在的耗散控制器。

$$\mathbf{u} := p\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{f}(\mathbf{x}_{\text{ref}})$$

应用于工厂，将从任何初始配置和速度 $(\mathbf{x}_o, \dot{\mathbf{x}}_o)$ 直接解决问题[171].为了下面的进一步讨论，有必要将这种控制器的一个特殊版本挑出来，即阻尼"图形误差"控制器[197]

$$\mathbf{u} = 2(\dot{\mathbf{x}}(\mathbf{x}_{\text{ref}})) \mathbf{r}(\mathbf{x}^*) \quad (4)$$

产生了图中描述的临界阻尼线性时间不变系统。 1.

这种嵌入式瞬时特性的动机和构造最初是在[]中提出的。197]中提出，并在整个矢量场规划文献中重新出现，例如，[198199337].

### C.2.3 从构成到类别

控制策略（公式. 4)以一维模板动态系统 $\mathbf{f}_{\text{ref}}$ (公式)的形式呈现了一个非常简单的层次化组合实例。3)，它被锚定在图中的二维系统中。1.这种维度崩溃的概念（二维系统的轨迹很快就与一维系统的轨迹几乎没有区别）深深扎根于经典动力系统理论的民间传说之中[338]中所设想的这个概念的稳健版本。203]中所设想的概念的稳健版本在[]中得到了非常普遍的阐述。205]中对双曲古典动力系统进行了非常普遍的阐述(A.3)。30该结构的一个版本已经在[]中被提出，用于机器人混合动力学的分类表述(B.1)。167]. §

C.2.3.1节描述了从图中所示的模板/锚定主义中产生的另外两个动态组合。1.第C.2.3.2节描述了在发展混合动力系统类别方面的最新进展，该类别最终可能服从于第C.2.3.1节中敦促的类型理论。4.1.3.2.

o最优方法从成本函数中导出反馈法，而C.2.2节的模板方法则相反，从动力学中导出李亚普诺夫函数。原则上说，第C.2.2节中提出的观点对成本函数的起源是不可知的。4.1.2.2中提出的观点，对于要组成的闭环动态的起源是不可知的。在实践中，模板方法不那么精确，但更稳健，因为它们通常不依赖精确的植物模型[.336].此外，它们可能更容易设计低DoF模板，因为增益参数和控制项的参数化直接影响力和扭矩--与成本函数的参数相反，成本函数的参数一旦从物理学中移除。当然，直接设计更适合于在线适应，因为它们的控制是直接从任务-环境配对中参数化的，而最佳反馈规律是通过数值计算的。最后，最优控制的传统是对任务提出单一的"端到端"的表达式，而不是像本节中所提倡的那样发展模块化和重用的方法。4.1.2.2.然而，精心开发的最优方法，如MPC [...200]与"手工制作"的模板设计相比，它具有自动化生产稳定控制器的巨大优势。当然，从长远来看，这些直接和间接的控制设计方法的一些适当组合将出现在机器人学的最佳实践中。

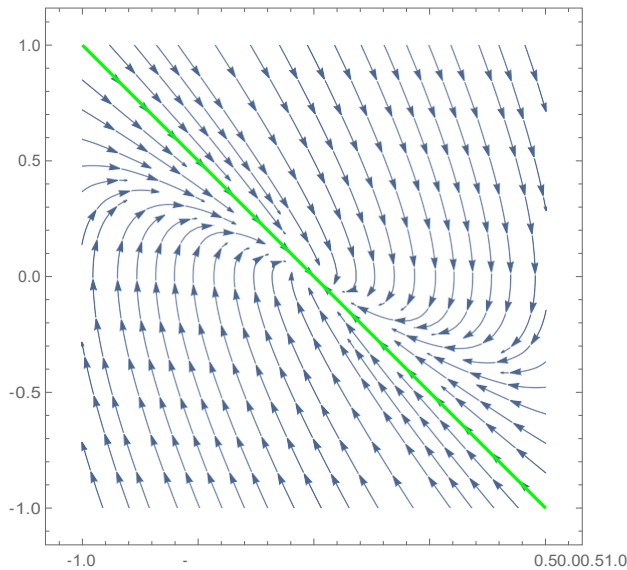


图1：临界阻尼DoF1线性单位弹簧-质量系统的相位图， $\ddot{x} + 2\dot{x} + x = 0$ 。

**C.2.3.1 模板的组成** 雷伯特开创了机器人学中并行组成的功效。他著名地表明，动态复杂的弹弓手可以由完全解耦的、计算简单的、能量感知的1DoF控制器来可靠地调节[113].跳跃的高度是通过调节沿腿的径向能量来管理的--在孤立的垂直位置上是正确的[339]--在站立期间与PD控制方向同时进行。这些解耦的姿态政策与独立的步态政策交替进行，以调节前后速度--在孤立的情况下证明是正确的[340]，对于更现实的模型，有一些充分的条件[341].直到今天，人们仍在继续努力，以扩大对为什么这种解耦政策在这种高度耦合的动力学中起作用的理解[206]，以及在更普遍的平行组合环境中，有多少类似的交叉交谈可以被忽略[]。207, 208].当务之急是尝试在一个新兴的混合动力学范畴的形式主义中建立一个更弱的，因此更广泛的实际可行的平行组合概念，可以考虑一定程度的非致误的交叉交谈[206].

相比之下，动态系统中普遍存在的李亚普诺夫函数使机器人学能够立即对顺序组合的关键操作进行编码[185]在子级集方面的关键操作[184].这种操作可以被分类表述为[]。167]，当子级集隔离了Conley意义上的吸引集的单个（链式过渡）分量时，这种操作可以被分类表述，但经典动力系统理论的更精细的结构还没有被这样的编码。

为了说明这一差距的实际意义，考虑由模板-锚点对产生的分层组合，该分类表述中的模板被编码为Conley意义上的吸引集[167].例如，一个经典的相位振荡器在形式上被锚定在[]中讨论的那种垂直约束的料斗中。329]中所讨论的那种垂直约束的跳板，因此，在无约束的两斗室多角棍中，由类似于Raibert的垂直跳跃和水平踏步的平行组成。不幸的是，虽然整个模板（垂直约束跳跃模型的径向嵌入副本）可以被证明是由所产生的平行混合动力学的吸引不变子系统组成的，但它并不是定义在一个康利吸引集上。粗略地说，图中的点吸引子 1对应于被锚定的极限循环，而一维不变子空间对应于受约束的垂直跳板。A.3节中讨论的更精细的吸引力观点的结构稳定的表述，适合于更广义的模板和锚的概念，已经为经典的设置制定了[205].似乎迫切需要找到一般的条件，在这些条件下，这种更精细的观点可以在一个更精细的混合类别中得到表达。

**C.2.3.2 走向混合动力系统的类别[]**的混合动力系统分析是迈向机器人编程的物理基础类型理论的重要第一步。342]代表了迈向机器人编程的物理基础类型理论的重要第一步。将经典的动态系统半共轭的概念[257]的范畴理论术语，通过过程代数的[69]的概念，对受控和混合系统进行了扩展。

引入额外的结构, 产生了更具体的面向机器人的类别, 产生了混合动力的分类说明[343]。343]甚至可以对顺序性和层次性的组成进行适当的表述[...]. 167]--尽管仍然局限于章节中讨论的基于链条的稳定状态观点。  
4.1.3.1.对经典系统的近似双映射关系的里程碑式的提议[344]通过类似于Lyapunov的比较函数, 现在需要沿着[ ]的思路进行范畴理论的扩展。342].一方面, 一个适当放松的类别理论扩展到混合系统网络的版本[280]的原始控制系统范畴[342] 有可能成为[ ]中阐述的经典系统理论的形式化版本。263].另一方面, 使用能量景观的近似二元模拟( 4.1.2.2)提出了一条将理想的更精细的轨道稳态理论(A.3)从 "天真 "的光滑模板"§拉回 "其不太规则的混合动力锚(C.2.3.1)。§

同时, 推测一下使用以能量为基础的 (C.2.1) 类型理论来反过来为机器人学提出的一些更高级别的形式语言提供基础的前景是很诱人的。例如, 模态逻辑[225] 或上下文自由语法[226]可能被赋予类型理论的扩展, 该类型理论规定了它们与混合动力学类别的接口, 其方式是部分或全部消除了对后续验证步骤的要求。对于具有抽象但明确定义的机器人动作操作语义的函数式编程语言来说, 可能是一个更自然的基础接口, 例如[ ]的操纵框架。233], 其线性逻辑表述预示着在能量接地的设置中 (可能) 无法获得完整的分类产品 [.167].后一个例子通过对可计算的证明理论的令人印象深刻的应用, 提出了一个令人信服的论点, 即更大的抽象性的重要性, 以部分地自动生成详细的任务规范[ ]。233].

## 参考文献

- [1] H.A. Simon, The sciences of the artificial.麻省理工学院出版社2019.。 3457
- [2] M.施密特, "我了解我可以创造什么吗?"在合成生物学。技术科学及其社会后果》(M. Schmidt, A. Kelle, A. Ganguli-Mitra, and H. Vriend, eds.), 第81-100页。  
Springer Netherlands2010., 3
- [3] D.E. Knuth, "计算机编程是一门艺术", 《ACM通讯》, 第17卷, 第12期, 第71974页。 316
- [4] R.米尔纳, "图灵奖讲座: 互动的要素", 《ACM通讯》, 第36,781993.-90页1.。 45
- [5] R.哈珀, 《编程语言的实用基础》。剑桥大学出版社, 2012年。 4, 725
- [6] C.Puliafito, E. Mingozzi, F. Longo, A. Puliafito, and O. Rana, "Fog computing for the internet of things:A survey," ACM Transactions on Internet Technology, vol. p19., 1-41, Apr 2019.4
- [7] J.Shalf, "超越摩尔定律的计算的未来", 《皇家学会哲学期刊A: 数学、物理和工程科学》, 第378卷, 第20190061页, 2020年3月。 4
- [8] J.E. Hopcroft和J. D. Ullman, 《自动机理论简介》, 语言和计算。  
Adison-Wesley.Addison-Wesley Reading, MA1979., 472124
- [9] L.Fein, "大学在计算机、数据处理和相关领域的作用", 《ACM通讯》, 第7-14页2., 9月1959.。 4
- [10] P.J. Denning, "Computing is a natural science," Communications of the ACM, vol. 50, no. 7, pp.13-182007., 4
- [11] R.Landauer, "计算过程中的不可逆性和发热", IBM研究与发展杂志, 第5,183-1961.191页3.。 4
- [12] I.L. 马尔科夫, "关于计算的基本极限的限制", 《自然》, 第147-154页512., 82014.月。 4
- [13] A.D. Falko, K. E. Iverson, and E. H. Sussenguth, "A formal description of system/360, " IBM Systems Journal, vol. no3., p2., 198-2611964., 46
- [14] G. E. Moore, "Cramming more components onto integrated circuits, reprinted from electronics, volume 38, number 8, april 19, 1965, pp.114." Solid State Circuits Society Newsletter, IEEE, vol. 11, no.5, p. 33-352006., 46
- [15] R.H. Dennard, V. L. Rideout, E. Bassous, and A. R. Leblanc, "Design of ion-implanted mosfet's with very small physical dimensions," Solid-State Circuits, IEEE Journal of, vol. no9., p5., 256-1974.268. 4
- [16] M.Bohr, "Dennard's mosfet scaling paper的30年回顾", Solid State Circuits Society Newsletter, IEEE, vol. no12., p1., 11-132007., 4
- [17] S.Krishnan, S. V. Garimella, G. Chrysler, and R. Mahajan, "Towards a thermal moore's law," IEEE Transactions on Advanced Packaging, vol. p30., 462-474, August 2007.4
- [18] E.Pop, "纳米级设备中的能量耗散和传输", 纳米研究, 第147-169页3.。  
52010.月 4
- [19] A.DeHon, "可重构计算架构的基本基础", 《IEEE论文集》, 第103,355-378页2015.3.。 413
- [20] T.N. Theis和H.-S. P. Wong, "摩尔定律的终结: 摩尔定律的终结。P. Wong, "摩尔定律的结束。信息技术的新起点"。科学工程中的计算, 第41-50页19., 32017.月 4



- [21] C.Bennett, "计算的逻辑可逆性", IBM研究与发展杂志, 第17,525-532页1973.6,。 46
- [22] D.B. Carlton, B. Lambson, A. Scholl, A. T. Young, S. D. Dhuey, P. D. Ashby, E. Tuchfeld, and J.Bokor, "用偶极耦合的纳米磁体进行热平衡计算", IEEE Transactions on Nanotechnology, vol. p10,. 1401-1404, Nov. 2011.4
- [23] C.米德和L.康威, VLSI系统简介。Addison-Wesley Reading, MA1980., 46
- [24] C.G. Bell和A. Newell, 计算机结构。阅读和实例。McGraw1971.-Hill, 4
- [25] J.麦卡锡, "符号表达的递归函数及其机器计算, 第一部分, " Communications of the ACM, vol. no3,. p4,. 184-196.195, 4
- [26] J.McCarthy, A Basis for a Mathematical Theory of Computation.31人工智能项目的备忘录, 麻省理工学院1962.。 47
- [27] P.马丁-洛夫, "建构数学和计算机编程", 伦敦皇家学会的哲学交易。系列A, 数学和物理科学, 卷号312,, 第501-518页1984.1522,。 47
- [28] A.K. Wood, 《古代世界的战舰》。Osprey出版社2012.。 4
- [29] B.C. Pierce, Types and Programming Languages.MIT press, 2002. 47, 16
- [30] A.W. Appel, L. Beringer, A. Chlipala, B. C. Pierce, Z. Shao, S. Weirich, and S. Zdancewic, "Position paper: the science of deep specification," Philosophical Transactions of the Royal Society A: 数学、物理和工程科学, 卷号375,P2104,。 20160331,2017. 47
- [31] J.McCarthy, "lisp的历史", 在《编程语言的历史》(R. L. Wexelblat, 编辑)中, 第173-185页。学术出版社1981.。 4
- [32] P.R. Cohen, 人工智能的经验方法, 第139卷。MIT press Cambridge, MA, 1995. 5
- [33] J.Russell Stuart和P. Norvig, 《人工智能: 一种现代方法》。Prentice Hall2009., 5
- [34] M.Reynolds, A. Cortese, Q. Liu, W. Wang, M. Cao, D. Muller, M. Miskin, I. Cohen, and P. McEuen, "Surface electrochemical actuators for micron-scale fluid pumping and autonomous swimming, " Bulletin of the American Physical Society2020., 5
- [35] K.Oishi和E. Klavins, "基因调控网络中有限状态机的工程框架"。ACS合成生物学, vol. p3,. 652-665, Sep. 2014.5
- [36] P.B. Reverdy, V. Vasilopoulos, and D. E. Koditschek, "Motivation dynamics for autonomous composition of navigation tasks," IEEE Transactions on Robotics, p. (待发表) 2020.。 5
- [37] L.Miracchi, "人工智能研究的能力框架", 《哲学心理学》, 第32,588-633页2019.5,。 58
- [38] "Joseph F. Engelberger, 机器人之父2020." 5
- [39] D.E. Whitney, "为什么机械设计不能像vlsi设计一样, " 工程设计研究, 第8,125-138页1996.3,。 616
- [40] C.米德, 《模拟和神经系统》。Addison-Wesley Boston1989., 6
- [41] C.D. Schuman, T. E. Potok, R. M. Patton, J. D. Birdwell, M. E. Dean, G. S. Rose, and J. S. Plank, "A survey of neuromorphic computing and neural networks in hardware, " arXiv preprint arXiv:1705.069632017., 626

- [42] S.Achour, R. Sarpeshkar, and M. Rinard, "Configuration synthesis for programmable analog devices with arco," in Proceedings of the ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation (PLDI), vol. 13-17-Jun-2016, pp.1772016.-193, [626](#)

- [43] S.M. Mirvakili和I. W. Hunter, "人工肌肉。机理、应用和挑战"。先进材料》, 第卷, 第页30,6,。1704407,2018. 6
- [44] K.Meijer, Y. Bar-Cohen, and R. J. Full, "Biological inspiration for musclelike actuators of robots," in Biologically Inspired Intelligent Robots (Y. Bar-Cohen and C. L. Breazeal, eds), p. 26-45, SPIE Press2003., 6
- [45] R.J. Full, "陆地运动的力学和能量学:从两足动物到多足动物", 载于《细胞和动物的能量转换》(W. Wieser和E. Gnaiger, 编辑), 第175-182页, Thieme1989。 6
- [46] I.W. Hunter, J. M. Hollerbach, and J. Ballantyne, "A comparative analysis of actuator technologies for robotics," Robotics Review, vol. p2,. 2991992.-342, 68
- [47] J.Zhang, J. Sheng, C. T. O'Neill, C. J. Walsh, R. J. Wood, J. -H.Ryu, J. P. Desai, and M. C. Yip, "Robotic artificial muscles:目前的进展和未来的前景,"IEEE机器人学的反应, 第761-781页35,, 六月2019. 6
- [48] M.J. Spenko, J. A. Saunders, G. C. Haynes, M. R. Cutkosky, A. A. Rizzi, R. J. Full, and D. E. Koditschek, "Biologically inspired climbing with a hexapedal robot," Journal of Field Robotics, Vol. no25,.4-5, p. 223-2422008., 6
- [49] A.Ruina, "片状整体系统的非整体稳定性问题", 《数学物理报告》, 第91-100页42,, 101998.月。 6
- [50] T.M.Kubow和R.J.Full, "机械系统在控制中的作用:六面体跑步者的自我稳定假说", 《皇家学会哲学论文集B:生物科学》, 第p.1385,卷354。849,1999. 6
- [51] P.Holmes, R. J. Full, D. E. Koditschek, and J. Guckenheimer, "The dynamics of legged locomotion: Model, analyses, and challenges," SIAM Review, vol. no48,. p2,. 207-2006.304, 625
- [52] T.McGeer, "被动动态行走", 国际机器人研究杂志, 第9卷, 第2期, 第62-1990.82页。 6
- [53] S.H. Collins, M. Wisse, and A. Ruina, "A three-dimensional passive-dynamic walking robot with two legs and knees," The International Journal of Robotics Research, vol. no20,. p7,. 607-6152001., 6
- [54] J.Schmitt和P.Holmes, "昆虫运动的机械模型:水平面的动力学和稳定性I.理论,"生物控制论, 第83,501-515页2000.6,。 6
- [55] J.M. R. Parrondo, J. M. Horowitz, and T. Sagawa, "Thermodynamics of information," Nature Physics, vol. p11,. 131-139, Feb. 2015.6
- [56] M.Debiossac, D. Grass, J. J. Alonso, E. Lutz, and N. Kiesel, "Thermodynamics of continuous non markovian feedback control," Nature Communications, vol. p11,. Mar 1360,2020.6
- [57] R.W. Messler, "先进材料的连接1993." 7
- [58] M.Kadic, G. W. Milton, M. van Hecke, and M. Wegener, "3d超材料", Nature Reviews Physics, vol. p1,. 198-210, Mar. 2019.7
- [59] D.M. Sussman, Y. Cho, T. Castle, X. Gong, E. Jung, S. Yang, and R. D. Kamien, "Algorithmic lattice kirigami:A route to pluripotent materials," Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 112, no. p24,. 7449-74532015., 7
- [60] H.Yuan, J. Pikul, and C. Sung, "Programmable 3-d surfaces using origami tessellations," in Proc. 7th Int.第七届科学、数学和教育领域折纸会议, 第893-906页2018。 7
- [61] R. Guseinov, C. McMahan, J. Pérez, C. Daraio, and B. Bickel, "Programming temporal morphing of self-actuated shells," Nature Communications, vol. p11,. Dec. 237,2020.7

- [62] T.S. Chan和A. Carlson, "动物中粘附器官的物理学", 《欧洲物理学杂志》专题, 第2501-2512页, Mar227,. 2019.[7](#)

- [63] M.T. Mason, "Toward robotic manipulation," Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems, vol. no1., p1., 1-282018., 7
- [64] M.R. Cutkosky和P. K. Wright, "摩擦、稳定性和机器人手指的设计", 《国际机器人研究杂志》, 第20-37页5,, 121986.月。 7
- [65] Y.Tian, N. Pesika, H. Zeng, K. Rosenberg, B. Zhao, P. McGuiggan, K. Autumn, and J. Israelachvili, "壁虎脚趾附着和分离中的粘附和摩擦", 《美国科学院院刊》, 第19320-19325页103,, 122006.月。 7
- [66] K.Autumn, M. Sitti, Y. A. Liang, A. M. Peattie, W. R. Hansen, S. Sponberg, T. W. Kenny, R. Fearing, J.N. Israelachvili, and R. J. Full, "Evidence for van der waals adhesion in gecko setae," Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. no99., p19., 12252-122562002., 713
- [67] R.M. Murray, Z. Li, and S. S. Sastry, A mathematical introduction to robotic manipulation.CRC1994.。 72124
- [68] A.Johnson和D. Koditschek, "Legged self-manipulation," IEEE Access, vol. 1, p. 310-334, 2013. 724
- [69] R.Milner, 《通信和移动系统：pi计算》。剑桥大学出版社, 1999年。 78252631
- [70] J.Eisenhaure和S.Kim, "干胶状态的回顾。生物仿生结构和它们激发的替代设计," 微机械, 第4125,2017.8,卷。 813
- [71] M.A. McEvoy和N. Correll, "连接传感、驱动、计算和通信的材料", 《科学》, 第2卷347,6228。1261689,2015. 81426
- [72] B.Gholipour, P. Bastock, C. Craig, K. Khan, D. Hewak, and C. Soci, "Amorphous metal-sulphide microfibers enable photonic synapses for brain-like computing," Advanced Optical Materials, vol. no3., p5., 6352015.-641, 8
- [73] H.Asada和K. Youcef-Toumi, 《直接驱动机器人：理论与实践》。麻省理工学院出版社1987.。 81325
- [74] S.Kim, C. Laschi, and B. Trimmer, "Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics," Trends in Biotechnology, vol. p31., 287-294, May 2013.8
- [75] P.Gregorio, M. Ahmadi, and M. Buehler, "Design, control, and energetics of an electrically actuated legged robot," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B, vol. no27., p4., 626-6341997., 824
- [76] M.Piccoli和M. Yim, "反齿形。扭矩纹波抑制、建模和参数选择"。国际机器人研究杂志》, 第148-160页, 102015.月。 81324
- [77] A.De, A. Stewart-Height, and D. Koditschek, "Task-based control and design of a bldc actuator for robotics," IEEE Robotics and Automation Letters, vol. p4., 2393-2400, Jul 2019.824
- [78] C.Ordonez, N. Gupta, E. G. Collins, J. E. Clark, and A. M. Johnson, "xrl hexapedal机器人的功率建模及其在节能运动规划中的应用", 在自适应移动机器人中。p.689-696, 《世界科学》, 52012.月 8
- [79] A.Makadia, A. Patterson, and K. Daniilidis, "3D点云的全自动注册", in IEEE2006 Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06), vol. 1, pp. 1297-1304, IEEE2006., 825
- [80] O.Arslan, "Statistical coverage control of mobile sensor networks," IEEE Transactions on Robotics, vol. p35., 889-908, Aug. 2019.825
- [81] R.Bajcsy, "主动感知", 《IEEE会议录》, 第76,966-1005页1988.8., 825

- [82] R.Bajcsy, Y. Aloimonos, and J. K. Tsotsos, "Revisiting active perception," *Autonomous Robots*, vol. p42,. 177-196, Feb. 2018.[825](#)



- [83] N.N. J. Cowan, J. Lee, and R. J. Full, "美国公鸡-蟑螂的快速壁式跟踪的任务级控制", 《实验生物学杂志》, 第1617-1629页209,, 五月2006. [8](#)
- [84] N.J. Cowan和E. S. Fortune, "运动力学在解码感觉系统中的关键作用"。《神经科学杂志》, 第1123-1128页27,, 1月2007.。 [8](#)
- [85] N.J. Cowan, M. M. Ankarali, J. P. Dyhr, M. S. Madhav, E. Roth, S. Sefati, S. Sponberg, S. A. Stamper, E.S. Fortune, and T. L. Daniel, "Feedback control as a framework for understanding tradeoffs in biology," *Integrative and Comparative Biology*, vol. p54,. 223-237, Jul. 2014.[8](#)
- [86] L.Miracchi, "认知科学中的生成解释和意识的硬问题"。《哲学观点》, 第31,267-291页2017.1.。 [8](#)
- [87] R.A. Brooks, "Intelligence without representation," *Artificial intelligence*, vol. no47,1-3, p. 1391991.-159, [9](#)
- [88] E.D. Sontag, 数学控制理论。Deterministic Finite Dimensional Systems.Springer1998., [9](#)
- [89] B.A. Francis和W. M. Wonham, "控制理论的内部模型原理", *Automatica*, vol. p12,. 457-465, Sep. 1976.[9](#)
- [90] G. S. Brown和D. P. Campbell, 伺服机械原理：闭环控制系统的动力学和合成。Wiley1948., [9](#)
- [91] M.T. Mason, "Kicking the sensing habit," *AI Magazine*, vol. no14,. p1,. 58-1993.59, [92526](#)
- [92] M.Erdmann和M. T. Mason, "无传感器操纵的探索", *IEEE机器人和自动化杂志*, 第4,369-379页1988.4.。 [926](#)
- [93] R.Brooks, "A robust layered control system for a mobile robot," *Robotics and Automation, IEEE Journal of*, vol. no2,. p1,. 14-231986., [9](#)
- [94] S.F. Roberts, D. E. Koditschek, and L. J. Miracchi, "使用经验性、生成性框架的腿部机器人研究中的吉布森aordance实例, " *Frontiers in Neurorobotics*, vol. 14, 2020. [915](#)
- [95] C.梅兹, "人工智能领域的3位先驱获得图灵奖", 《纽约时报》, 2019年3月。 [927](#)
- [96] K.S. Narendra和K. Parthasarathy, "使用神经网络识别和控制动态系统", *神经网络, IEEE Transactions on*, 第1,4-27页1990.1.。 [927](#)
- [97] C.Esteves, C. Allen-Blanchette, A. Makadia, and K. Daniilidis, "Learning so(3) equivariant representations with spherical cnns," in *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)* , p. 52-68, Springer2018., [927](#)
- [98] M.Buehler, K. Iagnemma, and S. Singh, eds., *The DARPA Urban Challenge:城市交通中的自主车辆*. Springer Tracts in Advanced Robotics, Springer-Verlag2009., [9](#)
- [99] E.Sofge, "DARPA机器人挑战是一个失败", 《大众科学》, 72015.月。 [9](#)
- [100] G. 马库斯, "为什么制造机器人这么难", 《纽约客》, 122012.月。 [9](#)
- [101] E.Guizzo和E.Ackerman, "DARPA的机器人挑战的艰难教训[新闻]", 《光谱》, IEEE, 第52,11-13页2015.8.。 [9](#)
- [102] R.Schmelzer, "为什么机器人公司正在死亡?", Oct 2018.[9](#)

- [103] B.Vanderborght, "机器人的梦想, 机器人的现实[来自编辑部]", IEEE机器人自动化杂志, 第4-5页26,, 三月2019. [9](#)
- [104] J.Mervis, "U.S. lawmakers unveil bold \$1000 plan to remake nsf," Science - AAAS, May 2020. [9](#)

- [105] C.F.Kerry和J.Karsten, 衡量自动驾驶汽车的投资。研究报告, 布鲁金斯学会, 102017.月 9
- [106] Y.Bhana, "无人机技术: 一个棘手的问题或电子商务的未来?" TranslateMedia, 22015.月 9
- [107] N.罗森伯格, 《技术的观点》。剑桥大学出版社1976.。 9
- [108] U.Rizzo, N. Barbieri, L. Ramaciotti, and D. Iannantuono, "学术界和工业界在产生根本性发明方面的分工", 《技术转让杂志》, 第45卷, 第393-413页, 四月2020. 9
- [109] J.C. Latombe, 机器人运动规划.Springer1991., 929
- [110] S.Thrun, W. Burgard, and D. Fox, Probabilistic robotics.麻省理工学院出版社2006.。 914
- [111] M.T. Mason和J. K. Salisbury Jr, 机器人手和操纵的力学。Cambridge, MA: 麻省理工学院出版社1985.。 9
- [112] M.T.梅森, 《机器人操纵的机械学》。麻省理工学院出版社2001.。 9
- [113] M.H. Raibert, Legged Robots That Balance.剑桥。麻省理工学院出版社1986.。 101631
- [114] E.R. Westervelt, J. W. Grizzle, C. Chevallereau, J. H. Choi, and B. Morris, 动态双足机器人运动的反馈控制。CRC出版社2007.。 10
- [115] M.Tedre, Simon, and L. Malmi, "变化中的计算机教育目标: 历史调查", 《计算机科学教育》, 第158-186页28,, 42018.月。 10
- [116] C.Hewitt和V. Kumar, "cs的差距, 酝酿非理性繁荣", 《ACM通讯》, 第8-9页61,, 102018.月 11
- [117] L.Dixon, "Autonowashing: The greenwashing of vehicle automation," Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, vol. p5,, May. 100113,2020.11
- [118] S.O.-R.A.V.S.委员会, "公路机动车自动驾驶系统相关术语的分类和定义", SAE标准J, 第1-16页2014.3016,, 11
- [119] S.E. Shladover, "联网和自动驾驶汽车系统。介绍和概述", 《智能交通系统》杂志, 第190-200页22,, 5月2018.。 11
- [120] A.Soteropoulos, M. Mitteregger, M. Berger, and J. Zwirchmayr, "Automated drivingability:对水平自动驾驶4车辆的空间部署进行评估", 交通研究A部分。政策与实践》, 第136卷, 第64-84页, 2020年6月。 11
- [121] I.D. Miller, F. Cladera, A. Cowley, S. S. Shivakumar, E. S. Lee, L. Jarin-Lipschitz, A. Bhat, N. Rodrigues, A. Zhou, A. Cohen, A. Kulkarni, J. Laney, C. Taylor, and V. Kumar, "Mine Tunnel exploration using multiple quadrupedal robots," IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 5, p. 2840-2847, April 2020.11
- [122] F.Zhang and W. Niu, "A survey on formal specification and verification of system-level achievements in industrial circles," Academic Journal of Computing & Information Science, vol. Apr. 2,2019.11
- [123] F.C. Moon, "Franz reuleaux: 对19世纪运动学和机器理论的贡献, " 应用力学评论》, 第261-285页56,, 32003.月。 11
- [124] N.Wiener, Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine.John Wiley & Sons1948., 11

- [125] F.Conway和J.Siegelman, 《信息时代的黑暗英雄：寻找诺伯特-维纳，网络学之父》。Basic Books2006.。 [11](#)
- [126] O.Mayr, "Maxwell and the origins of cybernetics," Isis, vol. 62, p. 425-444, Dec 1971. [11](#)

- [127] A.纽维尔和H.A.西蒙,《人类问题的解决》,第104卷。Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ1972., 1114
- [128] A. Krieger, R. C. Susil, C. Ménard, J. A. Coleman, G. Fichtinger, E. Atalar, and L. L. Whitcomb, "Design of a novel mri compatible manipulator for image guided prostate interventions, " IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. no52., p2., 306-2005.313, 12
- [129] J.Fasola和M.J. Mataric, "使用社会辅助性的人与机器人的互动来激励老年人的体育锻炼",《IEEE论文集》,第2512-2526页100,,第82012.页。 12
- [130] L.F. Jacobs, "从化学轴到认知地图。嗅觉的功能",《美国国家科学院院刊》,第10693-10700页109., Supplement p1., 106932012.-10700, 12
- [131] M.Iltan, M. S. Bhamla, X. Ma, S. M. Cox, L. L. Fitchett, Y. Kim, J. -s.Koh, D. Krishnamurthy, C.-Y.Kuo, F. Z. Temel, and et al., "The principles of cascading power limits in small, fast biological and engineered systems," Science, vol. Apr. 360,2018.12
- [132] J.Clark, D. I.Goldman, P. C. Lin, G. Lynch, T. S. Chen, H. Komsuoglu, R. J. Full, and D. E. Koditschek, "Design of a bio-inspired dynamical vertical climbing robot, " in Robotics:Science and Systems III Atlanta, Georgia2007., 1214
- [133] D.I. Goldman, T. S. Chen, D. M. Dudek, and R. J. Full, "Dynamics of rapid vertical climbing in cockroaches reveals a template, " Journal of Experimental Biology, vol. 209, no. 15, p. 2990-3000, 2006. 12
- [134] G. A. Lynch, J. E. Clark, P. -C.Lin, and D. E. Koditschek, "A bioinspired dynamical vertical climbing robot," The International Journal of Robotics Research, vol. p31., 974-996, Jul. 2012.12
- [135] W.Federle和D. Labonte, "动态生物粘附:运动过程中控制粘附的机制",《皇家学会哲学交流》B:生物科学,第374卷,第10页。20190199,2019. 13
- [136] K.Autumn, A. Dittmore, D. Santos, M. Spenko, and M. Cutkosky, "Frictional adhesion: a new angle on gecko attachment," Journal of Experimental Biology, vol. no209., p18., 35692006.-3579, 13
- [137] D.Santos, M. Spenko, A. Parness, S. Kim, and M. Cutkosky, "Directional adhesion for climbing: theory and practical considerations," Journal of Adhesion Science and Technology, 21, vol. 12, no. p13., 1317-13412007., 13
- [138] M.R. Cutkosky, "用附着力攀登:从生物灵感到生物理解, " Interface Focus, vol. p5., Aug. 20150015,2015.1314
- [139] A.T. Asbeck, S. Kim, M. R. Cutkosky, W. R. Provancher, and M. Lanzetta, "Scaling hard vertical surfaces with compliant microspine arrays," The International Journal of Robotics Research, vol. 25, no. p12., 1165-2006.1179. 13
- [140] S.Kim, M. Spenko, S. Trujillo, B. Heyneman, D. Santos, and M. R. Cutkosky, "Smooth vertical surface climbing with directional adhesion, " Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on, vol. no24., 1 Part p2., 65-742008., 13
- [141] L.Jamone, E. Ugur, A. Cangelosi, L. Fadiga, A. Bernardino, J. Piater, and J. Santos-Victor, "Affordances in psychology, neuroscience, and robotics:A survey," IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, vol. p10., 4-25, Mar. 2018.13
- [142] C.Li, T. Zhang, and D. I. Goldman, "A terradynamics of legged locomotion on granular media".Goldman, "A terradynamics of legged locomotion on granular media".科学》,第1408-1412页339,,《2013.科学》。 1327
- [143] R.Othayoth, G. Thoms, and C. Li, "复杂三维地形中运动转换的能量景观方法",《美国国家科学院院刊》,Jun 2020.1327

- [144] G. Boothroyd, "制造和装配的产品设计", 《计算机辅助设计》, 第505-520页26,, 71994.月。  
13



- [145] P.Papadakis, "无人驾驶地面车辆的地形穿越性分析方法。 A survey," 人工智能的工程应用, 第1373-1385页26,, Apr. 2013.[13](#)
- [146] J.J. Shill, E. G. C. Jr, E. Coyle, and J. Clark, "Tactile surface classification for limbed robots using a pressure sensitive robot skin," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. p10,. Feb. 016012,2015.[1325](#)
- [147] X.A. Wu, T. M. Huh, A. Sabin, S. A. Suresh, and M. R. Cutkosky, "Tactile sensing and terrain-based gait control for small legged robots," *IEEE Transactions on Robotics*2019., [1325](#)
- [148] J. H. Marden和L. R. Allen, "分子、肌肉和机器。电机的通用性能特征", 《美国国家科学院院刊》, 第99卷, 第4161-4166页, 2002年4月。 [13](#)
- [149] G. Kenneally, W.-H. Chen, and D. E. Koditschek, "Actuator transparency and the energetic cost of proprioception," in *Proc. Int.Symp.Exp Rob.*, p. (in press), IFRR, Nov. 2018.[13](#)
- [150] R.亚历山大, "弹簧在腿部运动中的三种用途", 国际机器人学杂志再搜索, 第9,531990.-61页2,。 [13](#)
- [151] G. Kenneally, A. De, and D. E. Koditschek, "Design principles for a family of direct-drive legged robots," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. p1,. 900-907, July 2016.[1325](#)
- [152] G. A. Pratt 和 M. M. Williamson, "Series elastic actuators," in *Intelligent Robots and Systems 95. 'Human Robot Interaction and Cooperative Robots'*, Proceedings.1995年IEEE/RSJ国际会议, 第399-406页 1995.1,。 [13](#)
- [153] C. Loughlin, A. Albu-Schäfer, S. Haddadin, C. Ott, A. Stemmer, T. Wimböck, and G. Hirzinger, "dlr 轻型机器人：人类环境中机器人的设计和控制概念," 《工业机器人：国际期刊》, 第34,376-385 页2007.5,。 [13](#)
- [154] J.Duperret, B. Kramer, and D. E. Koditschek, "Core actuation promotes self-manipulability on a direct-drive quadrupedal robot," in *International Symposium on Experimental Robotics*, p. 147-159。 斯普林2016.格。 [14](#)
- [155] T.T. Topping, G. Kenneally, and D. Koditschek, "Quasi-static and dynamic mismatch for door opening and stair climbing with a legged robot," in *International Conference on Robotics and Automation*, p. (to appear) , IEEE, May 2017.[14](#)
- [156] K.Gilpin和D.Rus, "模块化机器人系统", *IEEE机器人和自动化杂志*, 第38-55页17,, 9月2010。 [14](#)
- [157] M.Rubenstein, A. Cornejo, and R. Nagpal, "千人机器人群中的可编程自组装" *科学》*, 第795-799页345,, 82014.月 [14](#)
- [158] M.Yim, W. M. Shen, B. Salemi, D. Rus, M. Moll, H. Lipson, E. Klavins, and G. S. Chirikjian, "模块化 自重构机器人系统[机器人技术的重大挑战]", *机器人与自动化杂志*, IEEE, 第14,43-52页2007.1,。 [14](#)
- [159] J.Daudelin, G. Jing, T. Tosun, M. Yim, H. Kress-Gazit, and M. Campbell, "An integrated system for perception-driven autonomy with modular robots," *Science Robotics*, vol. no3,. 23,2018. [1428](#)
- [160] T.Tosun, C. Sung, C. McCloskey, and M. Yim, "Optimal structure synthesis for environment augmenting robots," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. p4,. 1069-1076, April 2019.[1428](#)
- [161] J.Bourgeois和S.C.Goldstein, "分布式智能机械。进展和前景", *IEEE系统杂志*, 第1057-1068页9, , 9月2015。 [14](#)
- [162] D.L. Jindrich和R. J. Full, "快速六面体运动的动态稳定", 《实验生物学杂志》, 第205,28032002.-

2823页18,。 [1425](#)

- [163] M.A. Daley, A. Voloshina, and A. A. Biewener, "内在肌肉力学在豚鼠稳定运行的神经肌肉控制中的作用," 《生理学杂志》, 第587卷, 第11期, 第2693-2707页。 [1425](#)

- [164] F.Diacu和P. Holmes, 《天体相遇：混乱和稳定的起源》，第22卷。普林斯顿大学出版社1999。 14
- [165] A.Bemporad和M. Morari, "整合逻辑、动力学和约束的系统控制", Automatica, 第407-427页 35,, Mar. 1999.14
- [166] C.C. Conley, Isolated Invariant Sets and the Morse Index.Amer Mathematical Society1978., 1422
- [167] J.Culbertson, P. Gustafson, D. E. Koditschek, and P. F. Stiller, "Formal composition of hybrid systems," Theory and Applications of Categories, vol. p35., 1634-1682, October 2020.141617303132
- [168] M.D. Kvalheim, P. Gustafson, and D. E. Koditschek, "Conley's fundamental theorem for a class of hybrid systems," arXiv:2005.03217 [cs, math], p. (in review for SIAM J. Appl. Dyn. Syst.) , May 2020. arXiv2005.03217.: 14222329
- [169] A.M. Johnson, S. A. Burden, and D. E. Koditschek, "A hybrid systems model for simple manipulation and self-manipulation systems," The International Journal of Robotics Research, vol. p35., 1354-1392, Å2016.ÅÅ 14212325
- [170] R.Goebel, R. G. Sanfelice, and A. Teel, "Hybrid dynamical systems," Control Systems, IEEE, vol. 29, no. p2., 28-2009.93, 1425
- [171] D.E. Koditschek, "总能量作为机械控制系统的利亚普诺夫函数的应用", 载于《多体系统的动力学和控制》，第97卷，第131-157页，AMS，1989。 15, 22, 2830
- [172] D.E. Whitney, "Resolved motion rate control of manipulators and human prostheses," IEEE Transactions on man-machine systems, vol. no10., p2., 47-1969.53, 15
- [173] J. H. Reif, "Complexity of the mover's problem and generalizations," in Proceedings of the 20th Annual Symposium on Foundations of Computer Science, SFCS '79, p. 421-427, IEEE Computer Society, 1979. 1529
- [174] S.M. LaValle, Planning algorithms.剑桥大学出版社2006。 1529
- [175] J.F. Canny, 机器人运动规划的复杂性.麻省理工学院出版社1988。 15
- [176] S.M. LaValle和J. J. Kuener, "随机运动动力学规划", 《国际机器人研究杂志》，第20,3782001.-400页5。 15
- [177] M.Farber, "运动规划的拓扑复杂性", 《离散与计算几何》，第29,2112003.-221页2。 15
- [178] D.E. Koditschek, "任务编码：走向机器人规划和控制的科学范式"  
机器人学和自主系统, 第9,1-2卷, 第5-39页。1-2, p. 5-391992., 1529
- [179] O.Khatib, "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots," The international journal of robotics research, vol. no5., p1., 901986.-98, 15
- [180] D.E. Koditschek和E. Rimón, "有边界的流形上的机器人导航函数", 《应用数学进展》，第11,412-442页1990.4。 152728
- [181] N.P. Bhatia and G. P. Szego, Stability theory of dynamical systems, vol. 161.Springer, 2002. 15
- [182] Y.Baryshnikov和B. Shapiro, "如何运行一个蜈蚣：一个拓扑学的角度", "在几何控制理论和亚黎曼尼几何中, 第37-51页, Springer国际出版2014。 15
- [183] Y.巴雷什尼科夫, "在复杂系统中拓扑方法的夏季数学研究生课程上发表的论文, 数学及其应用研究所, "反馈稳定中的拓扑迷惑, 72011.月 15

- [184] R.R. Burridge, A. A. Rizzi, and D. E. Koditschek, "Sequential composition of dynamically dexterous robot behaviors," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 18, no. 6, p. 534-555, 1999. [151631](#)
- [185] T.Lozano-Perez, M. T. Mason, and R. H. Taylor, "Automatic synthesis of fine-motion strategies for robots," *The International Journal of Robotics Research*, vol. no3,. p1,. 3-241984,. [152531](#)
- [186] R.E. Fikes和N. J. Nilsson, "Strips. 将定理证明应用于问题解决的新方法, "人工智能, 第2。 3-4, p. 189-2081971., [15](#)
- [187] N.霍根, "阻抗控制。一种操纵方法。第一部分-理论", 《动态系统、测量和控制杂志》, 第1-7页107,, 31985.月。 [15](#)
- [188] S.Guastello, D. Nathan, and M. J. Johnson, "Attractor and lyapunov models for reach and grasp movements with application to robot-assisted therapy.", *Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences*, vol. p13,. 99-121, January 2009.[15](#)
- [189] A.Bloch, D. E. Chang, N. Leonard, and J. Marsden, "Controlled lagrangians and the stabilization of mechanical systems. 二、 potential shaping, " *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 46, p. 1556-1571, October 2001.[15](#)
- [190] O.Arslan, D. P. Guralnik, and D. E. Koditschek, "Coordinated robot navigation via hierarchical clustering," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 32, no. 2, p. 352-371, 2016. [1526](#)
- [191] M.Farber, M. Grant, G. Lupton, and J. Oprea, "An upper bound for topological complexity," *Topology and its Applications*, vol. p255,. 109-125, Mar. 2019.[15](#)
- [192] A.M. Johnson和D. E. Koditschek, "Toward a vocabulary of legged leaping," in *IEEE Int.Conf. 抢劫。 Aut.*, pp. 25532013.-2560, [1526](#)
- [193] A.Brill, A. De, A. M. Johnson, and D. E. Koditschek, "Tail-assisted rigid and compliant legged leaping," in *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, p. (待发表) 2015。 [1526](#)
- [194] G. C. Haynes, F. R. Cohen, and D. E. Koditschek, "Gait transitions for quasi-static hexapedal locomotion on level ground," in *Robotics Research*, p. 105-121, Springer2011., [15](#)
- [195] D.E. Koditschek, "Robot planning and control via potential functions," in *The Robotics Review 1* (O. Khatib, J. Craig, and T. Lozano-Perez, eds.), vol. 1, p. 349-367, MIT Press, Cambridge, MA1989., [1522](#)
- [196] B.Donald, P. Xavier, J. Canny, and J. Reif, "Kinodynamic motion planning," *J. ACM*, vol. 40, no. p5,. 1048-10661993., [1629](#)
- [197] D.E. Koditschek, "Adaptive techniques for mechanical systems," in *Proc. 5th.Yale Workshop on Adaptive Systems*, p. 259-265, May 1987.[1630](#)
- [198] A.Rizzi, "混合控制作为机器人运动编程的方法", 在机器人和自动化, 论文集1998。 1998 IEEE 国际会议, 第8321998.-837页1。 [1630](#)
- [199] N.Ayanian, V. Kallem, and V. Kumar, "Synthesis of feedback controllers for multiple aerial robots with geometric constraints," in *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 3126-3131, Sep. 2011.[1630](#)
- [200] A.Bemporad和M. Morari, "鲁棒模型预测控制。 A survey," *Robustness in identification and control*, p. 207-1999.226, [1630](#)
- [201] L.Conway, "回忆vlsi革命。一系列的失败如何触发了数字设计的范式转变, "IEEE固态电路杂志, 第8-

31页4,, 122012.月。 16

[202] N.伯恩斯坦, 《运动的协调与调节》。Pergamon出版社1967。 16



- [203] R.Full and D. Koditschek, "Templates and anchors: neuromechanical hypotheses of legged locomotion on land," *The Journal of Experimental Biology*, vol. p202,. 33251999.-3332, [162330](#)
- [204] T.Libby, A. M. Johnson, E. Chang-Siu, R. J. Full, and D. E. Koditschek, "Comparative design, scaling, and control of appendages for inertial reorientation, " *IEEE Trans.Robotics*, vol. arXiv:1511.05958 [cs.RO], p. (submitted), Nov. 2015.[16](#)
- [205] J.Eldering, M. Kvalheim, and S. Revzen, "Global linearization and fiber bundle structure of invariant manifolds," *Nonlinearity*, vol. p31,. 4202-4245, Aug. 2018.[163031](#)
- [206] A.De, S. A. Burden, and D. E. Koditschek, "A hybrid dynamical extension of averaging and its application to analysis of legged gait stability:, *The International Journal of Robotics Research*, vol. p37,. 266-286, Mar 2018.[16232631](#)
- [207] A.De和D.E.Koditschek, "Averaged anchoring of decoupled templates in a tail-energized monopod," in *Robotics Research (A. Bicchi and W. Burgard, eds.), Springer Proceedings in Advanced Robotics*, , p. 269-285, Springer2018,, [1631](#)
- [208] A.De和D.E.Koditschek, "用于前向和反馈稳定的四足行走的垂直跳板组成, 踱步、代步和小跑, " 《国际机器人学杂志》再搜索, 第743-778页, J2018.une37,, [16252831](#)
- [209] A.Franci, M. Golubitsky, and N. E. Leonard, "The dynamics of multi-agent multi-option decision making," arXiv:1909.05765 [physics, q-bio], Sep arXiv2019.1909.05765.: [1723](#)
- [210] J.Guckenheimer and P. Holmes, *Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems, and Bifurcations of Vector Fields*.Springer1983,, [17222325](#)
- [211] T.T. Topping, V. Vasilopoulos, A. De, and E. Koditschek, Daniel, "Composition of templates for transitional pedipulation behaviors," in *Proc. Int.Symp.Rob.Res.2019*.". [1726](#)
- [212] E.Bizzi, F. A. Mussa-Ivaldi, and S. Giszter, "Computations underlying the execution of movement: a biological perspective," *Science*, vol. p253,. 287-291, Jul. 1991.[17](#)
- [213] L.L.H.Ting和J.L.McKay, "姿势和运动的肌肉协同的神经力学", 《当前神经生物学意见》, 第622-628页17,, 122007.月。 [17](#)
- [214] L.Ting, H. Chiel, R. Trumbower, J. Allen, J. L. McKay, M. Hackney, and T. Kesar, "运动模块化的神经力学原理及其对康复的影响, " *Neuron*, vol. p86,. 38-54, April 2015.[17](#)
- [215] J.Taborri, V. Agostini, P. K. Artemiadis, M. Ghislieri, D. A. Jacobs, J. Roh, and S. Rossi, "肌肉协同作用结果在诊所、机器人和运动中的可行性。系统回顾", 2018年4月。DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/3934698>. [17](#)
- [216] R.W. Ghrist, 《初级应用拓扑学》, 西雅图Createspace1.出版社, 编辑1.02014.。 [17212227](#)
- [217] M.Barr和C.Wells, 《计算科学的类别理论》, 第一卷。 1.Prentice Hall New York1990.。 [17](#)
- [218] P.Hudak, A. Courtney, H. Nilsson, and J. Peterson, "Arrows, robots, and functional reactive programming," in *International School on Advanced Functional Programming*, p. 159-187, Springer, 2002. [17](#)
- [219] I. Perez, M. Bärenz, and H. Nilsson, "Functional reactive programming, refactored," *ACM SIGPLAN Notices*, vol. p51,. 33-44, Sep. 2016.[17](#)
- [220] R.W. Brockett, "关于运动的计算机控制", 在论文集。1988年IEEE国际机器人学和自动化会议, 第534-540页, IEEE1988.。 [17](#)
- [221] R.Murray, D. Deno, K. Pister, and S. Sastry, "Control primitives for robot systems, " *IEEE*

Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. p22,. 183-193, Jan 1992.[17](#)

- [222] V.Manikonda, P. S. Krishnaprasad, and J. Hendler, "Languages, behaviors, hybrid architectures, and motion control," in Mathematical Control Theory (J. Baillieul and J. C. Willems, eds.) , p. 199-226, 斯普林1999.格。 17
- [223] D.Hristu-Varsakelis, M. Egerstedt, and P. S. Krishnaprasad, "On the structural complexity of the motion description language mdle," in 42nd IEEE International Conference on Decision and Control (IEEE Cat. No. 03CH37475), vol. p4,. 3360-3365, IEEE2003., 17
- [224] L.Doyen, G. Frehse, G. J. Pappas, and A. Platzer, "Verification of hybrid systems, " in Handbook of Model Checking, p. 1047-1110, Springer2018., 17
- [225] H.Kress-Gazit, G. Fainekos, and G. Pappas, "Temporal-logic-based reactive mission and motion plan- ning, " IEEE Transactions on Robotics, vol. p25,. 1370-1381, Dec. 2009.1732
- [226] N.Dantam和M. Stilman, "运动语法：机器人控制的语言学方法分析"。 IEEE Transactions on Robotics, vol. no29,. p3,. 704-7182013., 1732
- [227] H.Kress-Gazit, G. E. Fainekos, and G. J. Pappas, "将结构化英语转化为机器人控制器"。 先进的机器人技术, 第1343-1359页22,, 1月2008。 17
- [228] S.Tellex, T. Kollar, S. Dickerson, M. R. Walter, A. G. Banerjee, S. Teller, and N. Roy, "Understanding natural language commands for robotic navigation and mobile copying," in Twenty-Fifth AAAI Conference on Artificial Intelligence, August 2011.17
- [229] I.Saha, R. Ramaithitima, V. Kumar, G. J. Pappas, and S. A. Seshia, "Automated composition of motion primitives for multi-robot systems from safe ltl specifications, " in 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, p. 1525-1532, Sep 2014.17
- [230] K.W. Wong, R. Ehlers, and H. Kress-Gazit, "Resilient, provably-correct, and high-level robot behaviors, " IEEE Transactions on Robotics, vol. p34,. 936-952, Aug. 2018.17
- [231] S.Tellex, N. Gopalan, H. Kress-Gazit, and C. Matuszek, "使用语言的机器人", 《控制、机器人学和自主系统年度评论》, 第3,252020.-55页1。 17
- [232] A.Cowley和C. J. Taylor, "面向流的机器人编程。roshask的设计", 在2011年IEEE/RSJ智能机器人和系统国际会议上, 第1048-1054页, IEEE2011。 17
- [233] S.Kortik和U. Saranli, "使用乘法指数一阶线性逻辑的反链定理验证的机器人任务规划", 《智能与机器人系统》杂志, 第96卷, 第2期, 第179-2019.191页。 1732
- [234] S.戈恩, "计算机和信息科学：一个新的基础学科", SIAM评论, 第5,150-155页1963.2。 18
- [235] B.Hofstra, V. V. Kulkarni, S. M. -N.Galvez, B. He, D. Jurafsky, and D. A. McFarland, "The di- versity-innovation paradox in science," Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. p117,. 9284-9291, Apr. 2020.18
- [236] G. Stoet和D. C. Geary, "科学、技术、工程和数学教育中的性别平等悖论", 《心理科学》, 第581-593页29,, 4月2018。 18
- [237] D.M. Merolla和O. Jackson, "结构性种族主义是学术成就差距的根本原因", 《社会学指南针》, 第13,e12696页2019.6。 18
- [238] NAFSA, 损失的人才。政策资源, 国际教育工作者协会, 32020.月 18
- [239] D.M. Quinn和N. Cooc, "小学和初中的性别和种族/族裔的科学成就差距。趋势和预测因素, "《教

育研究者》, 第336-346页44,, 82015.月。 18

- [240] R.Mendoza-Denton, C. Patt, A. Fisher, A. Eppig, I. Young, A. Smith, and M. A. Richards, "Differences in stem doctoral publication by ethnicity, gender and academic field at a large public research university, " PLOS ONE, vol. p12,. e0174296, Apr 2017.18

- [241] J.A. Whittaker, B. L. Montgomery, and V. G. Martinez Acosta, "留住代表性不足的未成年人的教师。基于一系列学术机构的观点的机构价值主张的战略举措,"《本科神经科学教育杂志》,第A136-A145页13, 7月2015. 18
- [242] M.Berends, "社会学和学校选择。经过二十年的特许学校,我们知道什么,"社会学年度评论,第41,159-180页2015.1, 18
- [243] H.Jabbar, C. J. Fong, E. Germain, D. Li, J. Sanchez, W.-L. Sun, and M. Devall, "The competitive effects of school choice on student achievement: 系统回顾",《教育政策》,第9页。0895904819874756,2019. 18
- [244] S.Mishra, "社会网络、社会资本、社会支持和高等教育中的学术成功。以"代表不足"的学生为特别重点的系统回顾",《教育研究评论》,第2卷100307,2020.29, 18
- [245] C.詹金斯, "在我们向ai投入1000亿美元之前.....。", "VentureBeat, 8月2020.月 18
- [246] A.M. Johnson和S. Axinn, "自主机器人的道德",《军事道德杂志》,第12卷,第129-141页,7月2013. 18
- [247] M.Y. 瓦尔迪, "机器人会抢走我们的工作吗?", Apr 2016.18
- [248] A.伯恩斯坦和A.拉曼, "伟大的脱钩。Erik Brynjolfsson和Andrew McAfee的访谈,"六月2015. 18
- [249] J.Zysman和M.Kenney, "数字革命的下一个阶段:智能工具、平台、增长、就业",《ACM通讯》,第61,542018.-63页2, 18
- [250] B.Hecht, L. De Russis, L. Yarosh, B. Anjam, L. Wilcox, J. Bigham, J. Schoning, E. Hoque, J. Ernst, and Y. Bisk, "是时候做点什么了:通过改变同行评审程序减轻计算的负面影响," Mar 2018.18
- [251] K.施瓦布,《2018年未来工作报告》。新经济与社会中心,世界经济论坛,2018年。 18
- [252] D.H. Autor, "为什么还有这么多工作?工作场所自动化的历史和未来,"《经济展望》杂志,第3-30页29,, 9月2015. 18
- [253] V.I. Arnold,《普通微分方程》。麻省理工学院出版社1973. 2125
- [254] J.C. Willems, "开放和互连系统的行为方法",IEEE控制系统杂志,第46-99页27,, 12月2007.月。 2124
- [255] V.阿诺德,经典力学的数学方法。Springer1984.-Verlag, 21
- [256] S.Awodey, A. Pelayo, and M. A. Warren, "同构类型理论中Voevodsky的不对等性公理,"美国数学学会通知》(即将出版)2013. 21
- [257] C.R. Robinson, Dynamical Systems:Stability, Symbolic Dynamics, and Chaos.CRC出版社,第二版。1999. 222531
- [258] J.M. Alongi和G. S. Nelson, 递归与拓扑学,第85卷。American Mathematical Soc., 2007. 2223
- [259] J.W. Milnor, "Attractor," Scholarpedia, vol. p1,, Nov. 1815,2006.22
- [260] J.Palis and W. de Melo, Geometric theory of dynamical systems.介绍。由AK Manning从葡萄牙语翻

译。New York-Heidelberg-Berlin:Springer-Verlag1982., [22](#)

- [261] S.N. Simic, K. H. Johansson, J. Lygeros, and S. Sastry, "Towards a geometric theory of hybrid systems," Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems Series B: Applications and Algorithms, Vol. no12,,5-6, p. 649-6872005., [22](#)



- [262] A.D. Ames和S. Sastry, "A homology theory for hybrid systems:混合同构", 在国际混合系统研讨会上。计算和控制, 第86-102页, Springer2005。 22
- [263] E.D. Sontag, "作为类稳定行为的统一框架的Is哲学", 载于LECTURE NOTES IN CONTROL AND INFORMATION SCIENCES, p. 443-468, Springer2000., 222332
- [264] C.M. KELLETT, "Lyapunov第二方法中的经典逆向定理" Discrete and Continuous Dynamical Systems-Series B, vol. no20., 8,2015. 22
- [265] P.Giesl和S. Hafstein, "计算和验证lyapunov函数", SIAM应用动态系统杂志, 第1663-1698页14,, 12015.月。 22
- [266] D.E. Koditschek, "自然运动控制的一些应用", 《动态系统、测量和控制杂志》, 第1页113。 552,1991. 22
- [267] D.E. Koditschek, "机械系统中自然运动的控制", 《动态系统杂志》。 测量和控制, 第5471991.-551页113。 22
- [268] E.D. Sontag, "关于输入到状态稳定的进一步事实", "自动控制, IEEE Transactions on, 第35,473-476页1990.4。 23
- [269] E.Sontag and Y. Wang, "On characterizations of input-to-state stability with respect to compact sets," in Proc. IFAC Non-Linear Control Systems Design Symposium (NOLCOS'95), Tahoe City, CA, p. 226-1995.231, 23
- [270] J.P. LaSalle, "普通二微分方程的稳定性理论", 《二微分方程杂志》, 第57-65页4,, 11968.月。 23
- [271] F.W. Wilson, "平滑的函数导数和应用", 《美国数学会的交易》, 第4131969.-428页139。 23
- [272] M.W. Hirsch, Differential topology, vol. Springer-33.verlag New York1976., 23
- [273] S.A. Burden, S. S. Sastry, D. E. Koditschek, and S. Revzen, "Event-selected vector field discontinuities yield piecewise-differentiable flows, " SIAM Journal on Applied Dynamical Systems, vol. 15, no. 2, p. 1227-12672016., 2326
- [274] V.Vasilopoulos, G. Pavlakos, S. L. Bowman, J. D. Caporale, K. Daniilidis, G. J. Pappas, and D. E. Koditschek, "在未开发的语义环境中使用深度感知反馈的反应式语义规划, " IEEE机器人和自动化通讯, 第4455-4462页5,, J2020.ul. 23252729
- [275] V.V. Vasilopoulos, G. Pavlakos, K. Schmeckpeper, K. Daniilidis, and E. Koditschek, Daniel, "Reactive navigation in partially familiar non-convex environments using semantic perceptual feedback," (审查中) 2019。 23252729
- [276] W.Kalies, K. Mischaikow, and R. VanderVorst, "An algorithmic approach to chain recurrence," Foundations of Computational Mathematics, vol. no5., p4., 409-2005.449。 23
- [277] A.M. Bloch, Nonholonomic mechanics and control, Vol 24 of Interdisciplinary Applied Mathematics.Springer-Verlag, New York-Heidelberg-Berlin, ISBN 0-3870955352003.-6, 24
- [278] P.J. Gawthrop和G. P. Bevan, "Bond-graph modeling," IEEE Control Systems Magazine, vol. 27, p. 24-45, April 2007.24
- [279] A.Van Der Schaft和D. Jeltsema, "Port-Hamiltonian systems theory: 一个介绍性的概述"。 系统和控制的基础和趋势, 第2-3卷, 第1,1732014.-378页。 24

- [280] E.Lerman and J. Schmidt, "Networks of hybrid open systems," Journal of Geometry and Physics, vol. p149,. Mar. 103582,2020.[2432](#)
- [281] J.Guckenheimer, "A robust hybrid stabilization strategy for equilibria," Automatic Control, IEEE Transactions on, vol. no40,. p2,. 3211995.-326, [25](#)

- [282] J.Lygeros, K. H. Johansson, S. N. Simic, J. Zhang, and S. S. Sastry, "Dynamical properties of hybrid automata," *Automatic Control, IEEE Transactions on*, vol. no48, p1, 2-172003, 25
- [283] M.T. Mason和Y. Wang, "On the inconsistency of rigid-body frictional planar mechanics," in , *IEEE1988 International Conference on Robotics and Automation*, 1988.论文集, 第524-528页第1卷, 1988年。 25
- [284] A.Chatterjee, "On the realism of complementarity conditions in rigid body collisions," *Nonlinear Dynamics*, vol. no20, p2, 159-1999.168, 2527
- [285] Y. Y.Or和E.Rimon, "在机构滑动运动过程中对painlev'e悖论和动态干扰的调查", 《非线性动力学》, 第1647-1668页67,, 12012.月。 25
- [286] N.Fazeli, R. Kolbert, R. Tedrake, and A. Rodriguez, "Parameter and contact force estimation of planar rigid-body undergoing frictional contact," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 36, p. 1437-1454, Dec. 2017.2527
- [287] B.Kuipers, E. A. Feigenbaum, P. E. Hart, and N. J. Nilsson, "Shakey:从概念到历史"。爱》杂志, 第卷, 第38,88-2017.103页1,。 25
- [288] M.Dissanayake, P. Newman, S. Clark, H. Durrant-Whyte, and M. Csorba, "A solution to the simultaneous localization and map building (slam) problem," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. no17, p3, 229-2001.241, 25
- [289] B. Bucher, K. Schmeckpeper, N. Matni, and K. Daniilidis, "为更好地预测而行动"。arXiv:2003.06082 [cs], Jun arXiv2020.2003.06082.: 25
- [290] M.Kaess, H. Johannsson, R. Roberts, V. Ila, J. J. Leonard, and F. Dellaert, "isam2: Incremental smoothing and mapping using the bayes tree," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 31, p. 216-235, Feb. 2012.25
- [291] N.Atanasov, M. Zhu, K. Daniilidis, and G. J. Pappas, "Localization from semantic observations via the matrix permanent," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 35, p. 73-99, Jan 2016。 25
- [292] K.林奇和M.梅森, "动态欠驱动非全面操纵", 在IEEE/RSJ智能机器人和系统国际会议论文集。IROS '96, vol. 2, p. 889-896 vol.2, Nov 1996.25
- [293] N.Fazeli, M. Oller, J. Wu, Z. Wu, J. B. Tenenbaum, and A. Rodriguez, "See, feel, act: Hierarchical learning for complex manipulation skills with multisensory fusion," *Science Robotics*, Vol. 4, no. 26, p. eaav31232019,, 25
- [294] S.Seok, A. Wang, D. Otten, and S. Kim, "Actuator design for high force proprioceptive control in fast legomotion," in *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* , p. 1970-1975, Oct. 25
- [295] S.L. Bowman, N. Atanasov, K. Daniilidis, and G. J. Pappas, "Probabilistic data association for semantic slam," in *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp.1722-1729, IEEE2017。 25
- [296] A.Rizzi和D.Koditschek, "空间机器人杂耍的进展", 在Proc.IEEE国际机器人和自动化会议上, 第7751992.-780页。 25
- [297] B.C. Pierce, "Foundational calculi for programming languages.", in *The Computer Science and Engineering Handbook*, vol. p1997, 2190-2207, CRC1997,, 25
- [298] D.Lyons和M. Arbib, "基于感觉的机器人的正式计算模型," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. p5, 280-293, June 1989.25

- [299] S.M. LaValle, Sensing and Filtering: A fresh Perspective Based on Preimages and Information Spaces. Now2012., 25

- [300] B.R. Donald, "On information invariants in robotics," *Artificial Intelligence*, vol. 72, p. 217-304, Jan. 1995. [2526](#)
- [301] S.M. LaValle, "Sensor lattices:用于比较信息反馈的结构,"在2019年第12届机器人运动与控制国家间研讨会 (RoMoCo) 上, 第239-246页, J2019.ul. [2526](#)
- [302] H.Rahmani和J.M.O'Kane, "On the relationship between bisimulation and combinatorial filter reduction," in *IEEE2018 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* , p. 7314-7321, IEEE2018. [25](#)
- [303] F.Z. Saberifar, S. Ghasemlou, D. A. Shell, and J. M. O'Kane, "Toward a language-theoretic foundation for planning and filtering," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 38, p. 236-259, March 2019. [25](#)
- [304] I.E. Brown和G. E. Loeb, "创建和使用神经肌肉骨骼模型的还原主义方法", 载于姿势和运动的生物力学和神经控制 (J. Winters和P. Crago, 编辑), 第148-163页, Springer2000. [2526](#)
- [305] S.Sponberg和R. J. Full, "蟑螂在粗糙地形上快速奔跑时肌肉骨骼结构的神经力学反应", 《实验生物学杂志》, 第211卷, 第433-46页, 2月2008. [25](#)
- [306] T.Libby, C. Chukwueke, and S. Sponberg, "History-dependent perturbation response in limb muscle". *实验生物学杂志*, 第1期223. 1,2020. [25](#)
- [307] J.C. Spagna, D.I.Goldman, P. C. Lin, D. E. Koditschek, and R. J. Full, "Distributed mechanical feedback in arthropods and robots simplifies control of rapid running on challenging terrain," *Bioinspiration and Biomimetics*, vol. no2., p1., 9-182007., [2528](#)
- [308] A.T. Asbeck和M. R. Cutkosky, "设计用于攀登的顺应性脊柱机构", 《机械和机器人学杂志》, 第8卷. 4,2012. [25](#)
- [309] D.吉尔和W.M.J.格林, "1.4计算的未来。Bits + neurons + qubits," 在2020年IEEE国际固态电路会议 - (ISSCC), p. 30-39, Feb. 2020. [26](#)
- [310] W.Vega-Brown和N.Roy, "片断分析约束下的渐进式最优规划", 载于Algorithmic Foundations of Robotics XII:第十二届机器人学算法基础研讨会论文集》(K. Goldberg, P. Abbeel, K. Bekris, and L. Miller, eds.), Springer高级机器人学论文集, 第528-543页, Springer国际出版社2020. [26](#)
- [311] G. Indiveri, B. Linares-Barranco, T. J. Hamilton, A. van Schaik, R. Etienne-Cummings, T. Delbruck, S. -C.Liu, P. Dudek, P. Häfliger, S. Renaud, and et al .,"Neuromorphic silicon neuron circuits," *Frontiers in Neuroscience*, Vol. 5,2011. [26](#)
- [312] A.Neckar, S. Fok, B. V. Benjamin, T. C. Stewart, N. N. Oza, A. R. Voelker, C. Eliasmith, R. Manohar, and K. Boahen, "Braindrop:一个具有基于动态系统的编程模型的混合信号神经形态架构," 《IEEE论文集》, 第107卷, 第144-164页, 2019年1月. [26](#)
- [313] R.W. Brockett, "动态系统及其相关的自动机," *MATHEMATICAL RESEARCH*, vol. p77., 49-1994. [26](#)
- [314] A.De, T. T. Topping, J. D. Caporale, and D. E. Koditschek, "A universal template for pitch-steady behaviors in planar floating-torso locomotion models," (under review), p. (under review), June 2020. [26](#)
- [315] C.Eppner, S. Höfer, R. Jonschkowski, R. Martín-Martín, A. Sieverling, V. Wall, and O. Brock, "Lessons from the amazon picking challenge:构建机器人系统的四个方面", 载于《机器人学：科学与系统2016.》。 [27](#)

- [316] M.Coste, An introduction to o-minimal geometry. Istituti editoriali e poligrafici internazionali Pisa 2000.,  
[27](#)



- [317] J.T. Schwartz和M. Sharir, "论 "钢琴搬运工 "问题。 二、 计算实代数流形的拓扑特性的一般技术, " 《应用数学进展》, 第298-351页4, 9月1983. [27](#)
- [318] S.Basu, "O-minimal geometry中的组合复杂性", 《伦敦数学学会论文集》, 第100,405-428页 2010.2,。 [27](#)
- [319] L.A. VAN DEN DRIES 和 L. Van den Dries, Tame topology and o-minimal structures, Vol. 248. 剑桥大学出版社1998。 [27](#)
- [320] J.Aguilar, T. Zhang, F. Qian, M. Kingsbury, B. McInroe, N. Mazouchova, C. Li, R. Maladen, C. Gong. M.Travers, and et al, "A review on locomotion robophysics: the study of movement at the intersection of robotics, soft matter and dynamical systems," Reports on Progress in Physics, vol. p79,. 110001, 9月2016. [27](#)
- [321] S.Karaman和E. Frazzoli, "高速飞行在一个错误的森林中, " 在机器人和自动化 (ICRA) , IEEE2012国际会议上, 第2899-2906页, IEEE2012.。 [27](#)
- [322] O.Arslan和D.E.Koditschek, "在未知的凸球体世界中基于传感器的反应性导航"。 国际机器人研究杂志》, 第196-223页38, 32019.月。 [27](#)
- [323] E.Rimon和D.E. Koditschek, "The construction of analytic diffeomorphisms for exact robot navigation on star worlds," Transactions of the American Mathematical Society, vol. no327,. p1,. 71-1161991., [27](#)
- [324] Y.LeCun, Y. Bengio, and G. Hinton, "Deep learning," Nature, vol. no521,. p7553,. 436-4442015.[27](#)
- [325] M.Fazlyab, A. Robey, H. Hassani, M. Morari, and G. Pappas, "Efficient and accurate estimation of lipschitz constants for deep neural networks," in Advances in Neural Information Processing Systems, p. 114272019.-11438, [27](#)
- [326] J.Redmon and A. Farhadi, "Yolov3: An incremental improvement," arXiv preprint arXiv:1804.027672018., [27](#)
- [327] G. Pavlakos, X. Zhou, A. Chan, K. G. Derpanis, and K. Daniilidis, "6-dof object pose from semantic keypoints," in IEEE2017 International Conference on Robotics and Automation (ICRA) , p. 2011-2018, IEEE2017.。 [27](#)
- [328] S.Revzen和D.E.Koditschek, "为什么我们需要更多的自由度, "在Procedia IUTAM, 第2024届国际理论和应用力学大会--多学科研究的基础, 第89-93页, Elsevier2017.。 [28](#)
- [329] A.De和D.E.Koditschek, "Parallel composition of templates for tail-energized planar hopping", in 2015IEEE Int.Conf.Rob.Aut., p. (in press), May 2015.[2831](#)
- [330] K.Sims, "Evolving virtual creatures," in Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer graphics and interactive techniques, p. 15-221994., [28](#)
- [331] A.Censi, "A class of co-design problems with cyclic constraints and their solution," IEEE Robotics and Automation Letters, vol. p2,. 96-103, Jan. 2017.[28](#)
- [332] H. Hauser, H. Sumioka, R. M. Eichslin, and R. Pfeifer, "关于形态逻辑计算特刊的介绍, " 《人工生命》, 第119,-8页2013.1.。 [28](#)
- [333] A.Cangelosi, J. Bongard, M. H. Fischer, and S. Nolfi, "Embodied intelligence," in Springer Handbook of Computational Intelligence, p. 697-714, Springer Berlin Heidelberg2015., [28](#)
- [334] N.霍根, "一类自主运动的组织原则", 《神经科学杂志》, 第2745-2754页4, 111984.月。 [29](#)

- [335] J.Norby和A.M.Johnson, "Fast global motion planning for dynamic legged robots," in Proceedings of the IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, p. (待发表) 2020。 29

- [336] T.T. Topping, V. Vasilopoulos, A. De, and D. E. Koditschek, "Towards bipedal behavior on a quadrupedal platform using optimal control," in SPIE Defense+ Security, p. 98370H-98370H, International Society for Optics and Photonics 2016., 30
- [337] S.Revzen, B. D. Ilhan, and D. E. Koditschek, "Dynamical trajectory replanning for uncertain environments," in Decision and Control (CDC), 2012 IEEE 51th Annual Conference on, p. 3476-3483, 2012. 30
- [338] S.Strogatz, 非线性动力学和混沌：在物理学、生物学、化学和工程学中的应用。Perseus 1994., 30
- [339] D. E. Koditschek和M. Buhler, "简化的跳跃机器人的分析", 《国际机器人研究杂志》, 第587-605页10,, 十二月1991。 31
- [340] W.J. Schwind 和 D. E. Koditschek, "Control of forward velocity for a simplified planar hopping robot," in Robotics and Automation, 1995.Proceedings., 1995年IEEE国际会议, 第691-696页1,, IEEE 1995。 31
- [341] R.M. Ghigliazza, R. Altendorfer, P. Holmes, and D. Koditschek, "A simply stabilized running model". SIAM REVIEW, vol. no47., p3., 5192005.-549, 31
- [342] E.Haghverdi, P. Tabuada, and G. J. Pappas, "Bisimulation relations for dynamical, control, and hybrid systems," Theoretical Computer Science, vol. 342, p. 229-261, Sep. 2005.3132
- [343] A.D. Ames, A categorical theory of hybrid systems.博士论文, Citeseer 2006。 32
- [344] A.Girard和G. Pappas, "离散和连续系统的近似度量", IEEE Transactions on Automatic Control, 第782-798页52,, 5月2007。 32