

Research
Intelligent Manufacturing—Article

情境感知智能产品的生物启发式设计

Ang Liu^{a,*}, Ivan Teo^a, 陈点滴^b, Stephen Lu^c, Thorsten Wuest^d, 张执南^e, 陶飞^f^a School of Mechanical and Manufacturing Engineering, University of New South Wales, Kensington, NSW 2033, Australia^b Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China^c Department of Industrial and Systems Engineering, University of Southern California, Los Angeles, CA 90089, USA^d College of Engineering and Mineral Resources, West Virginia University, Morgantown, WV 26506, USA^e School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China^f School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 23 June 2018

Revised 3 March 2019

Accepted 10 June 2019

Available online 3 July 2019

关键词

设计方法

生物启发式设计

情境感知

智能设计

摘要

信息通信技术 (ICT) 和网络物理系统 (CPS) 的快速发展, 为智能产品的日益普及铺平了道路。情境感知是衡量产品智能的一个重要角度。与人工制品不同, 各种生物系统具有非凡的情境感知能力。生物启发式设计 (BID) 是最常用的设计策略之一。然而, 迄今为止, 很少有研究检查过情境感知智能产品的生物启发式设计。本文提出了一个结构化设计框架, 用以支持情境感知智能产品的生物启发式设计。本文从产品设计角度定义了情境感知的概念。该框架以功能-行为-结构理论 (the situated function-behavior-structure ontology) 为基础开发而成。本文规定了结构化设计过程, 借助各种生物启发, 支持不同的概念设计活动, 如问题形成、结构重构、行为重构和功能重构。一些现有的设计方法和新兴的设计工具被纳入框架。本文提出了一个案例研究, 展示了如何利用该框架重新设计机器人吸尘器, 使其更具有情境感知能力。

© 2019 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

信息通信技术 (ICT) 和网络物理系统 (CPS) 的快速发展为各种智能产品的日益普及铺平了道路[1]。产品智能包含多个角度, 其中, 情境感知是一个关键角度。情境感知是指产品能够准确地解释其所处的独特环境, 从而有目的地执行适当的操作。人们已经开发了許多情境感知信息系统 (如推荐系统和移动应用程序) [2]。情境的加入可以显著提高这些信息系统的有效性[2]。然而, 迄今为止, 除了一些值得注意的例外, 开发情境感知产品和制造系统的努力相对较少[3]。没有设计框

架可用于指导情境感知产品的概念设计。

与人工制品不同, 各种生物系统具有非凡的情境感知能力。例如, 蜜蜂可以通过偏振光感知外在环境, 通过电感受 (electroreception) 来定位花粉、感知雷暴天气, 通过摆尾舞与同伴交流情境信息。作为一种设计方法, 生物启发式设计 (BID) 对设计界来说并不陌生。一方面, BID 已被证明有助于提高设计创意, 增加构思多样性, 激发创新[4]; 另一方面, BID 与内在障碍有关, 如生物学家和工程师之间的沟通障碍、建立初始类比的困难及思维定式[5]。尽管过去 BID 已被用于设计无数的人工制品 (包括许多制造系统[5]), 但对智能产品 BID 的

* Corresponding author.

E-mail address: ang.liu@unsw.edu.au (A. Liu).

研究却很少。因此，本文提出了一种新的智能产品生物启发式设计框架，即“**BID-SP**框架”。

2. 研究背景和动机

人们已经从认知学和计算机科学等不同学科视角，对“情境”的概念进行了广泛研究[2]。关于情境，有两种典型的观点[6]：代表性观点认为情境是一种信息形式，可以通过一组可观察和适当的属性来描述[6]。相反，交互性观点认为情境中的情境和动作是一个整体（即情境触发动作，动作改变情境）。本研究采用了代表性观点。具体而言，情境被定义为将共同表征某种情况的一组信息，在该情境下期望产品以适当的方式表现，满足用户需求。因此，情境感知指的是产品用于指导决策、调整行为和结构的感知、解释、学习和整合情境信息的能力。可以以不同的方式获取情境信息，如通过显式方法（如产品、用户和环境之间的直接沟通）、隐式方法（如用户调查、产品评论和使用报告）和统计方法（如进行数据分析，寻找产品共同的有意义的模式）。不同时间点获取的情境信息可以组合起来，构建整体的情境感知。历史数据对于情境建模和挖掘来说很有用，而实时数据对于情境匹配和学习来说很有用。无处不在的计算数据对于情境预测和适应来说很有用[2]。

从生物系统中寻求启发是开发更多情境感知产品的一个有前途的方向。第一，各种生物系统可以通过不同的生物机制实现相同的环境感知。例如，寄居蟹、蛇和象可以分别通过声音、气味和振动与同伴交流。第二，相同的生物机制可以实现不同类型的情境感知。例如，章鱼依靠偏振光来导航方向、探测危险和跟踪猎物。第三，许多生物系统具有多个情境的全面感知。例如，蠕虫分别通过磁感应、化学受体和敏感皮肤来导航方向、定位食物和避开捕食者。此外，某些生物系统可以为了一个目标整合各种情境信息。例如，鸭嘴兽可以通过整合电感、嗅觉和触觉来探测猎物。最后，由于自然选择，大多数生物系统的成员能够在极端限制下，以极具成本效益和能源效率的方式实现情境感知。

3. 情境感知产品设计框架

3.1. 理论基础

BID-SP框架是基于功能-行为-结构（**FBS**）理论[7]开发的，其中，“功能”“行为”“结构”分别描述了“对

象用来干什么”“对象能做什么”“对象是什么样的”。**FBS**的设计实体、关系和操作都以解决方案中立的方式定义，因此适用于生物系统和人工制品（尤其是智能产品，其特点是硬件、软件和服务无缝集成）。**FBS**通过行为在功能和结构之间形成桥梁。由于行为被定义为“从对象的结构派生出的属性”来描述“对象能做什么”[7]，可以从生物系统和人工制品中导出相同的行为集，这种共享行为是实现**BID-SP**框架的要素。据我们所知，不曾有人以**FBS**理论为基础进行**BID**。

从情境认知的角度来看[7]，**BID-SP**框架指导设计师来回穿越于三个相互关联的“世界”，即预期世界、解释世界和外部世界。首先，期望世界由设计师的期望构成，即为了满足客户需求，产品应如何运行、表现和构造；其次，解释世界是由设计师的理解构成，即为了分别在自然选择和市场竞争中胜出，生物系统和人工制品如何运作、表现和构造；最后，外部世界指的是生物系统和人工制品所处的现实世界。现在，许多智能产品存在于两个外部世界——物理世界和数字世界。图1(a)阐明了产品设计中典型的三类生物启发。

类型I：对生物系统的理解，启发设计师调整对人工制品能或不能做某动作，动作的内容、方式和程度的期望。例如，观察蜜蜂如何协调行为，令设计师想知道无人机可以在多大程度上以类似的方式同步动作[8]。这种生物启发主要发生在系统设计过程中明确任务的阶段[9]。

类型II：在解释世界中，对生物系统的理解会影响对人工制品的理解。这种生物启发一直是之前许多设计研究的重点。

实质上，这涉及通过制定一组解决方案中立的函数，在生物系统与人工制品之间建立类比，泛化生物系统的工作原理，并应用于人工制品。这种类型的生物启发主要发生在系统设计过程概念设计的阶段[9]。

类型III：在外部世界中，可以通过直接观察、分析和测量生物系统的物理结构和机制来获得设计启发。这种生物启发虽然是最直接的，但很少会带来突破性的创新，因为它强调实例设计。此外，外部世界中的生物系统和人工制品之间存在双向作用，人工行为对生物系统的演变施加着有意/无意的影响。

3.2. 逐步设计过程

如图1(b)所示，生物启发智能产品的设计过程由8步构成。这一过程包括概念设计的关键活动，包括问

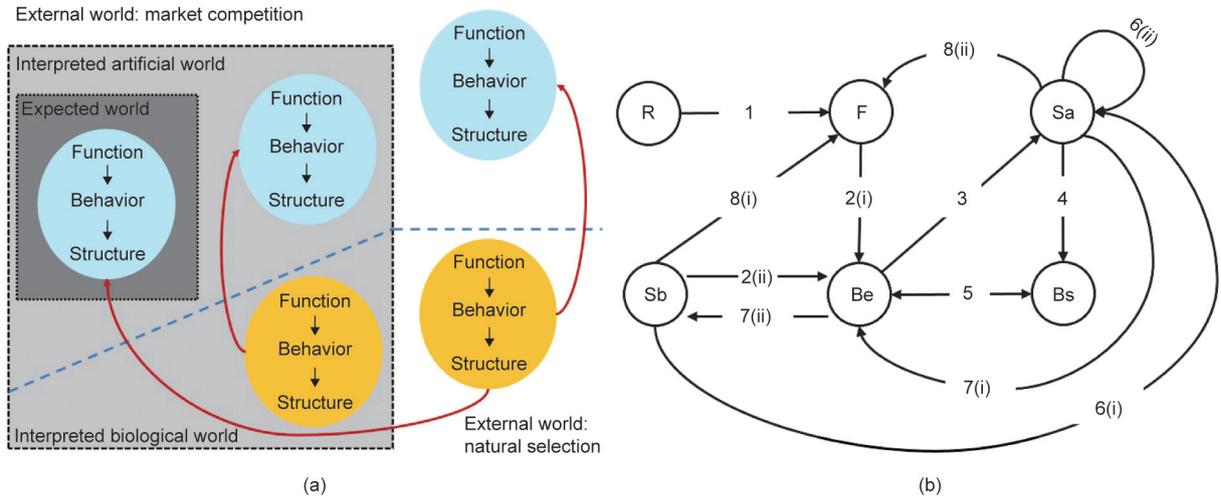


图1. FBS框架中的生物启发式设计。(a) 产品设计中典型的三类生物启发；(b) 生物启发式智能产品设计过程。R: 需求；F: 功能；Be: 预期行为；Bs: 实际行为；Sb: 生物结构；Sa: 人工结构。

题形成（步骤1和2）、概念形成（步骤3）、概念评估（步骤4和5）及概念改进（步骤6、7、8）。我们使用提出的框架，为一个现有人工制品配置新的、更高级、更整体的情境感知能力，这实质上是重新设计的过程。

3.2.1. 步骤 1——形成情境感知相关设计问题

第一步是将客户需求转化为产品功能。在实践中，可以采用设计方法来征求、理解和组织客户需求，如 Kano 模型[10]和情境设计[11]。受功能基础[12]的启发，规定了一系列基本功能实体和流程实体，组成了与情境相关的功能，如表1中所列举。功能以<动词+对象>的格式表示。设计人员可以自由组合基本功能（动词）和流程（对象），以制定与情境感知相关的功能。这种修改的功能基础是以解决方案中立的方式开发的，因此组合功能同等适用于生物系统和人工制品。

四个基本功能类是“感知情境”“过程情境”“学习情境”和“响应情境”，它们会被进一步分解为更具体的实体。产品设计的语境分为四类：物理情境（即周围环境的相关信息）、社交情境（即附近产品和服务的相关信息）、用户情境（即用户和用户-产品交互的相关信息）和操作情境（即产品运行状态的相关信息）。例如，一台具有用户情境感知能力的咖啡机，应该改变咖啡味道，迎合用户的人口统计数据、偏好和健康情况。一台具有社交情境感知能力的咖啡机，应该识别附近的同行产品（如咖啡研磨机和牛奶起泡器）和可用资源（如冰箱中的咖啡粉囊包和牛奶）。

层次结构可被信息系统用于组织情境信息，被设计师用于组织功能。因此，可以根据其抽象级别和依赖关

表1 情境感知相关功能基础

Basic function		Flow	
Function entity	Basic “verbs”	Flow entity	Basic “objects”
Perceive context	Detect	Physical context	Time
	Confirm		Location/territory
	Display		Weather
	Monitor		Temperature
	Navigate		Humidity
	Search		Direction
Process context	Request	Social context	Air/water quality
	Recognize		Peer products
	Import/export		Hostility/danger
	Translate		Hospitality
	Compare		Complementary service
	Clean/filter		Resource supply
Learn context	Integrate/fuse	User context	User demographics
	Uncouple		User habit
	Communicate		User preference
	Validate		User knowledge
	Memorize		User mood/health
	Track		Operation context
Respond context	Analyze	Operation context	Degree of wear
	Diagnose		Computing power
	Change		Intelligence
	Actuate		Maintenance record
	Escape		Software update

系将与情境感知相关的功能组织成层次结构。例如，总功能<感知物理情境>可以被分解为更具体的子功能<感知温度><感知湿度>和<感知位置>。当必须同时考虑多个情境（如物理情境+用户情境）时，分层结构特别有用。

3.2.2. 步骤 2——确定相关生物系统并制定预期行为

接下来, 将上述公式化的函数转换为预期行为。与纯粹基于功能制定预期行为的FBS框架不同, 本文提出的框架中, 预期行为直接来自生物系统。从有形生物系统中获取行为, 比从无形的功能中获取行为更为直接。换句话说, 生物系统如何以及在何种程度上表现出情境感知能力, 是设定“预期”的生物启发。这对应了生物启发的类型I。

生物界有800多万物种。本研究共分析了74种具有强情境感知能力的生物系统, 如表2所列举。我们按照Shu [13]的方法, 基于搜索引擎和BID数据库[14], 识别、比较和选择了这些生物系统。类似的生物系统可通过功能-行为对检索获得。然后, 类似生物系统的特定部分/机制/原理, 将为后续步骤(即功能、行为和结构的重构)提供设计启发。如表3所示, 规定了半结构化功能行为矩阵(功能行为矩阵)以便于类似生物系统的检索。矩阵的第一列有9个常用功能, 第二行是从所选生物系统中提取的10个关键行为。在矩阵的每个单元

表2 所选具有情境感知能力的生物系统

No.	Bio-system	No.	Bio-system	No.	Bio-system
1	Snake	26	Moth	51	Cuttlefish
2	Armadillo	27	Cricket	52	Cod fish
3	Crocodile	28	Firefly	53	Goby fish
4	Chameleon	29	Wolf	54	Remora
5	Sandfish lizard	30	Mite	55	Pigeon
6	Gecko	31	Caterpillar	56	Polar bear
7	Green frog	32	Octopus	57	Peacock
8	Fruit fly	33	Giant squid	58	Raven
9	Honey bee	34	Jaguar	59	Ostrich
10	Black garden ant	35	Ghost crab	60	Reindeer
11	Gravel ant	36	Spiny lobster	61	Aardvark
12	Badger	37	Sea turtle	62	African elephant
13	Dung beetle	38	Flashlight fish	63	Bat
14	Jewel beetle	39	Mantis shrimp	64	Whale
15	Carrion beetle	40	Snails	65	Manatee
16	Woodworm	41	Rhinoceros	66	Bloodhound
17	Earthworm	42	Plankton	67	Platypus
18	Glowworm	43	Catfish	68	Rat
19	Echidnas	44	Salmon	69	Seal
20	Spider	45	Shark	70	Star-nosed mole
21	Butterfly	46	Piranha	71	Rabbit
22	Monarch butterfly	47	Damselfish	72	Pig
23	Mosquito	48	Electric ray	73	Monkey
24	Cockroach	49	Elephantnose fish	74	Zebra
25	Stick insect	50	Anglerfish		

内, 数字对应于表2中的生物系统。换句话说, 一旦建立了功能-行为对, 该矩阵就用于指导设计师定位一组类似的生物系统。

不同的功能-行为对, 会选出不同的生物系统, 即使是相同的功能-行为对, 也可能选出多个可用生物系统。因此, 当考虑了多个功能-行为对时, 相同的生物系统可能在不同单元中多次出现。在这种情况下, 该生物系统的出现频率, 表明了与目标产品的类似程度。注意, 功能-行为矩阵涵盖了适用于大多数智能产品的10个功能, 而其他功能可以在实践中制定。

3.2.3. 步骤 3——基于预期行为搭建人造结构

然后, 运用人工方式搭建人造结构, 以展现出上述提出的预期行为。“人造结构”的概念可以将该结构与生物系统的结构区分开来。因为人造结构由多个组件(设计参数)组成, 一个组件存在许多替代方案, 所以可以采用形态图来搭建不同的结构。设计约束(DC)会限制解决方案的合成。了解了生物系统如何在恶劣条件下保持情境感知能力, 设计师就可以获得生物启发。例如, 因为撒哈拉沙漠的蚂蚁不能长时间处于极端高温条件下(最高70 °C), 所以它们可以通过内部的计步器, 记录爬行距离, 通过太阳角度计算最佳路线。

3.2.4. 步骤 4——分析人工结构并得出实际行为

接下来, 从上述人造结构中可得出实际行为。实际行为的推导, 首先要构建解释结构, 然后导出解释行为[7]。解释结构可以使用快速原型方法[15]在物理空间中构建, 也可以使用基于仿真和虚拟现实(VR)的设计工具在虚拟空间中构建[16]。由于人工结构由多个组件(设计参数)组成, 因此可以根据不同组件之间的依赖关系, 利用设计结构矩阵[17]进行分析。

3.2.5. 步骤 5——比较实际行为与预期行为

将人造结构导出的实际行为, 与生物结构导出的预期行为进行比较。该比较将触发三个随后的重构步骤(即步骤6、7和8)。如果实际行为明显低于预期行为, 设计师应相应地重新制定人工结构, 预期行为或功能。在实践中, 可以通过数字孪生等新兴技术, 增强预期行为与实际行为的比较效果。通过该技术, 可将实际行为的相关数据(从实体产品得出)与预期行为的相关数据(从产品的数字表示得出)进行实时比较[18]。

表3 用于检索相关生物系统的功能-行为对

Function	Behavior									
	Taste sense	Olfactory sense	Touch sense	Infrasound	Heightened sight/sound	Chemical signals	Vibratio signals	Polarized/UV light	Echolocation	Magneto-reception
Navigate direction	32	1, 9, 10, 21, 22, 23, 43, 45, 55, 66, 68	20, 68	9, 32, 33, 52, 64	6, 10	10, 24, 40, 43	11, 20, 62, 66, 68, 69	10, 32, 39, 60, 66, 68	63, 64	9, 16, 23, 36, 37, 42, 44, 45, 48, 55
Detect nearby bio-systems	1, 32, 33, 43, 71, 72	1, 8, 9, 22, 26, 43, 45, 68	20, 43, 65	32, 43	6, 7, 81	9, 33, 43, 62, 66	1, 5, 7, 20, 27, 43, 52, 62, 65, 66	21, 22, 32, 39, 60, 66	63, 64	42, 45, 67
Communicate with peers		9, 10	9, 10, 62	27, 57, 62	4, 6	40	62	28	63, 64	
Detect predators		2, 40, 43, 73	10, 16, 32	57, 62	6, 32, 33, 51	4, 32, 43	1, 9, 16, 27, 52, 69	21, 39, 40, 47	64	
Track target (prey)	1, 8, 21, 62, 67, 71, 72	1, 3, 8, 9, 26, 45, 67	20, 43, 65, 67, 68, 69	3	6, 7, 33, 39	16, 21, 33, 43, 52	1, 5, 7, 20, 62, 66, 68, 69	39, 47, 66	63, 64	19, 45, 48, 49, 67
Recognize owner (hospitality)	1, 8, 9, 17, 21, 33, 43, 67, 71, 72	1, 2, 8, 9, 10, 22, 25, 32, 43, 45, 68	16, 20, 32, 43, 62, 68, 73	3, 57, 62	6	10, 21, 32, 33, 40, 43	1, 5, 7, 16, 20, 27	27, 44, 47, 51, 60, 66	63, 64	9, 19, 42, 45, 49, 67
Search resources		9, 21, 22, 55, 66	3, 9, 16, 24, 40, 65		6, 7, 8, 43	3, 40	16, 24, 25, 52, 62	9, 16, 47	63, 64	36, 42, 45
Search service (bio-symbiosis)	7, 11, 15, 20, 30, 31, 37, 45, 48, 54	74	39, 53, 54, 71		39, 45, 59	11, 31	53		58	
Monitor weather		9, 55, 62, 66	32			4, 7, 32, 51	17, 62	17, 32, 45, 51		

UV: ultraviolet.

3.2.6. 步骤6——基于生物启发重构人造结构

根据FBS理论，设计创新主要由三个重构步骤（即结构、行为和功能的重构）引发。在本文提出的框架中，重构步骤都得到了生物启发的支持。结构重构的目的，是逐步消除预期行为与实际行为之间的矛盾。因此，只有实际行为不满足预期行为时，才需要重构。基于参考文献[4]中规定的BID流程，这一步可进一步分为三个子步骤：①重新定义生物解决方案；②提取出解决方案中性工作原理；③将工作原理应用于人工结构。这一过程对应于生物启发的类型III。可以通过实施更严格的DC来重构人造结构。

3.2.7. 步骤7——根据生物启发重构预期行为

如果结构重构不能完全消除预期行为与实际行为的不一致，则可以基于生物启发重构预期行为。由于预期行为是在步骤2中从生物系统中提取出来的，预期行为的重构主要指重新选择类似的生物系统。换句话说，应

该建立新的类比。例如，可以通过考虑在不同生存条件下相同生物家族内的生物系统的变化来重塑预期行为。同时，应通过考量人工智能和机器学习等技术发展来重构预期行为，这将会影响设计师的期望。例如，通过增材制造，设计师现在可以基于来自生物结构（如蜂窝结构）的灵感来设计高度复杂的结构。

3.2.8. 步骤8——根据生物启发重构功能

最后，利用生物启发，重新构建功能。首先，如图1中的箭头8(i)所示，可以从生物系统中提取新功能，并将其转移到智能产品。具体而言，类似的生物系统被视为智能产品的同行产品，并且基于生物系统和智能产品之间的相似性生成功能推荐。其次，如图1中的箭头8(ii)所示，可以基于耦合关系重构功能。生物系统管理功能耦合的方式，可以启发设计师。关于如何管理功能耦合，可以从生物系统中获得灵感。例如，蚂蚁利用偏振光和气味来导航，利用气味和触觉与同伴交流，而

气味在交换网络内的情境信息中起到关键作用。蚂蚁的气味受体比其他昆虫多4~5倍[19]。

图2展示了生物启发式智能产品设计过程的流程图。图中还包括可用于简化每个步骤的具体设计方法和工具。

4. 案例研究

在本节中，通过一个案例研究，我们展示了如何使用BID-SP框架来开发智能产品。我们的任务是重新设计扫地机器人iRobot Roomba 650 (Roomba)，使其更具有情境感知能力。

4.1. 步骤 1—— 根据客户需求制定功能

客户需求来自于Amazon.com的在线顾客评论。我们进行了系统的定性数据分析，共分析了50个顾客评

论（从1级到5级，每个级别选取10个评论）。通过系统的定性数据分析[20]，检索这些评论中隐含的设计信息。该过程共有五步：数据收集、转录、分割、分类和编码。与情境感知相关的客户需求有：

- 机器人有时会拾起宠物粪便，弄得满地都是；
- 如果机器人被卡住了，用户应该收到移动应用的通知；
- 边界传感器会把黑色地毯当成边界，因此机器人会卡住；
- 机器人扫地前不能先拖地；
- 清扫路线似乎是随机的……看起来哪里被打扫过了。

考虑以上客户需求，基于功能基础（表1）制定了一组功能，包括<识别较为集中的待清扫区域><标记清扫区域><识别婴儿/宠物><识别垃圾类型><识别困住卡死场景><规划清扫路线><与同行产品通信><寻求用

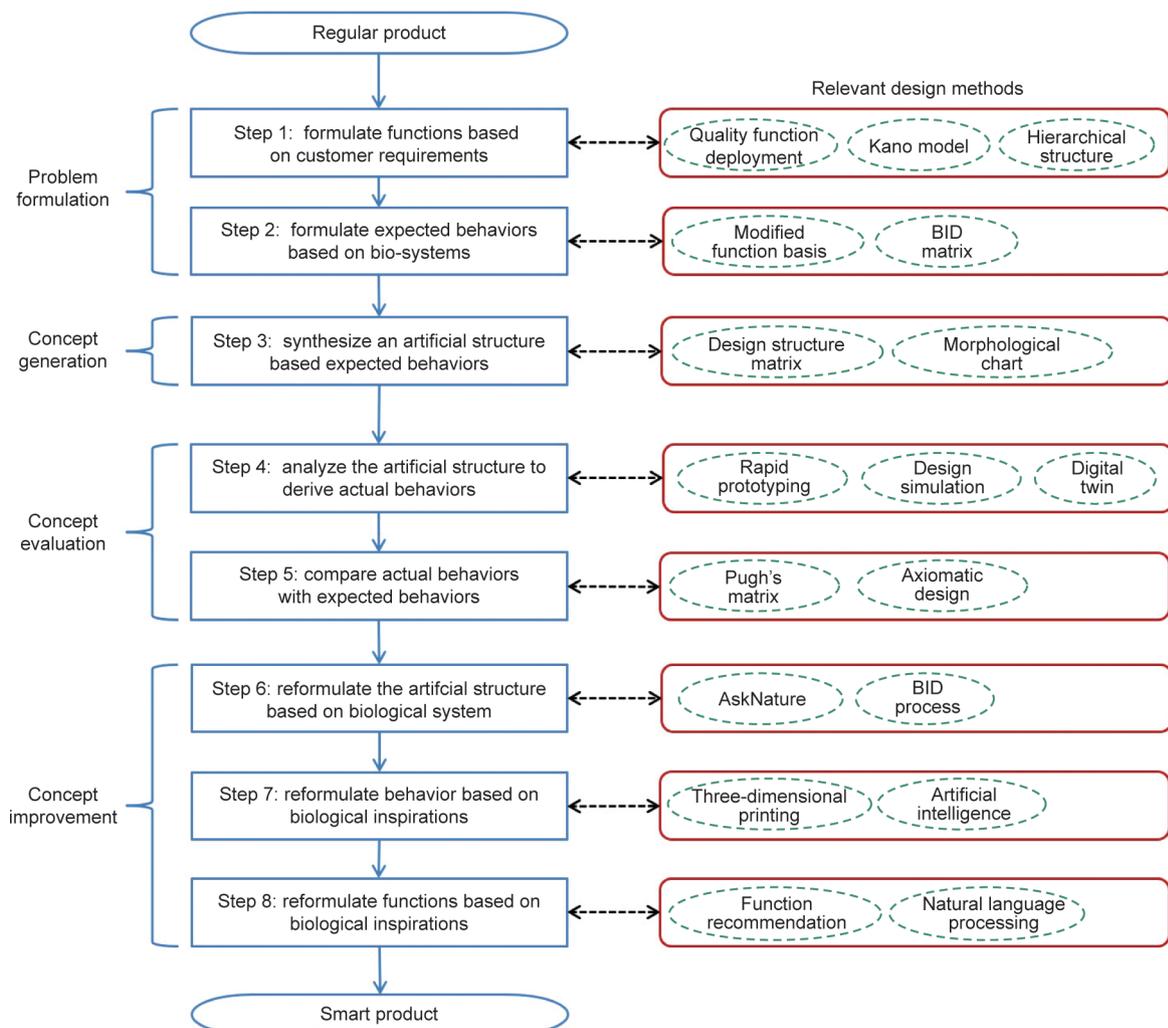


图2. 生物启发式智能产品设计过程的流程图。

户干预>。

图3展示了完整的功能层次结构，突出显示了与情境感知相关的功能。

4.2. 步骤 2——根据生物系统制定预期行为

如表4所示[21,22]，以上功能被映射到从生物系统提取出的预期行为上。例如，蜜蜂使用信息素与同伴交流，使用“舞蹈语言”传递食物位置信息，因此从蜜蜂身上提取出“气味线索”和“运动线索”。在这种情况下，虽然“气味线索”和“运动线索”都是从同一生物系统中提取出来的，但它们被用于不同的功能。另一方面，可以从不同的生物系统中提取到相同的行为。例如，蜘蛛、蛇和蜜蜂都依靠振动来识别移动的物体。

4.3. 步骤 3——根据预期行为构建人造结构

基于预期行为，我们提出了一组设计参数（DP）来实现预期功能。每个功能有多个DP备选方案，因此可以将这些设计参数集成到不同的系统解决方案（人工结构）中。结果基于形态图进行组织，如表5所示。

4.4. 步骤 4——分析人工结构并得出实际行为

表6列举了一系列人工组件，可为Roomba添加，增强其环境感知能力。一些实际行为是由各个组件导出的。

4.5. 步骤 5——比较实际行为与预期行为

将来自人工组件的实际行为，与来自生物系统的预期行为进行比较。例如，乌鸦表现出强烈的逻辑思维。乌鸦依靠逻辑（而不是本能）来解决问题。用来模拟这种行为的人工组件是模糊逻辑，模糊逻辑是Roomba整体控制系统的一部分。模糊逻辑可以用一个连续的频谱解释变量（如“稍暖”和“稍凉”），从而代替了二进制值（即“热”和“冷”）。模糊逻辑使机器人在解决问题时更加有逻辑性。利用模糊逻辑，Roomba不仅可以区分“卡住”或“自由”两个状态，还可以根据车轮牵引力数据，评估卡住的程度。因此，Roomba在选择寻求用户干预的时机时更加智能。例如，如果Roomba检测到硬地板上有大片潮湿区域，则可以利用模糊逻辑评估混乱程度，在进行进前，“更智能”地判断是否应该通知用户。这种智能可能会防止Roomba接触和散布宠物粪便。

4.6. 步骤 6——根据生物启发重构人造结构

基于生物启发，重新制定人造结构。例如，乌鸦不仅可以依据逻辑性解决问题，还可以修改现有解决方案，使其适应新问题。这一原则可以启发设计师，将模糊逻辑与基于案例的推理相结合。模糊逻辑使Roomba能够准确地评估问题情况（如被卡住的程度）并主动识别新问题（如是怎样被困住的）。基于案例的推理则使Roomba将当前问题与历史问题进行比较，确定它们之间的相似度。将所有Roombas连接到基于云的中央数据

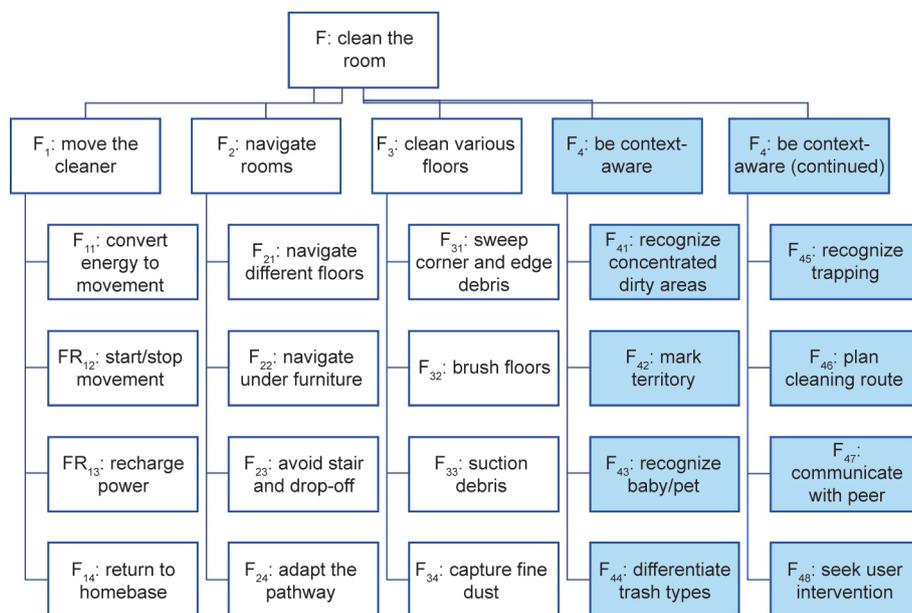


图3. 情境感知扫地机器人的功能层次结构。

表4 功能-行为匹配结果

Function	Expected behavior	Behavior of bio-systems
Recognize a dirty area	Image sharpness	Falcons can “see” prey when flying at high speed, due to sharp images created by a unique retina structure with fewer vessels
	Image coverage	Jump spiders have eight eyes to create 360° image coverage
	Odor cues	Snakes use the tongue to pick up scents and locate the scent source
	Polarized light	Mantis shrimps rely on the torsional rotation of their eyes to maximize the polarization contrast [21]
Mark territory	Odor cues	Wolves use scent to mark territory and the hunting route
	Chemical scent	Spiders release a special chemical scent to warn other spiders
	Acoustic signals	Male green frogs can lower the dominant frequency of calls to mark and defend territory [22]
Recognize trash type	Image sharpness	Falcons can “see” prey when flying at high speed, due to sharp images created by a unique retina structure with fewer vessels
	Odor cues	Octopuses rely on smell to differentiate good food from bad food
Recognize baby or pet	Odor image	Bloodhounds can create an “odor image” in the brain based on the complex combination of various smells
	Vibration	Snakes locate prey through vibration waves
	Touch sense	Octopuses rely on sensitive feelers to distinguish objects
	Echolocation	Bats produce echolocation sound to detect obstacles
Recognize trapping	Touch sense	Bees can use their antennae to gauge the dimensions of an object
	Polarized light	Octopuses use polarized vision to measure the amount of light
	Fuzzy logic	Ravens use logical thinking to assess a trapping situation
Plan cleaning route	Compass bearing	Ants can correct the route based on visual landmarks
	Odor sense	Ants can create a traceable trail by dropping pheromone
	Counting steps	Desert ants calibrate a mental clock according to the motion of the sun and count steps to navigate direction in the featureless desert
Communicate with peers	Vibration	Elephants coordinate actions by making the group rumble
	Odor cues	The queen bee produces different pheromones to characterize situations
	Touch sense	Ants touch each other to share information about food
Seek user intervention	Logical thinking	Ravens employ logic to solve problems, even if it is a problem that does not exist in the natural domain
	Movement cues	Ravens draw other predators such as wolves to food through movement cues, by circling dead or dying prey
	Movement cues	Bees convey an image of the location of food sources through a dance language

表5 设计参数形态图

Function	DP				
	1	2	3	4	5
Recognize dirty area	360° camera	Bio-electronic nose	Master/slave protocol	Fuzzy logic	Image processing
Mark territory	Bio-electronic nose	Flavor-releaser	Ultrasonic sensor	Touch sensor	UV light sensor
Recognize baby/pet	Image sensor	Bio-electronic nose	Ultrasonic sensor	Camera	Vibration sensor
Recognize trash type	Vibration sensor	Odor sensor	Touch sensor	Pressure sensor	Camera
Recognize trapping	Displacement sensors	Case-based reasoning	Vibration sensor	Master/slave protocol	Proximity sensor
Plan cleaning route	Odor sensor	Compass	Touch sensor	LIDRA	Master/slave protocol
Communicate with peers	Vibration sensor	Touch sensor	Odor sensor	Dancing algorithm	Fog computing
Seek user intervention	Smartphone APP	Dancing	Alarm	Augmented reality	Fuzzy logic & case-based reasoning

库，储存不同情境中（如各种家庭环境）的各种历史卡顿问题，可以进一步增强推理的有效性。这样就可以通过共享数据创建一种群体智能。此外，可以通过雾计算最小化网络延迟，从而及时响应任何后续情况。

4.7. 步骤 7——根据生物启发重构预期行为

预期行为与实际行为之间的比较引发了新的设计理念。例如，蜂王会产生一种特殊的信息素，来与工蜂交流[23]。蜂王通过在蜂巢内移动并留下信息素的痕迹来

表6 由人工组件得出的实际行为

Component	Actual behavior			
	1	2	3	4
360° camera	Degree	Resolution	Water resistance	Battery life
Bio-electronic nose	Electronic signals	Mass spectrometry	Acoustic wave	Organic polymers
Vibration sensor	Frequency	Piezoelectric effect	Electrical charge	Resonance
Master/slave protocol	Command sending	Command execution	Data transfer	Latency
Proximity sensor	Resolution	Calibration	Feedback	Electromagnetic field
Fog computing	Security	Date storage	Computing power	Latency
Fuzzy logic	Control accuracy	Adaptive adjustment	Rules	Problem type
Case-based reasoning	Case storage	Case access	Case indexing	Case searching

传播信息素。然而，这种行为无法被WiFi或其他网络技术完全实现，因为路由器无法移动；这将导致Roomba的信号覆盖出现问题。例如，在大型房屋中，如果Roomba被困在没有WiFi覆盖的角落，人们可能很难找到它。当蜂巢受到攻击时，蜂王会释放一种特殊的警报信息素，标记入侵者，吸引其他蜜蜂保护蜂巢。信息素由不同的化合物组成，使蜜蜂可以追踪、定位或攻击移动的目标[24]。信息素的气味越强，蜜蜂就越有攻击性。因此，抽象行为是“信息素强度”和“情境信息素线索”。因此，将预期行为从“情境信息素线索”重构为“信息素强度”，来反映这种行为不一致性。

4.8. 根据生物启发重构功能

一些新功能从类似的生物系统中抽象出来，转移给了Roomba。例如，Roomba可以连接到家庭安全系统，如闭路电视（CCTV）摄像机系统，识别入侵者。这个简单的网络允许安全系统暂时“奴役”Roomba，使用它的传感器进行遥测，也可以反向连接。当Roomba检测到可疑活动，可以向CCTV系统发送激活信号。接入安全系统后，Roomba可以部署更多的传感器，访问更大的数据库。Roomba-CCTV网络也可以改善其他功能。例如，如果Roomba认为黑色地毯是边界，则可以交叉参考传感器的遥测与CCTV系统摄像机的图像。这种人为行为的灵感来自蚂蚁的生物行为，其中一种蚂蚁可寄生在双物种群体内的另一物种，以完成其他物种更适合的任务。

总之，本文提出的BID过程，提高了扫地机器人的情境感知能力。第一，机器人得到了一组新功能，这些新功能都是基于所述功能基础而制定的，特别是情境感知；第二，对于每种与情境感知相关的功能，根据生物学灵感提出了多种DP替代方案；第三，通过将其实际

行为与相应生物系统的预期行为进行比较，对所提出的DP替代品进行定性评估。

5. 结论和未来工作

本文提出了一个结构化的BID-SP设计框架。本文的贡献包括首次将FBS理论用于BID流程。一些现有设计方法和新兴的设计工具也被整合到BID-SP框架中。此外，还规定了系统化的设计流程，以便利用生物启发来设计智能产品，尤其是情境感知产品。从产品设计的角度定义了情境感知，并分析了一系列具有情境感知能力的生物系统。与BID集成，有利于FBS理论的发展。在传统的FBS过程中，预期行为直接来自无形的功能，而这是一项非常具有挑战性的设计操作，因为功能应该是解决方案中立的。在本文提出的框架中，预期行为来自有形的生物系统。此外，FBS的三个重构步骤，得到了生物启发的支持。

本文仍有一些不足。第一，虽然产品智能本质上是一个多角度的概念，但本研究只关注了其中一个角度（即情境感知能力）。其他角度（如服务和认知工程）将在未来的工作中进一步开展研究。第二，设计是基于作者所选的情景感知生物系统进行的，由于设计思维定式，这些系统可能存在偏差。第三，虽然我们提出了一些改善该设计过程的设计方法，但并未详细阐述执行过程，因为这不是本研究的重点。第四，虽然案例研究可以有效地描述如何根据所述框架，解决现实世界的设计问题，但可能不能完全展示出新设计概念的实际性能。

本研究表明，利用生物启发设计智能产品，是一个前景广阔的发展方向。通过调整研究策略和框架，可以改善产品智能的其他方面，如适应性、位置感知和网络感知能力。未来的工作将侧重于情境感知和网络感知之

间的重叠。考虑生物系统在不同情境下如何构建不同网络、协调动作，由此可以得到设计启发。鉴于案例研究方法的描述性，我们将构建一个原型设备来说明从这项工作中获得的设计概念；基于此设备，我们将通过设计实验验证新的情境感知功能的实际性能。

致谢

本文的部分研究得到国家自然科学基金项目(51875030)的支持。

Compliance with ethics guidelines

Ang Liu, Ivan Teo, Diandi Chen, Stephen Lu, Thorsten Wuest, Zhinan Zhang, and Fei Tao declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Abramovici M, Stark R, editors. Smart product engineering: proceedings of the 23rd CIRP Design Conference; 2013 Mar 11–13; Bochum, Germany. Berlin: Springer-Verlag; 2013.
- [2] Adomavicius G, Tuzhilin A. Context-aware recommender systems. In: Ricci F, Rokach L, Shapira B, editors. Recommender systems handbook. New York: Springer; 2015. p. 191–226.
- [3] Ong SK, Zhu J. A novel maintenance system for equipment serviceability improvement. *CIRP Ann* 2013;62(1):39–42.
- [4] Helms M, Vattam SS, Goel AK. Biologically inspired design: process and products. *Des Stud* 2009;30(5):606–22.
- [5] Shu LH, Ueda K, Chiu I, Cheong H. Biologically inspired design. *CIRP Ann* 2011;60(2):673–93.
- [6] Dourish P. What we talk about when we talk about context. *Pers Ubiquitous Comput* 2004;8(1):19–30.
- [7] Gero JS, Kannengiesser U. The situated function–behaviour–structure framework. *Des Stud* 2004;25(4):373–91.
- [8] Floreano D, Wood RJ. Science, technology and the future of small autonomous drones. *Nature* 2015;521(7553):460–6.
- [9] Pahl G, Beitz W. Engineering design: a systematic approach. 3rd ed. London: Springer Science & Business Media; 2013.
- [10] Xu Q, Jiao RJ, Yang X, Helander M, Khalid HM, Opperud A. An analytical Kano model for customer need analysis. *Des Stud* 2009;30(1):87–110.
- [11] Holtzblatt K, Wendell JB, Wood S. Rapid contextual design: a how to guide to key techniques for user-centered design. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers; 2004.
- [12] Stone RB, Wood KL. Development of a functional basis for design. *J Mech Des* 2000;122(4):359–70.
- [13] Shu LH. A natural-language approach to biomimetic design. *Artif Intell Eng Des Anal Manuf* 2010;24(4):507–19.
- [14] AskNature [Internet]. Missoula: The Biomimicry Institute; c2018 [cited 2019 Jun 17]. Available from: <https://asknature.org/>.
- [15] Sass L, Oxman R. Materializing design: the implications of rapid prototyping in digital design. *Des Stud* 2006;27(3):325–55.
- [16] Nee AYC, Ong SK, Chryssolouris G, Mourtzis D. Augmented reality applications in design and manufacturing. *CIRP Ann* 2012;61(2):657–79.
- [17] Browning TR. Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: a review and new directions. *IEEE Trans Eng Manage* 2001;48(3):292–306.
- [18] Tao F, Sui F, Liu A, Qi Q, Zhang M, Song B, Nee AYC. Digital twin-driven product design framework. *Int J Prod Res* 2018:1–19.
- [19] Zhou X, Slone JD, Rokas A, Berger SL, Liebig J, Ray A, et al. Phylogenetic and transcriptomic analysis of chemosensory receptors in a pair of divergent ant species reveals sex-specific signatures of odor coding. *PLoS Genet* 2012;8(8):e1002930.
- [20] Liu A, Lu SCY. A crowdsourcing design framework for concept generation. *CIRP Ann* 2016;65(1):177–80.
- [21] Daly IM, How MJ, Partridge JC, Temple SE, Marshall NJ, Cronin TW, et al. Dynamic polarization vision in mantis shrimps. *Nat Commun* 2016;7(1):12140.
- [22] Bee MA, Perrill SA, Owen PC. Male green frogs lower the pitch of acoustic signals in defense of territories: a possible dishonest signal of size? *Behav Ecol* 2000;11(2):169–77.
- [23] Beggs KT, Glendinning KA, Marechal NM, Vergoz V, Nakamura I, Slessor KN, et al. Queen pheromone modulates brain dopamine function in worker honey bees. *Proc Natl Acad Sci USA* 2007;104(7):2460–4.
- [24] Wager BR, Breed MD. Does honey bee sting alarm pheromone give orientation information to defensive bees? *Ann Entomol Soc Am* 2000;93(6):1329–32.