



动物-机器混合社群融合技术: 进展述评

刘方邻^{1*}, 蒋雪利^{1,2}, 狄纳言¹

1. 中国科学院合肥物质科学研究院, 合肥 230031;

2. 中国科学技术大学研究生院, 合肥 230026

* 联系人, E-mail: fliliu@ipp.ac.cn

2022-12-10 收稿, 2023-07-09 修回, 2023-07-10 接受, 2023-07-13 网络版发表

中国科学院重点部署项目(KGFZD-135-17-010)资助

摘要 人们正在研发机器人, 将其融入动物群, 参与和协调动物群体自组织行为和决策过程, 以达到控制动物群体的目的. 这种由动物与机器人组成的混合社群, 因其潜在应用前景而备受关注. 但要成功地将机器人融入动物群面临诸多挑战, 其中一个主要挑战是如何使机器人被动物群体接受并与合作. 围绕这个问题, 本文从仿生机器人研发和引入动物群方式两个方面, 综合评述了动物-机器混合社群的研究现状和发展趋势, 指出因动物亲属识别能力, 机器人外形的仿生设计很难使其被动物接受, 提出未来应重视利用动物群个体间互动规则构建动物-机器混合社群, 包括基于动物局部互动规则的自适应机器人研发和基于动物印记学习机制的机器人融入方式创新, 以及为此需要努力解决的若干关键问题.

关键词 动物-机器互动, 仿生机器人, 亲属识别, 印记学习, 自组织, 群体决策

随着神经科学、信息科学和人工智能等多学科的交叉融合, 科研人员将微型电极植入动物体内, 通过电极输入特定含义信号, 刺激动物肌肉或神经组织, 按照人的意愿, 控制动物运动和和行为, 或者利用动物感知和导航能力, 通过电极收集动物感知的信号, 引导机器人搜索和定位目标(图1(a)). 例如, 将蚕蛾触角整合到机器人导航系统, 引导机器人朝着特定气味(如蚕蛾信息素)运动^[1], 或者将完整的蚕蛾集成到机器人控制系统, 利用蚕蛾灵敏嗅觉指引机器人搜索和定位气味源^[2]. 这种将人工电极(人工智能)植入动物(生物智能)体内构成的生物-机器杂合系统(bio-machine hybrid system)常被称为动物机器人(animal robots)^[3,4].

上述人工智能与生物智能的融合是在动物个体水平上, 另一类融合是在动物群体水平上(图1(b)), 即将一个或多个机器人融入动物群体中, 作为群体成员参与和协调动物群体自组织(self-organization)行为和群体

决策(collective decision-making), 以控制动物群体行为. 例如, 1999年卡内基梅隆大学(Carnegie Mellon University)科研人员将微型机器人融入鸡群, 通过与鸡互动, 以期控制鸡群^[5]. 相对于纯动物构成的群体, 这种由动物和机器人构成的群体被称为动物-机器混合社群(animal-robot mixed society)^[6]. 在动物-机器混合社群中, 机器人与动物之间存在互动, 不同于引导鸭群到指定地点的Robot Sheepdog^[7]和教老鼠推动杠杆获取食物的W-M6 Rat-like Robot^[8], 这些仅机器人单方面作用于动物群. 另外, 动物-机器混合社群是基于动物群体行为设计和研发的, 也不同于基于个体行为的人-机交互(human-robot interaction)系统, 是一个全新的研究领域.

动物-机器混合社群可作为研究动物群体行为和进化的手段^[9-11], 也可用于家禽、家畜和野生动物智能化的管理工具^[12,13]. 例如, 老鼠、蝗虫等有害动物是高度

引用格式: 刘方邻, 蒋雪利, 狄纳言. 动物-机器混合社群融合技术: 进展述评. 科学通报, 2023, 68: 3052–3062

Liu F L, Jiang X L, Di N Y. Integrated technologies of an animal-robot mixed society: A systematic review (in Chinese). Chin Sci Bull, 2023, 68: 3052–3062, doi: [10.1360/TB-2022-1265](https://doi.org/10.1360/TB-2022-1265)

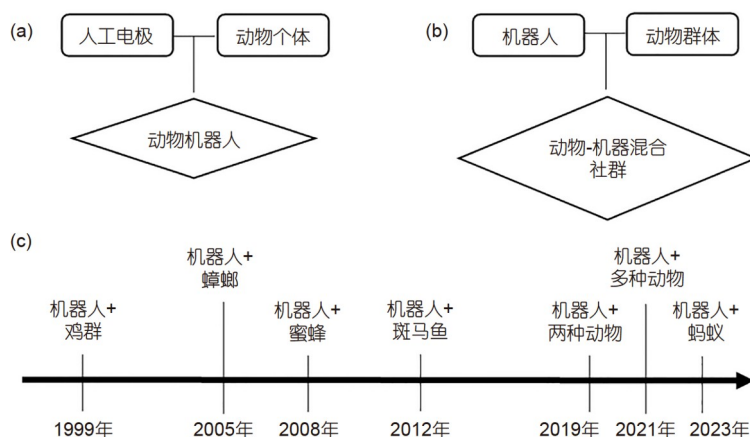


图1 人工智能与生物智能融合形式((a), (b))及动物-机器混合社群研发进展(c)

Figure 1 The integrated forms of artificial and biological intelligence ((a), (b)) and the painstaking development of animal-robot mixed societies (c)

群居性的, 当它们集中停歇在某个地方, 就可能造成重大灾害. 在这种情况下, 如果将机器人引入动物群, 调整群体内个体之间互动关系, 能够诱导动物离开停歇地, 免遭危害. 因其潜在应用前景, 动物-机器混合社群的研发已引起广泛关注. 构建动物-机器混合社群, 主要涉及机器人研发和将其融入动物群体两个关键环节. 其中, 融入动物群体包括将机器人引入到鸡、鱼、昆虫等其中一种动物群体, 也有将机器人融入由两种及两种以上动物组成的混合动物群体^[14-20](图1(c)).

目前研发工作集中在研发模拟鸡、鱼、昆虫等动物的形态、运动、信息交流的机器人, 期望机器人引入动物群体后, 能被动物接受为同伴, 参与动物群体决策^[9,10]. 虽然已研发出高仿真性机器人, 但实际有用的动物-机器混合社群比较少见, 主要问题是融入的机器人很难被动物接受并合作. 本文围绕机器人被动物接受问题, 以机器人与一种动物构成的混合社群为例, 从机器人研发和融入动物群方式两个方面, 评述动物-机器混合社群研发现状, 提出未来努力方向和需要解决的问题, 以期推动相关研究.

1 机器人仿真性能与其被动物接受情况

1.1 仿动物形态和运动的机器人及其被动物接受情况

有不少实验室利用鱼群构建动物-机器混合社群, 主要是因为鱼群容易获得, 尤其是斑马鱼, 繁殖率高、世代时间(generation time)短和集群现象明显^[13], 以及实验研究所需场地小. 一些行为学证据表明, 鱼类可根据对象面部和体表颜色, 快速识别对象是否为同类^[21].

为诱导鱼群跟随机器鱼或与机器鱼互动, 科研人员从视觉感知方面, 研发与真实鱼类外形和运动相似的机器鱼.

目前实验室已研制出模拟鱼类体型、体色和运动的机器鱼. Bartolini等人^[22]研发的机器鱼可模拟斑马鱼(*Danio Rerio*)体型和运动模式. 他们测试了斑马鱼对机器鱼的反应, 结果表明, 完全复制斑马鱼的体型和颜色的机器鱼可吸引斑马鱼跟随. 类似地, Bonnet等人^[23,24]研发的仿生鱼可模拟斑马鱼运动, 能吸引斑马鱼跟随. 他们用此仿生鱼构建了鱼群-机器混合群体.

模仿其他鱼类体型和运动的机器人也得到了类似结果. Poverino等人^[25]发现机器鱼体表颜色和摆尾频率是吸引黄金鳊(*Notemigonus crysoleucas*)的关键. 如果机器鱼体表为自然颜色(灰色), 当机器鱼以与黄金鳊相同频率摆尾时, 其被黄金鳊跟随的时间就长, 并吸引黄金鳊在机器鱼相同深度的水域游动. 如果机器鱼体表为红色或静止在水中, 就不能吸引黄金鳊跟随. 另外, 模拟孔雀鱼(*Trinidadian guppies*)眼睛与自然运动模式的机器鱼, 被孔雀鱼接受的程度会显著提高^[26].

基于鱼类体型和运动等视觉信息研发的仿生鱼, 对鱼群的影响与环境有关, 如果在黑暗环境中, 机器鱼被鱼群接受的程度就比较低. 例如, Bierbach等人^[27]研制了模仿短鳍玛丽鱼(*Poecilia mexicana*)的机器鱼, 分别测试了适应黑暗栖息地(洞穴)和自然光照下鱼群对机器鱼的反应. 结果表明, 在光照条件下, 短鳍玛丽鱼能接受机器鱼, 而在黑暗条件下, 鱼群对机器鱼没有明显响应^[27].

1.2 仿动物通讯方式的机器人及其被动物接受情况

有效的通讯和信息交流有利于动物群体内部个体之间互动^[28]。Worm等人^[29]研制出模拟弱电鱼(*Mormyrus rume*)电信号通讯方式的仿生机器鱼,并测试了该机器鱼被弱电鱼接受的程度,以及机器人与弱电鱼之间的互动。测试表明,弱电鱼倾向于与发射电信号的机器鱼互动。Worm等人^[30]进一步比较了弱电鱼对静态和随机两种放电模式的反应,当机器鱼模拟弱电鱼产生间隔性放电模式时,鱼群与机器鱼之间的互动有所增强。

舞蹈是蜜蜂(*Apis mellifera*)将食物源方位信息传递给同伴的重要通讯方式,即当觅食成功的蜜蜂返巢后,会在垂直巢脾上跳“8”字舞,传递食物源方位信息,引导同伴去该地点采集食物^[31]。Michelsen等人^[32]较早研发了舞蹈机器蜂,可模拟蜜蜂“8”字舞蹈及舞蹈蜂发出的振翅声音^[33]。类似于Robot Sheepdog^[7],这种机器蜂仅作用于蜂群,与蜜蜂之间没有互动,融入蜂群后,不能诱导蜜蜂出巢访问舞蹈所指示的地点。

德国柏林自由大学Landgraf等人^[17]发展了仿真性更好的舞蹈机器蜂:首先,赋予了机器蜂真实的舞蹈轨

迹,而不是简单的“8”字运动;其次,综合了蜜蜂舞蹈时释放的多种信号,包括舞蹈蜂振翅频率和振翅发出的声音^[33],以及舞蹈蜂体温^[34]和舞蹈蜂释放的特殊气味^[35];更重要的是,增加了反馈机制,机器蜂可与跟随蜂的触角、头部接触,与跟随蜂交哺(trophallaxis)和交流信息^[36,37],以及自主避开巢脾上蜜蜂比较集中的区域等^[17]。虽然机器蜂与蜜蜂外形差异比较大,但可与蜜蜂互动,并诱导蜜蜂出巢。然而,没有观察到蜜蜂利用机器蜂舞蹈信息,拜访舞蹈所指定的地点^[38]。

参考Landgraf等人^[17]设计,我们研制了一台机器蜂(图2)。机器蜂被固定在活动杆顶端,与蜜蜂大小相当,维持较高体表温度,通过观察箱正面的玻璃窗口被插入蜂群(约4000只蜜蜂)。由电机驱动转动杆,按照真实舞蹈轨迹,在距离巢脾1~2 mm的二维平面运动,产生13 Hz摆腹频率,用+/-5 V矩形脉冲驱动扬声器,扬声器的振动传递给机器蜂翅膀,产生280 Hz振翅和气流。另外,巢箱内嵌计算机视觉系统,监视机器蜂与蜜蜂互动,通过反馈机制,促使机器蜂自动与跟随蜂交哺。实际测试结果与Landgraf等人^[38]类似,机器蜂与蜜蜂有互动,未能诱导蜜蜂拜访指定地点。

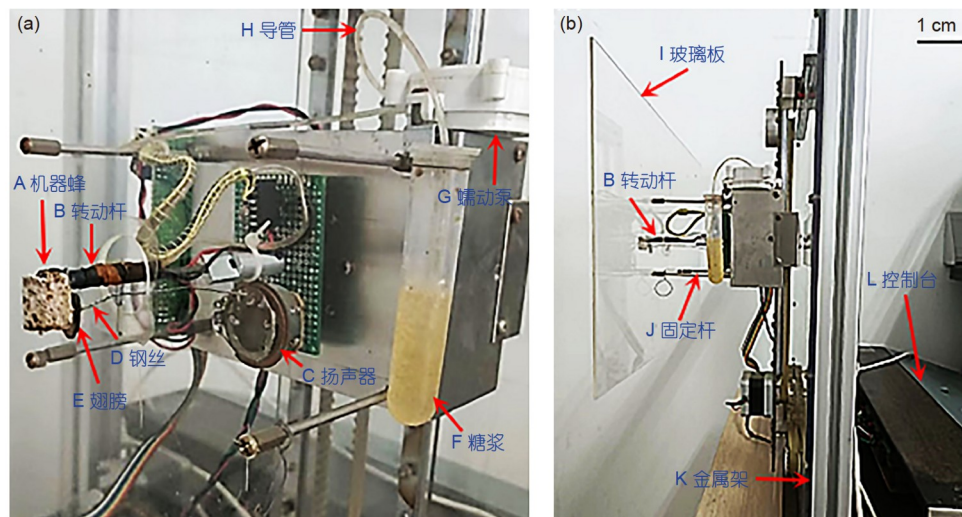


图2 舞蹈机器蜂及构建部件。(a) 侧面45°视角看机器蜂。机器蜂(A, 1.2 cm×1.1 cm)固定在活动杆(B)顶端,通过观察箱窗口(10 cm×10 cm)插入蜂群,伸出3 cm。扬声器(C)振动通过钢丝线(D)传导到转动翅膀(E)引起翅膀径向振动。糖浆(F)通过蠕动泵(G)和软管(H)输送到机器蜂头部。(b) 侧面90°视角看支撑系统。观察箱开口的玻璃盖板(I, 36 cm×24 cm)由4根直杆(J)固定,与金属架(K, 42 cm×42 cm)平行间隔14.5 cm。操作台(L)控制机器蜂二维平面舞蹈运动、振翅及与跟随蜂交哺

Figure 2 A robotic bee and its essential parts. (a) Lateral view (45°) of the robotic bee (A, 1.2 cm×1.1 cm) at the end of an active rod (B). Its body is inserted into an observation hive through a window (10 cm×10 cm), protruding 3 cm from the glass. Vibrations of a loudspeaker (C) are transmitted through a stiff wire (D), the end of which is glued to the tip of a plastic wing (E), and induced radial movements of the wing. Tiny drops of sugar water (F) are driven by a pump (G) to the head of the robot via a pipe (H). (b) Left view (90°) of the supporting parts. They include a glass (I, 36 cm×24 cm), fixed by 4 rods (J), paralleling 14.5 cm with a frame (K, 42 cm×42 cm), to cover the open window of the observation hive, and an operator (L) for controlling the robot's 2-D dancing movement, wings vibration and its trophallaxes with the following bees

尽管人们花费了大量精力研发仿真性能高的机器人,但机器人在动物形态、体色、运动和通讯行为方面的仿真性,似乎很难提高其被动物群体接受的程度。实际上,群居性动物有很强的亲缘识别(kin recognition)能力,不仅可识别对方是否为同类,甚至能识别与对方亲缘关系远近,决定是否与对方合作^[39]。例如,蜜蜂可识别来自其他蜂群的个体,并把它们驱赶出自己所在的巢箱^[40]。我们和Landgraf等人^[17]研发的机器蜂,仿生性能有了很大改进,即便如此,也很容易被蜜蜂识别出来,蜜蜂与机器蜂之间的互动可能另有原因(见3.4节)。

类似于蜜蜂,鱼类也有较强的同伴识别能力。例如,无论机器鱼在体型或游泳深度的仿真性能有多高,食蚊鱼(*Gambusia affinis*)都会排斥它们^[41]。因此,其他鱼类之所以跟随机器鱼游动,不一定是鱼类接受了机器鱼,更可能与鱼类生活史特性有关,因为在鱼群中,跟随头鱼个体游动时产生的水流游动可减少跟随个体的体力消耗^[42]。

2 在年幼动物群中引入机器人及其被动物接受情况

2.1 动物出生后早期具有印记(跟随)学习能力

印记学习是奥地利动物学家Lorenz在1935年发现

并提出的。他观察到,刚孵化出来的小灰雁,如果第一眼看到的是Lorenz而不是母灰雁,即便母灰雁就在小灰雁身旁,小灰雁也会对Lorenz本人产生兴趣,他走到哪里,小灰雁就跟随到哪里^[43]。小灰雁对Lorenz的这种依恋或跟随是通过直接印象形成的,称为后代印记(filial imprinting)。

下面是一个关于家鸡(*Gallus gallus*)的印记学习案例^[11](图3)。小鸡被分配到隔间,可通过隔间窗口观察经过窗口的蓝色条纹机器人,让小鸡产生印记(图3(a))。当测试场地同时出现蓝色和红色条纹的机器人,小鸡跟随蓝色条纹的机器人,而不会接近红色条纹的机器人,甚至会远离红色条纹机器人(图3(b))。

印记学习并非局限于鸟类,昆虫、鱼类和哺乳动物等都有。印记刺激也不只是视觉刺激,还有味觉和嗅觉等刺激^[44]。例如,将刚羽化的雌性黑腹果蝇(*Drosophila melanogaster*)暴露在某种颜色的环境下,当其性成熟后,更倾向于与该颜色的雄果蝇交配;给初生的长尾黑颚猴(*Chlorocebus pygerythrus*)饲喂一种没有苦味的玉米,后期就会形成对该玉米的偏好;成年狐獴(*Suricata suricatta*)在幼崽面前主动演示剔除蝎子(*Parabuthus* spp.)毒蜇过程,传授幼仔捕食毒蝎技能,避免遭到蝎子毒蜇伤害。

动物印记学习能力仅出现在其出生后的最初阶段。对于寿命长的脊椎动物,印记学习一般发生在其出生

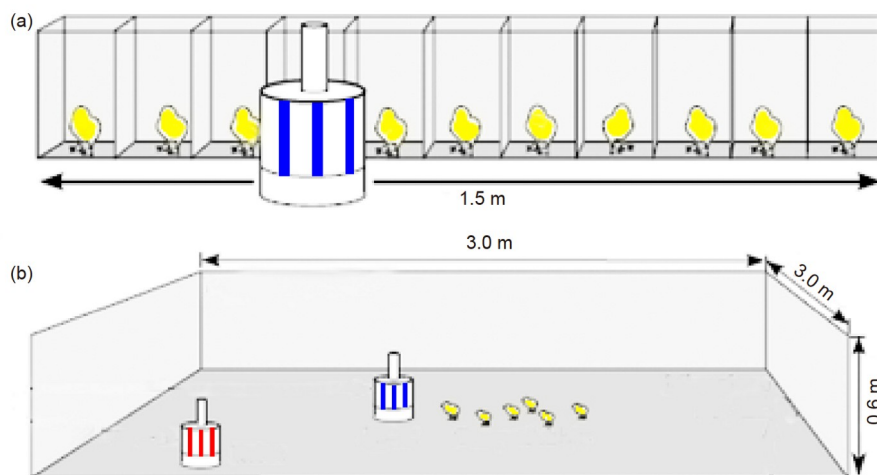


图3 一个关于家鸡印记学习的案例。(a)将每只小鸡单独放在间隔里,不与其他小鸡接触,但小鸡可通过间隔前壁窗口观察蓝色条纹机器人并对蓝色条纹机器人产生印记。(b)将两个不同颜色条纹的机器人放在实验场,小鸡跟随经过印记的蓝色条纹移动机器人,不会接近未经过印记的红色条纹移动机器人。修改自文献^[11]

Figure 3 An example of the filial imprinting learning of domestic chickens (*Gallus gallus*). (a) Ten chickens are individually placed in the compartments of a box, and are not allowed to interact with each other. But they can observe and form an imprint on a blue-marked mobile robot through the compartment windows. (b) In an experimental area where there are two mobile robots, which are marked with blue and red, respectively, the chickens follow the imprinted blue-marked robot, and do not approach to the red-marked without filial imprinting. Modified from Ref. [11]

后的头几年;对于寿命短的动物,如昆虫等,印记学习仅发生在其孵化后的头几天或头几个小时^[45]。

2.2 在年幼动物群中引入的机器人可被动物接受

雏鸟一般对有图案^[46]且移动^[47]的物体比较容易产生印记。例如,当刚孵化出来的日本鹌鹑(*Coturnix coturnix*)分别暴露在移动与静止机器人前面时,小鹌鹑表现出对移动机器人强烈兴趣,且暴露在移动机器人的小鹌鹑具有更好的空间认知能力^[48]。类似地,当澳大利亚火鸡(*Alectura latham*)的雏鸡分别暴露在啄食与不啄食机器人面前,倾向于对啄食机器人的依恋^[49]。另外,小鸡对与母鸡大小相近的^[50]且发声的物体更容易产生印记^[51]。

根据上述雏鸟印记学习特点,Gribovskiy等人^[11]设计了poulBot机器人(图3(a)),测试家鸡对机器人的印记学习。poulBot实际上只是一个圆柱筒,大小与母鸡相当,外观上并不像母鸡。poulBot可自主持续移动,能发出类似鸟鸣但不同于鸡叫的声音,且能对小鸡鸣叫做出反应^[11]。另外,在poulBot上标记蓝色或红色条纹(图3(b)),其中,蓝色条纹的机器人作为印记物,红色条纹的机器人作为对照,目的是比较作为印记物的poulBot与不作为印记物的poulBot被小鸡接受和跟随的程度。

小鸡是在黑暗房间孵化的,在孵化期间未接触任何视觉和听觉刺激,科研人员通过如下方式让小鸡对蓝色条纹的poulBot产生印记^[11]:将小鸡随机分配放到隔间里,每个隔间仅1只小鸡,让1个标有蓝色条纹的poulBot沿着隔间的前壁前进或后退,同时发出特定频率的声音脉冲,小鸡可通过隔间上窗口观察到poulBot(图3(b))。经过一段时间,小鸡被放回孵化房间的笼子里。

接下来,将上述对蓝色条纹poulBot产生印记的小鸡与红、蓝色条纹的2个poulBot放入实验场,poulBot执行漫游运动,观察小鸡选择和跟随情况。结果表明,有59%小鸡靠近且跟随蓝色条纹的poulBot,但没有小鸡跟随红色条纹的poulBot^[11]。因此,让小鸡产生印记的蓝色条纹的poulBot可被小鸡接受,而未让小鸡产生印记的红色条纹的poulBot没有被小鸡接受。

2.3 在年幼动物群中引入的机器人可参与动物的群体决策

群体决策是指当动物群体在相互排斥的选项中做

出选择时,通过自组织行为来协调群体各成员产生一致决定的过程^[52]。能被动物接受的机器人,是否可参与动物的群体决策过程呢?回答是肯定的。一个成功的例子是关于机器人InsBot引导蟑螂(*Periplaneta americana*)选择庇护所^[53]。

Halloy等人^[53]设计的机器蟑螂InsBot有如下特点:(1)与蟑螂大小相近,但形态不像蟑螂;(2)可感知蟑螂运动和反应,并能对蟑螂运动和反应做出响应,其运动速度与蟑螂相似;(3)能区分黑暗程度不同的庇护所。另外,InsBot体表携带雄性蟑螂体表气味,可增加对蟑螂的吸引。如同真实蟑螂^[54],InsBot可自主探索其周围环境,调整停歇在庇护所的时长^[53]。

测试时,从羽化笼中随机取出蟑螂,每次测试1组,每组共16只个体,这16只个体全为蟑螂(蟑螂组),或为由4个InsBot与12只蟑螂构成的InsBot-蟑螂混合社群(混合组)。关于混合组,虽然文献中没有指明基于印记学习机制构建蟑螂-InsBot混合社群,但用于构建该混合社群的是初生蟑螂,它们一直被放在遮盖笼子里,受到外部刺激影响小^[53]。

为了解InsBot能否参与蟑螂-InsBot混合社群的群体决策,在测试场地(图4(a)),设置2个蟑螂庇护所,分别为浅色(覆盖1层滤光片,图4(b))和深色(覆盖2层滤光片,图4(c)),两个避难所大小一致,足够容纳16只个体的纯蟑螂组或蟑螂-InsBot混合社群。当测试对象是纯蟑螂组,16只蟑螂表现出自然本能反应,都会跑进深色庇护所。当测试对象为混合社群,若无人干预InsBot,InsBot和蟑螂共同选择深色庇护所(图4(c)),若人为控制InsBot选择浅色庇护所,蟑螂与InsBot都选择浅色庇护所(图4(b))。因此,从InsBot与蟑螂之间互动看,InsBot已被蟑螂接受并形成依赖,从而影响蟑螂-InsBot的群体决策^[53]。

2.4 成功引入的机器人数量与其参加动物群体决策的效力

我们参考Landgraf等人^[17]研发的机器蜂(图2),将其引入新近购进的蜂群,其中,成年工蜂很少,多为待出房的蛹和低龄幼蜂(少于14日龄)。因此,引入的机器蜂被群内大多数蜜蜂当作印记物,形成对机器蜂的依恋,并跟随机器蜂,这才是我们和Landgraf等人^[17]观察到的机器蜂与蜜蜂之间互动的真正原因。

虽然机器蜂与蜜蜂之间有互动,但没有蜜蜂拜访机器蜂指示的地点。一个可能原因是蜜蜂接受到机器

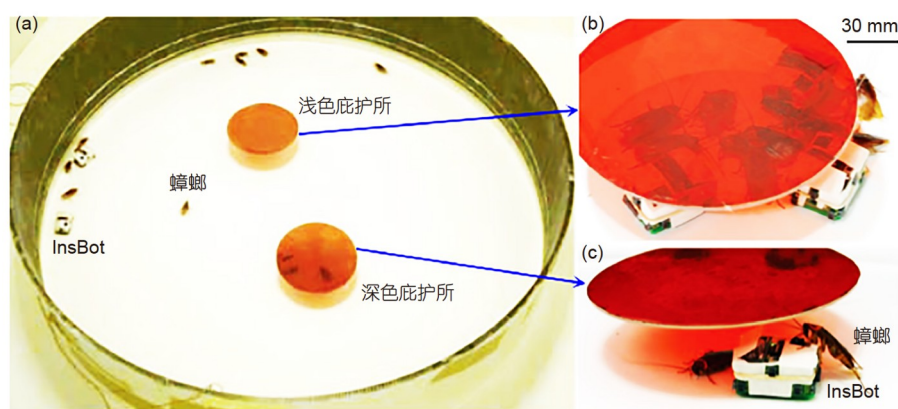


图4 机器人参与蟑螂群体决策的实验。在圆形实验场(直径1 m), 有两个圆形塑料盘(直径150 mm)支撑起来(离地面30 mm)的庇护所(a): 一个被单层红色薄膜覆盖的浅色庇护所(b), 一个被多层红色薄膜覆盖的深色庇护所(c)。当12只蟑螂和4个InsBot组成的混合组进入实验场, 若无人为干扰InsBot, InsBot和蟑螂会躲到深色庇护所, 如果人为控制InsBot选择浅色庇护所, 蟑螂也会进入浅色庇护所。修改自文献[53]

Figure 4 An experiment illustrating that robots are able to alter the decision-making of a group of cockroaches. In a circular arena (diameter 1 m), there are two shelters (a), i.e., plastic disks (150 mm) suspended above the floor (30 mm). The lighter one is covered by a single red film filter (b), and the darkness is covered by multiple red film filters (c). When 12 cockroaches and 4 InsBots are mixed in the arena, the cockroaches and InsBots naturally aggregate under the darkness. But if the InsBots are programmed to select the lighter, both prefer the lighter. Modified from Ref. [53]

蜂的信息, 但蜜蜂没有利用该信息, 因为蜜蜂可根据自己拜访过的地点采集, 只有当自己无法获得适合的食物源地点信息时, 才会利用舞蹈信息指定的地点搜索和采集[55]。我们的实验是在外界很少有植物开花状况下进行的, 可以排除蜜蜂根据自己获得的食物源地点信息采集。

另外一个可能是舞蹈信息不充分, 导致蜜蜂没有利用舞蹈信息。根据观察, 只有当跟随蜂“观看”到更多的蜜蜂舞蹈时, 才会决定拜访舞蹈蜂指定地点[38], 这个过程类似于蜜蜂选择筑巢地点。选择筑巢地点是一个群体决策过程, 当蜂群决定放弃旧巢时, 派出少数蜜蜂出巢, 各自探索潜在的筑巢地点。当其中一只蜜蜂发现某个地点, 它返巢后通过舞蹈招募其他蜜蜂进一步调查该地点[56]。如果随后调查的蜜蜂不认可该地点, 返巢后不但自己不舞蹈, 且阻止其他蜜蜂通过舞蹈传递该地点信息; 如果随后的蜜蜂认可该地点, 就会进一步通过舞蹈, 招募更多蜜蜂外出查看该地点, 当调查该地点的蜜蜂达到一定数量或阈值(约30~40只), 蜂群就会做出决定, 一起迁移到该地点[57]。

我们和Landgraf等人[17]的实验, 都仅用了1只机器蜂舞蹈, 可能是蜜蜂与机器蜂之间的互动强度有限, 以至于蜜蜂没有做出拜访该地点的集体决策。最近, 研究人员依据蜂群的群体决策机制, 建立了数学模型, 估计蜜蜂进行采集决策时所需要的舞蹈机器蜂的数量[58]。结果表明, 当群内有2只或更多机器蜂舞蹈的情况下,

可诱导蜜蜂拜访舞蹈所指定的地点[58]。

为了检验蜜蜂是否需要经过充分的信息交流才会决定出巢拜访, 我们设计了如下测试实验。参考Bitterman等人方法[59], 以糖浆作为奖励(无条件刺激), 用醋酸酐气味(条件刺激)训练蜜蜂记住醋酸酐, 随后将其返还原来蜂群。每天训练20~50只蜜蜂, 观察蜜蜂拜访离巢50 m处的醋酸酐(无糖浆)。结果表明, 在训练头9天(其中2天因天气原因未开展训练), 没有观察到蜜蜂拜访醋酸酐, 等到第10天, 此时受训蜂数超过200只, 才观察到蜜蜂拜访该地点的醋酸酐(图5)。由此推测, 蜜蜂选择拜访醋酸酐是一个群体决策的过程, 在此过程中需要接受经过充分的信息交流。虽然实验持续了30天, 但拜访醋酸酐仅4天就停止了, 相关机制有待进一步研究。

3 动物-机器混合社群的未来发展趋势

3.1 基于动物群体内个体之间互动规则的动物-机器融合方式创新

关于动物-机器混合社群构建, 通过提高机器人的仿生性能(即模拟鸡、鱼、昆虫等动物的形态、运动、通讯)增加机器人被动物接受程度是很难的, 因为动物具有很强的亲缘识别能力, 即便是真实动物, 如果它们来自其他群体, 也很难被另一群同种动物接受为新成员。从poulBot-家鸡混合社群[11]和InsBot-蟑螂混合

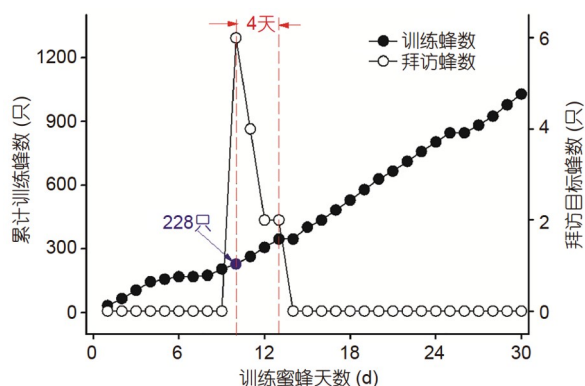


图 5 蜂群选择新食物源实验。从一个蜂群巢门拦截蜜蜂, 按照Bitterman等人^[59]规程, 训练蜜蜂记住与糖浆关联的醋酸酐, 每天可将训练成功的20~50只蜜蜂返回蜂群, 这个过程持续30天。同时, 在离蜂群50 m处放置仅有醋酸酐的喂食器, 用摄像机拍摄拜访喂食器的蜜蜂。当蜂群中训练的蜜蜂数量积累到228只时, 蜜蜂开始拜访醋酸酐, 并持续4天

Figure 5 An experiment of a novel food source selected by a honeybee colony. In the 30-day experiment, outgoing foraging bees are captured at the beehive entrance, and are trained following the procedure developed by Bitterman et al.^[59]. Every day 20–50 bees, which successfully associate acetic anhydride with a sugar reward, are returned to their original hive. At the same time a TV camera is set to observe bees' visitation to a feeder (50 m away from the hive) with only acetic anhydride. Bees are observed to visit the feeder when a total of 228 bees have been trained and accumulated in the hive, and their visitation last four days

社群^[53]看, 将机器人作为印记物融入动物群体, 即便机器人不能被动物视为同类, 也可在动物与机器人之间建立起社会性依赖, 让动物接纳和跟随机器人。未来研究应重视基于动物印记学习机制的动物-机器人融入方式的创新, 并着力解决如下问题。

(1) 度量机器人被动物群体接受程度。在动物行为研究中, 通常基于个体间距离衡量个体间亲密或信任程度^[60]。例如, 在家鸡视觉印记研究中, 科研人员就是根据小鸡与机器人之间平均距离, 度量poulBot是否被小鸡接受^[11]。但是, 距离容易受到群体成员年龄、性别等多种因素的影响^[61]。建议参考Nakamori等人^[62], 根据动物脑区有关变化, 确定动物对机器人是否产生了印记, 以及利用动物对机器人的依赖来量化机器人被动物接受的程度。

(2) 确定机器人引入动物群体的最佳时期。不同的动物类群, 印记学习的窗口期是不同的, 可根据动物生理生化、分子指标来确定机器人引入时间^[62]。例如, 对于鸟类视觉印记, 在印记学习窗口期间, 其体内的甲状腺素(thyroid hormone)水平达到最高, 甲状腺素去5酶(iodothyronine deiodinase)基因表达水平上调。建议针

对具体的动物类群, 综合运用分子、生理生化方法, 弄清动物的印记学习窗口期, 精准把握引入机器人的黄金时期。

3.2 基于动物群内个体互动规则的自适应机器人研发和融入数量估算

在机器人研发方面, 也要重视利用动物群体内个体之间互动规则, 将这些规则赋予给机器人, 可以强化动物与机器人之间互动, 提高机器人参与动物群体决策程度。未来需要解决如下几个问题。

(1) 赋予机器人有关动物互动规则。有证据表明, 如果机器人的行为反应能够与动物所期待的行为相匹配, 将利于机器人被动物接受及动物-机器人之间互动。例如, 研究人员利用进化算法(nondominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)^[63]控制机器人, 让仿生机器人自主感知鱼群动态, 并能够对鱼群做出实时、精细反应, 以引导鱼群^[64]。

现有机器人的感知能力、自适应性等比较有限, 主要是因为不清楚有关动物群体中个体之间精细的互动规则(social interaction rules), 未来需要加强动物群体互动规则的研究, 研发闭环控制的机器人(close-loop control of robots), 让机器人能够动态地对动物群体的行为做出响应, 或者从一系列经验中学习优化其社交表现, 适应复杂多变的动物社群环境并做出应答, 这将促进机器人与动物之间的自主互动。

(2) 融入足够数量的机器人参与动物决策。群居动物通常是局部信息交流下的决策, 即由群体内部少数个体进行决策。从蜜蜂选择食物源或筑巢地点看, 足够数量个体之间的互动是必要的。另外, 面对不同决策任务, 参与决策的个体数量可能有所不同。依据Lazic等人^[58]的估计, 在蜂群中, 至少需要2只机器蜂, 才能有效影响蜂群的群体决策, 指导蜜蜂觅食。在Halloy等人^[53]研究中, 作者用了4只InsBot, 可有效改变蟑螂庇护所的选择。建议参考Lazic等人^[58], 根据群体决策机制, 建立数学模型, 基于模型估算所需要融入的机器人数量, 减少构建动物-机器混合群体的盲目性。

4 总结与展望

本文综述了仿生机器人研发, 以及机器人与鸡、鱼、昆虫群体融合互动主要进展, 指出了动物群体内个体之间互动规则是成功构建动物与机器混合社群的关键^[26], 提出未来应加强基于动物印记学习机制的动

物-机器融合方式研究, 以及基于动物群体内个体之间互动规则的自主机器人研发和所需融入机器人的数量估算, 促进动物-机器混合社群研发创新。

另外, 对于动物群体这样的自组织系统, 当机器人引入到动物群体时, 群内产生微小变化, 这种微小变化能通过动物个体之间互动被级联放大(cascade amplification), 从而引起动物群体状态变化, 诱导出原来动物社群所没有的一些新的群体智能^[65], 未来应关注探讨和利用可能涌现的新的群体智能以及新的应用。例如,

家禽、棕鸟等鸟类, 容易造成集体性的恐慌运动(collective panic movements), 导致其高死亡率, 可尝试将少数机器人引入鸟群, 改变和优化动物群体组织结构, 防止集体性恐慌。

总之, 尽管动物-机器混合社群面临不少挑战, 只要紧紧围绕动物群体内个体之间互动机制或规则, 通过生物学、仿生工程和人工智能等多学科努力, 赋予机器人自主学习能力, 必将动物-机器混合社群的研发提高到一个新的水平。

参考文献

- 1 Kuwana Y, Shimoyama I, Miura H. Steering control of a mobile robot using insect antennae. In: 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems—Human Robot Interaction and Cooperative Robots, Pittsburgh, PA, 1995. 530–535
- 2 Ando N, Kanzaki R. Using insects to drive mobile robots—Hybrid robots bridge the gap between biological and artificial systems. *Arthropod Structure Dev*, 2017, 46: 723–735
- 3 Krause J, Winfield A F T, Deneubourg J L. Interactive robots in experimental biology. *Trends Ecol Evol*, 2011, 26: 369–375
- 4 Yang J, Huai R, Wang H, et al. A robot-pigeon based on an innovative multi-mode telestimulation system. *Biomed Mater Eng*, 2015, 26(Suppl): S357–S363
- 5 Böhlen R. A robot in a cage. In: Proc IEEE Int Symp on Computational Intelligence in Robotics and Automation, Monterey, CA, 1999. 214–219
- 6 Halloy J, Mondada F, Kernbach S, et al. Towards biohybrid systems made of social animals and robots. In: Lepora N F, Mura A, Krapp H G, et al., eds. *Biomimetic and Biohybrid Systems*. Berlin: Springer, 2013. 384–386
- 7 Vaughan R. Robot control of animal flocks. In: Joint Conference on the Science and Technology of Intelligent Systems, Gaithersburg, MD, 1998. 277–282
- 8 Ishii H, Nakasuji M, Ogura M, et al. Accelerating rat's learning speed using a robot: The robot autonomously shows rats its functions. In: 13th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, Kurashiki, Okayama, 2004. 229–234
- 9 Mitri S, Wischmann S, Floreano D, et al. Using robots to understand social behaviour. *Biol Rev*, 2013, 88: 31–39
- 10 Frohwnieser A, Murray J C, Pike T W, et al. Using robots to understand animal cognition. *Jrnl Exper Anal Behav*, 2016, 105: 14–22
- 11 Gribovskiy A, Halloy J, Deneubourg J L, et al. Designing a socially integrated mobile robot for ethological research. *Robotics Autonomous Syst*, 2018, 103: 42–55
- 12 Romano D, Donati E, Benelli G, et al. A review on animal–robot interaction: From bio-hybrid organisms to mixed societies. *Biol Cybern*, 2019, 113: 201–225
- 13 Datteri E. Interactive biorobotics. *Synthese*, 2021, 198: 7577–7595
- 14 Asadpour M, Tâche F, Caprari G, et al. Robot-animal interaction: Perception and behavior of insbot. *Int J Adv Robotic Syst*, 2006, 3: 16–21
- 15 Colot A, Caprari G, Siegwart R. Insbot: Design of an autonomous mini mobile robot able to interact with cockroaches. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. 2418–2423
- 16 Gribovskiy A, Mondada F. Audio-visual detection of multiple chirping robots. In: Burgard W, Dillmann R, Plagemann C, et al., eds. 10th International Conference on Intelligent Autonomous Systems, 2008. 324
- 17 Landgraf T, Moballegh H, Rojas R. Design and development of a robotic bee for the analysis of honeybee dance communication. *Appl Bionics BioMech*, 2008, 5: 157–164
- 18 Bonnet F, Rétonnaz P, Halloy J, et al. Development of a mobile robot to study the collective behavior of zebrafish. In: 4th IEEE RAS and EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2012. 437–442
- 19 Bonnet F, Mills R, Szopek M, et al. Robots mediating interactions between animals for interspecies collective behaviors. *Sci Robot*, 2019, 4: eaau7897
- 20 Schmickl T, Szopek M, Mondada F, et al. Social integrating robots suggest mitigation strategies for ecosystem decay. *Front Bioeng Biotechnol*, 2021, 9: 612605
- 21 Kohda M, Jordan L A, Hotta T, et al. Facial recognition in a group-living cichlid fish. *PLoS One*, 2015, 10: e0142552
- 22 Bartolini T, Mwaffo V, Showler A, et al. Zebrafish response to 3D printed shoals of conspecifics: The effect of body size. *Bioinspir Biomim*, 2016,

- 11: 026003
- 23 Bonnet F, Kato Y, Halloy J, et al. Infiltrating the zebrafish swarm: Design, implementation and experimental tests of a miniature robotic fish lure for fish–robot interaction studies. *Artif Life Robotics*, 2016, 21: 239–246
- 24 Bonnet F, Cazenille L, Séguret A, et al. Design of a modular robotic system that mimics small fish locomotion and body movements for ethological studies. *Int J Adv Robotic Syst*, 2017, 14: 172988141770662
- 25 Polverino G, Phamduy P, Porfiri M. Fish and robots swimming together in a water tunnel: Robot color and tail-beat frequency influence fish behavior. *PLoS One*, 2013, 8: e77589
- 26 Landgraf T, Bierbach D, Nguyen H, et al. RoboFish: Increased acceptance of interactive robotic fish with realistic eyes and natural motion patterns by live *Trinidadian guppies*. *Bioinspir Biomim*, 2016, 11: 015001
- 27 Bierbach D, Lukas J, Bergmann A, et al. Insights into the social behavior of surface and cave-dwelling fish (*Poecilia mexicana*) in light and darkness through the use of a biomimetic robot. *Front Robot AI*, 2018, 5: 3
- 28 Merkle J A, Sigaud M, Fortin D. To follow or not? How animals in fusion-fission societies handle conflicting information during group decision-making. *Ecol Lett*, 2015, 18: 799–806
- 29 Worm M, Landgraf T, Nguyen H, et al. Electro-communicating dummy fish initiate group behavior in the weakly electric fish *Mormyrus rume*. In: Duff A, Lepora N F, Mura A, et al., eds. *Biomimetic and Biohybrid Systems*. Cham: Springer, 2014. 446–448
- 30 Worm M, Landgraf T, Prume J, et al. Evidence for mutual allocation of social attention through interactive signaling in a mormyrid weakly electric fish. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2018, 115: 6852–6857
- 31 von Frisch K. *Dance Language and Orientation of Bees*. Cambridge: Belknap Press, 1967
- 32 Michelsen A, Andersen B B, Storm J, et al. How honeybees perceive communication dances, studied by means of a mechanical model. *Behav Ecol Sociobiol*, 1992, 30: 143–150
- 33 Esch H, Esch I, Kerr W E. Sound: An element common to communication of stingless bees and to dances of the honey bee. *Science*, 1965, 149: 320–321
- 34 Stabentheiner A, Hagmüller K. Sweet food means “Hot Dancing” in honeybees. *Naturwissenschaften*, 1991, 78: 471–473
- 35 Thom C, Gilley D C, Hooper J, et al. The scent of the waggle dance. *PLoS Biol*, 2007, 5: e228
- 36 Rohrseitz K, Tautz J. Honey bee dance communication: Waggle run direction coded in antennal contacts? *J Comp Physiol A-Sens Neural Behav Physiol*, 1999, 184: 463–470
- 37 Gil M, De Marco R J. Decoding information in the honeybee dance: Revisiting the tactile hypothesis. *Anim Behav*, 2010, 80: 887–894
- 38 Landgraf T, Oertel M, Kirbach A, et al. Imitation of the honeybee dance communication system by means of a biomimetic robot. In: Prescott T J, Lepora N F, Mura A, et al., eds. *Biomimetic and Biohybrid Systems*. Berlin: Springer, 2012. 132–143
- 39 Faria G S, Gardner A. Does kin discrimination promote cooperation? *Biol Lett*, 2020, 16: 20190742
- 40 Breed M D, Butler L, Stiller T M. Kin discrimination by worker honey bees in genetically mixed groups. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1985, 82: 3058–3061
- 41 Polverino G, Porfiri M. Mosquitofish (*Gambusia affinis*) responds differentially to a robotic fish of varying swimming depth and aspect ratio. *Behav Brain Res*, 2013, 250: 133–138
- 42 Marras S, Porfiri M. Fish and robots swimming together: Attraction towards the robot demands biomimetic locomotion. *J R Soc Interface*, 2012, 9: 1856–1868
- 43 Bolhuis J J. Mechanisms of avian imprinting: A review. *Biol Rev*, 1991, 66: 303–345
- 44 Whiten A. The burgeoning reach of animal culture. *Science*, 2021, 372: eabe6514
- 45 Immelmann K. Ecological significance of imprinting and early learning. *Annu Rev Ecol Syst*, 1975, 6: 15–37
- 46 Klopfer P H. Imprinting: A reassessment. *Science*, 1965, 147: 302–303
- 47 Bateson P P G, Jaeckel J B. Imprinting: Correlations between activities of chicks during training and testing. *Anim Behav*, 1974, 22: 899–906
- 48 Jolly L, Pittet F, Caudal J P, et al. Animal-to-robot social attachment: Initial requisites in a gallinaceous bird. *Bioinspir Biomim*, 2016, 11: 016007
- 49 Goth A, Evans C S. Social responses without early experience: Australian brush-turkey chicks use specific visual cues to aggregate with conspecifics. *J Exp Biol*, 2004, 207: 2199–2208
- 50 Hess E H. *Imprinting: Early Experience and the Developmental Psychobiology of Attachment*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1973
- 51 Bolhuis J J, Van Kampen H S. Auditory learning and filial imprinting in the chick. *Behaviour*, 1991, 117: 303–319
- 52 Deneubourg J L, Goss S. Collective patterns and decision-making. *Ethol Ecol Evol*, 1989, 1: 295–311
- 53 Halloy J, Sempo G, Caprari G, et al. Social integration of robots into groups of cockroaches to control self-organized choices. *Science*, 2007, 318: 1155–1158
- 54 Amé J M, Halloy J, Rivault C, et al. Collegial decision making based on social amplification leads to optimal group formation. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2006, 103: 5835–5840

-
- 55 Grüter C, Farina W M. The honeybee waggle dance: Can we follow the steps? [Trends Ecol Evol](#), 2009, 24: 242–247
- 56 Seeley T D. How honeybees find a home. [Sci Am](#), 1982, 247: 158–168
- 57 Britton N F, Franks N R, Pratt S C, et al. Deciding on a new home: How do honeybees agree? [Proc R Soc Lond B](#), 2002, 269: 1383–1388
- 58 Lazic D, Schmickl T. Can robots inform a honeybee colony’s foraging decision-making? In: The 2021 Conference on Artificial Life, Prague Czech, 2021. 42–45
- 59 Bitterman M E, Menzel R, Fietz A, et al. Classical conditioning of proboscis extension in honeybees (*Apis mellifera*).. [J Comp Psychol](#), 1983, 97: 107–119
- 60 Aureli F, Schaffner C M, Asensio N, et al. What is a subgroup? How socioecological factors influence interindividual distance. [Behav Ecol](#), 2012, 23: 1308–1315
- 61 de Graaf M M A, Ben Allouch S. Exploring influencing variables for the acceptance of social robots. [Robotics Autonomous Syst](#), 2013, 61: 1476–1486
- 62 Nakamori T, Maekawa F, Sato K, et al. Neural basis of imprinting behavior in chicks. [Dev Growth Differ](#), 2013, 55: 198–206
- 63 Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. [IEEE Trans Evol Computat](#), 2002, 6: 182–197
- 64 Cazenille L, Chemtob Y, Bonnet F, et al. How to blend a robot within a group of zebrafish: Achieving social acceptance through real-time calibration of a multi-level behavioural model. 2018, arXiv: [1805.11371](#)
- 65 De Schutter G, Theraulaz G, Deneubourg J L. Animal-robots collective intelligence. [Ann Math Artif Intel](#), 2001, 31: 223–238

Summary for “动物-机器混合社群融合技术: 进展述评”

Integrated technologies of an animal-robot mixed society: A systematic review

Fanglin Liu^{1*}, Xueli Jiang^{1,2} & Nayan Di¹¹ Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;² Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China* Corresponding author, E-mail: fliliu@ipp.ac.cn

Robots are being developed by researchers to be integrated into an animal group to form an animal-robot mixed society. In such a mixed society, the robots are expected to be able to manipulate and control the animal group through their taking part in the group's self-organized behaviors and decision-making processes. The animal-robot mixed societies offer a powerful tool to advance the research of collective behaviors and their evolution. They can also be explored to manage domestic animals and wildlife, such as guiding them to specific places or away from danger. Due to their potential applications, the development of animal-robot mixed societies has recently elicited great interest in both the scientific and technological communities. However, to successfully integrate robots into an animal group faces many tougher challenges. One of the major challenges is how to enable the integrated robots to be accepted by animals as their group members to work with. In this review, we focus on the issue of the robots accepted by animals and provide a systematical review on the current state of the art of biomimetic robot designs and their integration ways, which are the two key aspects of creating an animal-robot mixed society. First, we take, for instance, the interactions between the specifically designed robots and one group of a single animal species, and point out that the bionic designs of robots exhibiting life-like appearance are less likely to promote the animals to accept and follow them because of animals' kin recognition, by which group members may be identified. Secondly, we provide an in-depth discussion of the successful integration of robots into an animal group based on the imprint learning, a form of learning in which a very young animal fixes its attention on the first object and thereafter follows that object, and highlight the significance of social interaction rules in reinforcing animal-robot interactions. Finally, we propose that the future endeavors should focus on the social interaction rules-based technological innovation of creating an animal-robot society, including: (1) The animal-to-robot social attachment, which can be achieved by integrating robots into the group of young animals that their imprinting memories are not fully consolidated, and (2) the robust animal-robot interactions, which may rely on the development of the machine-learned or self-adaptive robots that are expected to automatically learn and dynamically adapt or respond to social interaction partners in real-time, and the enough number or amount of the integrated robots, estimated on the basis of the group's decision-making that follows a probabilistic rule. To summarize, the animal-robot hybrid system represents a new multidisciplinary field of science, engineering and technology. Despite the many challengers faced, we believe that the social mechanisms or rules of animal groups will be greatly exploited to develop such hybrid systems that have more advanced intelligent than the systems we have now.

animal-robot interactions, biomimetic robots, kin recognition, imprint learning, self-organization, group decision-making

doi: [10.1360/TB-2022-1265](https://doi.org/10.1360/TB-2022-1265)