

李蒙蒙, 杨龙, 杨莉芳, 等. 鸽子在动物机器人领域的研究进展 [J]. 中国实验动物学报, 2024, 32(2): 248-253.

LI M M, YANG L, YANG L F, et al. Research advances in the use of pigeon animal robots [J]. Acta Lab Anim Sci Sin, 2024, 32(2): 248-253.

Doi: 10.3969/j.issn.1005-4847.2024.02.012

鸽子在动物机器人领域的研究进展

李蒙蒙, 杨龙, 杨莉芳, 刘玉怀, 万红, 尚志刚*

(郑州大学电气与信息工程学院, 河南省脑科学与脑机接口技术重点实验室, 郑州 450001)

【摘要】 鸽子具有集群和归巢习性, 善于远途负重与持续飞行, 导航和空间认知能力卓越, 近年来被广泛应用于动物机器人研究。鸽子机器人通过对鸽子脑内特定的神经靶点施加神经信息干预以实现运动行为控制。本文根据鸽脑内的分层多级神经调控靶点分布, 分别对基于感觉系统、动机和情绪系统或皮层以及中脑运动区的鸽子机器人研究进展进行分类综述, 以期为进一步利用鸽子机器人开展空间感知、侦察勘测和反恐搜救等应用研究提供参考和指导。

【关键词】 鸽子; 动物机器人; 刺激调控; 鸽子机器人

【中图分类号】 Q95-33 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1005-4847 (2024) 02-0248-06

Research advances in the use of pigeon animal robots

LI Mengmeng, YANG Long, YANG Lifang, LIU Yuhuai, WAN Hong, SHANG Zhigang*

(School of Electrical and Information Engineering, Henan Key Laboratory of Brain Science and Brain Computer Interface Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Corresponding author: SHANG Zhigang. E-mail: zhigang_shang@zzu.edu.cn

【Abstract】 Pigeons show flocking and homing behaviors, which require characteristics including long-distance weight-bearing and continuous flight, with excellent navigation and spatial cognitive abilities. Pigeons have been widely used in animal robot research in recent years. Pigeon robots achieve motor behavior control by applying neural information intervention to specific neural targets in the pigeon's brain. This review summarizes research progress in pigeon robots based on the sensory system, motivation and emotional system or cortex and midbrain motor area respectively, according to the distribution of hierarchical multi-level neural regulatory targets in the pigeon's brain, with the aim of providing reference and guidance for further applied research into the use of pigeon robots in space perception, reconnaissance, and anti-terrorism search and rescue.

【Keywords】 pigeon; animal robot; stimulus control; pigeon robot

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

动物机器人是指基于对动物感知、运动、决策机制的相关研究, 借助神经信息调控手段干预动物运动行为的动物-机器混合系统^[1]。近年来, 动物机器人在科学验证和应用需求的牵引下得到快速发展, 成为当前热门的研究领域。其中, 鸽子机器人以其在远途飞行与集群调控等方面的独特优势和

巨大前景而备受关注。2007 年, 山东科技大学苏学成等^[2]成功研制出世界上首例“机器人鸟”, 并实现了对鸽子机器人的起飞和转向调控。此后, 南京航空航天大学、韩国首尔大学、郑州大学和黄淮学院等国内外团队也陆续开展了鸽子机器人的相关研究, 取得了可喜的成绩。本文对近年来国内外关于

[基金项目] 国家自然科学基金(62301496), 国家资助博士后研究人员计划项目(GZC20232447), 河南省科技攻关项目(232102210098)。

Funded by National Natural Science Foundation of China (62301496), National Postdoctoral Researcher Program (GZC20232447), Key Scientific and Technological Projects of Henan Province (232102210098).

[作者简介] 李蒙蒙, 男, 博士, 讲师, 研究方向: 脑机接口和动物机器人研究。Email: limengmeng@zzu.edu.cn

[通信作者] 尚志刚, 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 脑机接口和动物机器人研究。Email: zhigang_shang@zzu.edu.cn

鸽子在动物机器人领域的研究进行阐述与分析。

1 鸽子在动物机器人研究中的优势

鸽子 (*Columba livia*) 英文名 Pigeon, 是鸟纲 (Aves) 鸽形目 (Columbiformes) 鸽鸽科 (Columbidae) 动物, 在世界上分布广泛, 遍布亚洲中部和南部、欧洲中部和南部、非洲北部等广大地区, 并被引入了北美洲和中美洲。作为较为常见的实验动物, 鸽子在动物机器人研究中具有分布广泛, 易于饲养; 活动范围大, 具有集群和归巢习性; 能量消耗小, 善于远途负重与持续飞行; 导航能力强, 空间认知能力卓越; 隐蔽性能好, 军用价值高等优势, 使得以鸽子为载体的动物机器人在执行户外远距离与集群飞行任务中具有独特的价值, 在空间感知、侦察勘测和反恐搜救等领域表现出良好的应用前景^[3]。

2 鸽子机器人研究进展

以鸽子为模式动物开展的动物机器人研究, 通过筛选鸽子脑内分层多级神经系统中相关的神经靶点施加神经信息干预, 以实现对鸽子的运动行为控制。这些靶点通常涉及从感觉输入到运动输出的多个系统, 包括感觉系统、动机和情绪系统、皮层以及中脑运动区等(见表 1)。其中, 感觉系统接收整合身体内外部的感觉信息, 动机和情绪系统融合上述信息进行运动动机规划, 皮层制定运动策略, 中脑运动区将经过协调组织的运动指令输出到各个功能核团, 各系统通过分工协作共同支持运动行为的执行。根据上述分层多级系统的分布式序贯处理原则, 按照调控刺激施加位置进行划分, 大致可将鸽子机器人分为以下三类(见表 1)。

2.1 基于感觉系统刺激调控的鸽子机器人

感觉可以诱导运动动机的产生, 因此, 早期的鸽子机器人研究在感觉系统中寻找刺激靶点以实现对鸽子的运动控制。苏学成等^[4] 在鸽子的上纹状体入口部 (hyperstriatum accessorium, HA) 和上纹状体背部 (hyperstriatum dorsal, HD) 等具有躯体感觉功能的位点施加电刺激(见表 2), 发现多批次被试鸽子普遍表现出的反应是急切地用喙梳理羽毛。这些探索在原理上证明了在脑内特定位点“注入电信号”实现运动控制的可行性, 但其中诱导出的简单运动行为并不足以满足对于鸽子机器人行为调控的需求, 研究者们因此将焦点转移到其他神经系统寻求突破。

2.2 基于动机和情绪系统或皮层刺激调控的鸽子机器人

动机和情绪系统对运动行为的决定、发起及过程控制起着关键性影响, 而皮层作为情绪主观感受的处理中枢也与运动行为密切相关。在鸽脑对应运动选择与决策功能的动机和情绪系统或皮层中, 相应的刺激靶点包括丘脑腹前背中核 (dorsalis intermedius ventralis anterior, DIVA)、古纹状体后部 (posterior pallial amygdala, PoA) 以及导水管周围灰质 (periaqueductal gray, PAG) 等区域(见表 2), 在这些位点施加电刺激, 可以诱发动物的运动动机或虚拟情绪, 实现鸽子机器人的运动行为调控。

2.2.1 以 DIVA 为刺激调控靶点的鸽子机器人

鸽子的 DIVA 是将感觉信息上传到皮层的中继核团。苏学成等^[2] 最早在 2007 年以 DIVA 为刺激靶点实现了鸽子机器人的运动控制, 后续又基于 DIVA 内的电信号刺激, 实现了鸽子机器人的多种类型运动控制^[4]。2015 年, 该团队继续结合多模式电刺激系统在 DIVA 施加双相脉冲, 进一步丰富了以 DIVA 为靶点的鸽子机器人调控研究^[5]。2016 年, 该团队又通过计算包括双侧 DIVA 在内的不同脑区间的距离与深度差, 开发了多脑区微电极同步植入方法以便于开展鸽子机器人的多靶点刺激调控, 有效减少了植入误差^[6]。随后开发的适应室外自由飞行的鸽子机器人, 继续以 DIVA 为靶点并基于定位信息实现了飞行转向行为调控^[7]。2021 年, 郑州大学王振龙团队开发了多位点生物-机器接口装置, 并结合 DIVA 核团靶点刺激实现了鸽子机器人系统的简单路径连续导航^[8]。2022 年, 石勇等^[9] 在多通道刺激器上加载了在线监测系统, 结合 DIVA 核团的适时刺激对鸽子机器人进行远程导航控制, 为进一步优化鸽子机器人的控制策略提供了依据。

2.2.2 以 PoA 为刺激调控靶点的鸽子机器人

鸽子的 PoA 在情绪调节中起着至关重要的作用, 被认为是鸟类杏仁核的一部分。在苏学成等^[2] 的研究中, PoA 被证明与控制鸽子的起飞和向前飞行有关, 且 PoA 靶点刺激模式的差异会引发鸽子的不同行为响应, 包括快速行走、被迫起飞等^[4]。2021 年, 郑州大学王振龙团队考虑 PoA 核团刺激诱发的回避行为调控效应以及多位点联合植入, 开展了鸽子机器人系统构建和功能验证^[8]。进一步地, 该团队在 2022 年又采用多种方法对鸽子 PoA 核团的

表 1 鸽子机器人研究进展

Table 1 Advances in research of pigeon robot

类型 Type	年份 Year	研究机构 Research institutions	调控靶点 Control targets	文献 References
基于感觉系统刺激调控的鸽子机器人 Pigeon robot based on stimulus control at sensory system	2012	SDUST	HA, HD	[4]
	2007	SDUST	DIVA, PoA	[2]
	2012	SDUST	DIVA, PoA, PAG	[4]
	2015	SDUST	DIVA, PAG	[5]
基于动机和情绪系统或皮层刺激调控的 鸽子机器人 Pigeon robot based on stimulus control at motivation and emotional system or cortex	2016	SDUST	DIVA	[6]
	2017	SDUST	DIVA, PAG	[7]
	2021	ZZU	DIVA, PoA	[8]
		SDUST	DIVA	[9]
	2022	ZZU	PoA	[10]
		SDUST	PAG	[11]
	2012	NUAA	ICo, ToS, SGP	[12]
	2014	NUAA	ICo, ToS	[13]
	2015	NUAA	ICo, FRM, LoC	[14]
	2017	SNU	FRM	[15]
		SDUST	ICo	[16]
	2018	ZZU	FRM	[17]
	2019	ZZU	FRM	[18-20]
	2020	SNU	FRM	[21]
		NUAA	FRM	[22]
	2021	SNU	RT, OM, TN, TSM, AV	[23]
		HHU	FRM	[24]
		ZZU	SGP	[25]
	2022	NUAA	FRM	[26]
		ZZU	SGP	[27]
		HHU	FRM	[28]
	2023	NUAA	FRM	[29]
		HHU	FRM	[30]

注: SDUST: 山东科技大学; NUAA: 南京航空航天大学; SNU: 韩国首尔大学; ZZU: 郑州大学; HHU: 黄淮学院; HA: 上纹状体入口部; HD: 上纹状体背部; DIVA: 丘脑腹前背中核; PoA: 古纹状体后部; PAG: 导水管周围灰质; ICo: 丘间核; ToS: 半环隆枕区; LoC: 蓝斑核; FRM: 中脑内侧网状结构; RT: 中脑圆形核; OM: 枕中脑束; TN: 带状核; TSM: 中脑的中脑束; AV: 原纹状体腹侧部; SGP: 脑室纤维膜周围灰质。

Note. SDUST. Shandong University of Science and Technology. NUAA. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. SNU. Seoul National University. ZZU. Zhengzhou University. HHU. Huanghuai University. HA. Hyperstriatum accessorium. HD. Hyperstriatum dorsal. DIVA. Dorsalis intermedius ventralis anterior. PoA. Posterior pallial amygdala. PAG. Periaqueductal gray. ICo. Nucleus intercollicularis. ToS. Torus semicircularis. LoC. Locus ceruleus. FRM. Formatio reticularismedialis mesencephali. RT. Nucleus rotundus. OM. Tractus occipito-mesencephalicus. TN. Nucleus taeniae. TSM. Tractus septo-mesencephalicus. AV. Archistriatum ventral. SGP. Substantia grisea et fibrosa periventricularis.

结构和功能进行了深入研究,探索了其不同子区对应电刺激诱发的多样化行为响应差异,为基于 PoA 靶点刺激的鸽子机器人运动行为调控提供了依据^[10]。

2.2.3 以 PAG 为刺激调控靶点的鸽子机器人

作为边缘中脑区之一,鸽子的 PAG 与许多脑区存在双向联系,参与运动行为、情绪和动机的调节与控制。苏学成等^[4]研究发现,在 PAG 靶点施加电刺激能够导致明确的主动逃避行为。后续研究表明,对 PAG 的刺激成功诱发了鸽子机器人从静止状态向前运动的行为^[5]。在室外飞行鸽子机器人研究中,PAG 靶点在刺激诱导向前运动和起飞行为中的作用再次被成功应用^[7]。2022 年,常铭等^[11]设

计了面向鸽子机器人的可充电便携式表面肌电采集系统,并结合 PAG 核团电刺激参数与鸽子肌电放电幅度及频率响应的相关分析,证明了 PAG 在鸽子运动控制中的重要作用,为进一步探索鸽子机器人的运动控制机制提供了便利。

上述研究以鸽脑内动机和情绪相关的 DIVA、PoA 和 PAG 等核团为刺激靶点,成功诱导出鸽子的起飞、前进、左转、右转和连续转向(盘旋)等运动行为,为早期的鸽子机器人运动行为调控研究开辟了道路,但鸽脑动机、情绪系统和皮层中包含的核团繁多、环路复杂,且一些相关的神经机制仍缺乏更深入的研究,因此导致调控效果的精确性、稳定性

和可靠性等仍有待提升。

2.3 基于中脑运动区刺激调控的鸽子机器人

在鸽子脑中负责运动过程集中调度的中脑运动区施加刺激,可以实现对运动行为的直接调控,其中典型的刺激靶点包括丘间核(nucleus intercollicularis, ICo)、中脑内侧网状结构(formatio reticularis medialis mesencephali, FRM)、脑室纤维膜周围灰质(substantia grisea et fibrosa)。

periventricularis, SGP)等,此外还有如半环隆枕区(torus semicircularis, ToS)、蓝斑核(locus ceruleus, LoC)以及中脑圆形核(nucleus rotundus, RT)、枕中脑束(tractus occipito-mesencephalicus, OM)、带状核(nucleus taeniae, TN)、中脑的中脑束(tractus septo-mesencephalicus, TSM)和原纹状体腹侧部(archistriatum ventral, AV)等核团在内的众多候选位点(见表2)。

表2 鸽子机器人相关刺激靶点具体位置信息

Table 2 Specific location information of related stimulation targets in pigeon robot

类型 Types	调控靶点 Control targets	具体位置 Specific location
基于感觉系统刺激调控的鸽子机器人 Pigeon robot based on stimulus control at sensory system	HA HD	AP 7.50–14.50, ML 0.50–4.00, DV 0.00–2.00 AP 8.25–14.25, ML 2.00–4.00, DV 1.00–2.50
基于动机和情绪系统或皮层刺激调控的鸽子机器人 Pigeon robot based on stimulus control at motivation and emotional system or cortex	DIVA PoA PAG	AP 6.00–7.00, ML 1.50–2.50, DV 7.00–8.00 AP 8.75–9.00, ML 0.25–1.50, DV 9.50–10.00 AP 3.50–4.50, ML 0.50–1.25, DV 7.00–8.75
基于中脑运动区刺激调控的鸽子机器人 Pigeon robot based on stimulus control at midbrain motor area	ICo ToS LoC FRM RT OM TN TSM AV SGP	AP 2.00–4.00, ML 2.00–5.50, DV 6.50–7.50 AP 3.50, ML 4.00–5.50, DV 6.50–7.25 AP 1.00–2.75, ML 1.00–3.00, DV 8.50–10.00 AP 3.00–4.25, ML 0.75–2.00, DV 7.50–8.25 AP 5.25–7.00, ML 1.75–3.75, DV 7.25–9.25 AP 0.25–8.00, ML 1.00–7.00, DV 7.50–8.50 AP 5.75–7.50, ML 4.00–6.00, DV 7.50–8.50 AP 4.00–10.00, ML 0.00–3.50, DV 6.00–10.00 AP 5.25–7.50, ML 5.00–8.00, DV 6.00–8.50 AP 1.50–4.75, ML 4.00–5.50, DV 6.00–8.25

注:AP:前向后;ML:中缝左右;DV:颅骨硬脑膜平面向下;HA:上纹状体入口部;HD:上纹状体背部;DIVA:丘脑腹前背中核;PoA:古纹状体后部;PAG:导水管周围灰质;ICo:丘间核;ToS:半环隆枕区;LoC:蓝斑核;FRM:中脑内侧网状结构;RT:中脑圆形核;OM:枕中脑束;TN:带状核;TSM:中脑的中脑束;AV:原纹状体腹侧部;SGP:脑室纤维膜周围灰质。

Note. AP. Anteroposterior. ML. Mediolateral. DV. Dorsovenital. HA. Hyperstriatum accessorium. HD. Hyperstriatum dorsal. DIVA. Dorsalis intermedius ventralis anterior. PoA. Posterior pallial amygdala. PAG. Periaqueductal gray. ICo. Nucleus intercollicularis. ToS. Torus semicircularis. LoC. Locus ceruleus. FRM. Formatio reticularis medialis mesencephali. RT. Nucleus rotundus. OM. Tractus occipito-mesencephalicus. TN. Nucleus taeniae. TSM. Tractus septo-mesencephalicus. AV. Archistriatum ventral. SGP. Substantia grisea et fibrosa periventricularis.

2.3.1 以 ICo 为刺激调控靶点的鸽子机器人

鸽子的 ICo 类似于哺乳动物的下丘,与飞行运动有关。2012 年,戴振东团队在鸽子中脑电刺激诱导运动的初步研究中发现,ICo 靶点的电刺激可以诱发鸽子的扇翅行为,这对调控鸽子的飞行运动以及构建鸽子机器人具有重要意义^[12],并因此被成功应用于户外飞行调控^[13]。后来,该团队的进一步研究证实了 ICo 在鸽子运动行为调控中的作用,发现 ICo 靶点刺激还与鸽子的起飞反应密切相关^[14]。2018 年,山东科技大学团队详细描述了通过微电刺激控制鸽子机器人沿预定直线前进和后退的过程,发现 ICo 核团更适合作为诱导鸽子机器人“前进”行为的命令刺激靶点^[16]。

2.3.2 以 FRM 为刺激调控靶点的鸽子机器人

鸽子 FRM 是中脑网状结构的内侧部分,被认为参与了运动功能执行,是目前鸽子机器人调控研究中最受关注的核团。2015 年,戴振东团队发现 FRM 内的电刺激主要引起了鸽子的身体侧向移动和转向行为,为后续一系列以 FRM 为刺激调控靶点的鸽子机器人研究奠定了基础^[14]。2017 年和 2020 年,首尔大学团队分别基于全植入式和手持式神经刺激控制器,通过在 FRM 植入的深度电极施加电刺激诱发鸽子的转向转圈行为,验证了其在鸽子机器人远程导航控制中的可行性^[15,21]。2018 ~ 2019 年,郑州大学团队以 FRM 为刺激靶点开展了一系列研究,在基于神经信号记录、轨迹偏差反馈、网络通信等的行为调控方面积累了宝贵的经验,为鸽子机器人的实际应用提供了非常有价值的参考^[17–20]。2020 ~ 2023 年,戴振东团队基于预编程控制算法,分别结合分层刺激、闭环调控、分级控制等策略对

鸽子 FRM 是中脑网状结构的内侧部分,被认为

以 FRM 为刺激靶点的鸽子机器人持续开展深入优化研究^[22,26,29]。2021 ~ 2023 年, 黄淮学院团队聚焦 FRM 核团, 开发出的分布式远程刺激器、轻量级无线刺激器及埋入式柔性刺激器, 有助于突破鸽子机器人在远距离、稳定性和隐蔽性方面的应用限制^[24,28,30]。

2.3.3 以 SGP 为刺激调控靶点的鸽子机器人

鸽子的 SGP 核团位于中脑, 但被认为与其恐惧情绪有关。2012 年, 戴振东团队研究表明, SGP 靶点的电刺激诱发了鸽子的羽毛倒伏反应^[12]。2022 年, 郑州大学尚志刚团队通过对比鸽子强直性不动和视觉变化刺激实验中 SGP 脑区的神经响应, 证实了其在恐惧情绪编码中的作用, 并成功实现了基于 SGP 靶点电刺激的户外自由飞行鸽子机器人飞行方向控制^[25]。2023 年, 郑州大学尚志刚和王振龙团队合作利用免疫组化和电刺激方法探索了 SGP 的结构和功能分布, 揭示了恐惧情绪介导的 SGP 在鸽子逃避行为调节中的作用, 为鸽子机器人的闭环调控提供了新的候选核团和实现思路^[27]。

2.3.4 以中脑运动区其他核团为刺激调控靶点的鸽子机器人

鸽子的中脑结构相对复杂, 许多核团与运动行为之间呈现典型的多对多关系, 即一个核团可能对应多种行为, 而相同的行为也可以通过对多个不同核团的刺激分别实现, 这表明中脑运动区相关核团在调控鸽子行为中可能具有协同作用, 也进一步催生了以此类核团为刺激靶点的相关研究。ToS 核团位于中脑侧室腔下方, 戴振东团队发现 ToS 靶点的电刺激可以成功诱导鸽子的扇翅行为^[12], 并将这一效应用于预设飞行范围的鸽子机器人运动行为调控中^[13]。LoC 核团接受来自脊髓的传入, 被认为与鸽子的扇翅行为相关。2015 年, 戴振东团队首次基于 LoC 内的电刺激诱导出鸽子的起飞行为, 再次验证了鸽子中脑多区域与不同行为间的复杂关系^[14]。2021 年, 韩国首尔大学团队选取鸽子中脑运动区内的多个核团开展刺激实验, 结果表明, 刺激 RT、OM 和 TN 等核团能够诱导鸽子的左右身体转动, 而刺激 TSM 和 AV 核团则可诱导鸽子的扇翅和起飞行为, 这项研究使鸽子中脑相关核团与运动功能的关系逐渐明晰, 为鸽子机器人研究中调控靶点的多样化提供了坚实的实验证据^[23]。

基于中脑内运动相关位点的刺激调控可以有效避开脑中信息整合判断与运动规划决策的上行

复杂过程, 显著减少调控过程中可能引入的干扰, 因此在近年来广受关注。但由于中脑相关核团分布稠密且定位困难, 其中涉及的深层调控机理探索、合理刺激模式设计和精确刺激参数设定等问题尚待研究。

3 结语

鸽子机器人融合了鸽子本身的自主智能、能量自补给和高度灵活性优势, 以及微控制系统的高度精准性和可控性优势, 因此在鸟类脑结构和功能研究, 空间感知、侦察勘测和反恐搜救应用等方面具有巨大的科研和实践价值。本文分别介绍了近年来基于感觉系统、动机和情绪系统或皮层以及中脑运动区的鸽子机器人研究, 并对相关研究进展进行了总结与讨论。尽管近年来该领域研究在调控靶点多样化、参数多模化、环境复杂化、对象群体化和系统多功能化等方面不断取得突破, 促使鸽子机器人在更精准、更远程、更稳定的发展趋势中稳步前进, 但上述神经系统在鸽子机器人应用中的神经机理仍有待进一步的深入研究。在未来研究中, 应继续深入探明这些系统以及其中关键核团与运动行为之间的关系, 以期在核团定位方面促进鸽子机器人的精准控制。此外, 鸽子机器人运动行为相关神经信息在各神经系统中是如何被编码和传递的, 也需要更精细的解读, 这对于更好地解码运动神经信息, 阐明多核团间的神经交互, 揭示运动行为的分层多级调控机理, 以模拟鸽子自发神经活动进行刺激信号仿真编码, 并制定合理的协同化、序贯化调控方案具有重要意义。

参 考 文 献(References)

- [1] 方轲, 梅皓, 宋逸, 等. 动物机器人: 研究基础、关键技术及发展预测 [J]. 科学通报, 2022, 67(21): 2535–2552.
FANG K, MEI H, SONG Y, et al. Animal robots: research foundation, key technologies and development forecasts [J]. Chin Sci Bull, 2022, 67(21): 2535–2552.
- [2] 苏学成, 槐瑞托, 刘小峰, 等. 机器人鸟的一种制导方法: CN200710013769.7 [P]. 2007-09-26.
SU X C, HUAI R T, LIU X F, et al. A guidance method for robot birds: CN200710013769.7 [P]. 2007-09-26.
- [3] 肖远鹏, 刘新玉. 动物机器人及其潜在军事应用价值 [J]. 国防科技, 2020, 41(6): 22–27.
XIAO Y P, LIU X Y. Animal robots and their potential military application value [J]. Natl Def Sci Technol, 2020, 41(6): 22–27.
- [4] 苏学成, 槐瑞托, 杨俊卿, 等. 控制动物机器人运动行为的脑机制和控制方法 [J]. 中国科学: 信息科学, 2012, 42(4): 42–52.

- (9): 1130-1146.
- SU X C, HUAI R T, YANG J Q, et al. Brain mechanism and methods for robo-animal motor behavior control [J]. *Sci Sin Informationis*, 2012, 42(9): 1130-1146.
- [5] YANG J, HUAI R, WANG H, et al. A robo-pigeon based on an innovative multi-mode telestimulation system [J]. *Biomed Mater Eng*, 2015, 26(1): S357-S363.
- [6] HUAI R, YANG J, WANG H. The robo-pigeon based on the multiple brain regions synchronization implanted microelectrodes [J]. *Bioengineered*, 2016, 7: 213-218.
- [7] YANG J, HUAI R, WANG H, et al. Global positioning system-based stimulation for robo-pigeons in open space [J]. *Front Neurorobot*, 2017, 11: 40.
- [8] ZHOU Z, LIU D, SUN H, et al. Pigeon robot for navigation guided by remote control: system construction and functional verification [J]. *J Bionic Eng*, 2021, 18(1): 184-196.
- [9] 石勇, 于志豪, 颜瑞, 等. 面向动物机器人的光伏电池在线监测系统研究与应用 [J]. *生物医学工程学杂志*, 2022, 39(5): 974-981, 990.
- SHI Y, YU Z H, YAN R, et al. Research and application of photovoltaic cell online monitoring system for animal robot stimulator [J]. *J Biomed Eng*, 2022, 39(5): 974-981, 990.
- [10] TIAN X, SHI Y, ZHANG Y, et al. The role of posterior pallial amygdala in mediating motor behaviors in pigeons [J]. *Sci Rep*, 2022, 12(1): 367.
- [11] 常铭, 许孟华, 杨建宏, 等. 面向动物机器人的新型可充电表面肌电信号采集系统设计与应用 [J]. *现代电子技术*, 2022, 45(24): 136-140.
- CHANG M, XU M H, YANG J H, et al. Design and application of novel rechargeable sEMG acquisition system for animal robots [J]. *Modern Electron Tech*, 2022, 45(24): 136-140.
- [12] 董满收, 蔡雷, 王浩, 等. 电刺激家鸽中脑诱导运动的初步研究 [J]. *生物学杂志*, 2012, 29(4): 33-35.
- DONG M S, CAI L, WANG H, et al. A preliminary study on motion eliciting by electrically stimulating midbrain of pigeon [J]. *J Biol*, 2012, 29(4): 33-35.
- [13] 邵静丹. 鸽子机器人户外飞行调控工具的开发与应用 [D]. 南京: 南京航空航天大学; 2014.
- SHAO J D. Development and application of remote control equipment on pigeon pigeon-robots flying outdoors [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics; 2014.
- [14] CAI L, DAI Z, WANG W, et al. Modulating motor behaviors by electrical stimulation of specific nuclei in pigeons [J]. *J Bionic Eng*, 2015, 12(4): 555-564.
- [15] SEO J, CHOI G, PARK S, et al. Wireless navigation of pigeons using polymer-based fully implantable stimulator: A pilot study using depth electrodes [A]. Proceedings of 2017 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society [C]; 2017.
- [16] WANG H, YANG J, LV C, et al. Intercollicular nucleus electric stimulation encoded “walk forward” commands in pigeons [J]. *Anim Biol*, 2018, 68(2): 213-225.
- [17] 卢俊杉. 鸽子穿戴式神经信号检测与刺激闭环调控系统设计 [D]. 郑州: 郑州大学; 2018.
- LU J S. The design of wearable neural signal detection and stimulation closed-loop control system for pigeon [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University; 2018.
- [18] 王宏昌. 基于轨迹偏差反馈的鸽子飞行控制器研制 [D]. 郑州: 郑州大学; 2019.
- WANG H C. Development of pigeon flight controller based on trajectory deviation feedback [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University; 2019.
- [19] ZHAO K, WAN H, SHANG Z, et al. Intracortical microstimulation parameters modulate flight behavior in pigeon [J]. *J Integr Neurosci*, 2019, 18(1): 23-32.
- [20] YANG L, LI M, WAN H, et al. The wearable behavior control system for robo-animal [A]. Proceedings of 2019 38th Chinese Control Conference [C]; 2019.
- [21] SHIM S, YUN S, KIM S, et al. A handheld neural stimulation controller for avian navigation guided by remote control [J]. *Biomed Mater Eng*, 2020, 30(5-6): 497-507.
- [22] WANG H, WU J, FANG K, et al. Application of robo-pigeon in ethological studies of bird flocks [J]. *J Integr Neurosci*, 2020, 19(3): 443-448.
- [23] JANG J, BAEK C, KIM S, et al. Current stimulation of the midbrain nucleus in pigeons for avian flight control [J]. *Micromachines*, 2021, 12(7): 788.
- [24] HUANG A, WANG D, LIU X. A long-range neural stimulator for pigeon-robots [A]. Proceedings of 2021 IEEE 5th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference [C]; 2021.
- [25] YANG L, MA Z, LI M, et al. Creating virtual fear to control the locomotion behavior of pigeon robots using micro-stimulation [A]. Proceedings of 2022 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems [C]; 2022.
- [26] 王浩, 王绍康, 邱兆成, 等. 户外鸽子生物机器人的设计及初步应用 [J]. *生物医学工程学杂志*, 2022, 39(6): 1209-1217.
- WANG H, WANG S K, QIU Z C, et al. Design and preliminary application of outdoor flying pigeon-robot [J]. *J Biomed Eng*, 2022, 39(6): 1209-1217.
- [27] XU W, YANG L, WANG Z, et al. Stratum griseum periventriculare-mediated fear emotion regulates motor behavior in pigeons [J]. *J Bionic Eng*, 2023, 20(5): 2228-2239.
- [28] LIU X, SU Z, GAO Q, et al. Wireless-controlled cubic neural stimulator for free-moving animals [J]. *R Soc Open Sci*, 2023, 10(3): 221116.
- [29] FANG K, MEI H, TANG Y, et al. Grade-control outdoor turning flight of robo-pigeon with quantitative stimulus parameters [J]. *Front Neurorobot*, 2023, 17: 1143601.
- [30] 苏振岭, 王东云, 齐小敏, 等. 面向动物机器人的柔性埋入式神经刺激器研制 [J]. *生物医学工程学杂志*, 2023, 40(2): 327-334.
- SU Z L, WANG D Y, QI X M, et al. Development of a flexible embedded neurostimulator for animal robots [J]. *J Biomed Eng*, 2023, 40(2): 327-334.