文章编号: 1007 - 4252(2021) 04 - 0004 - 292

仿生水动力学柔性传感器件与系统的研究进展

马治强[1],公 正[1],何其沛[1],刘公超[1],盛天宇[1],胡晓禾[1],张德远[1],蒋永刚[1,2,*]
(1. 北京航空航天大学 机械工程及其自动化学院,北京 100191;
2. 北京航空航天大学 国际交叉科学研究院,北京 100191)

摘要: 海洋生态环境监测亟需高灵敏度的柔性流场感知器件与系统。物竞天择,生物已经进化出了各种各样性能优异的流场感知器官,为我们开发柔性流场感知器件提供了灵感的源泉。本文综述了以鱼类侧线、海豹胡须、鳄鱼圆顶感受器等为代表的水下生物流场感知器官,介绍了其感知原理及其功用。随后,本文介绍了仿生流速传感器、压力传感器及涡流传感器等水下柔性流场传感器件与系统,以及其在水下航行器流场分析和水生生物可穿戴方面的应用。最后,本文讨论了仿生柔性流场传感领域的技术瓶颈与发展趋势,并展望了其在水下流场智能分析的应用前景。

关键词: 仿生学; 水动力学; 柔性电子; 流场感知
中图分类号: Q811, TH-39 **文献标志码:** A

Review on Bio-inspired Flexible Hydrodynamic Sensors and Systems

MA Zhi-qiang[1], GONG Zheng[1], HE Qi-pei[1], LIU Gong-chao[1], SHENG Tian-yu[1], HU Xiao-he[1], ZHANG De-yuan[1], JIANG Yong-gang[1,2,*]
(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing, 100191, China;
2. International Research Institute for Multidisciplinary Science, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Marine ecological environment monitoring urgently requires flexible flow sensing devices and systems. By natural selection, creatures have evolved a variety of highly sensitive organs for flow field perception, which provides a new biomimetic approach for researchers to develop flexible flow sensors. This paper reviews various flow-sensitive organs of aquatic animals, such as fish lateral line, harbour seal whiskers and crocodile dome receptors, and introduces their sensing principles and functions. Then, we describe the recent progress in bio-inspired flexible sensors for hydrodynamic perception, such as bio-inspired flow velocity sensors, bio-inspired pressure sensors and bio-inspired vortex sensors. Their application in flow field analysis for unmanned underwater vehicles (UUVs) and in wearable sensing for aquatic animals are described as well. Finally, we discuss the technological challenges and future trends of bio-

收稿日期: 2021-07-27; **修订日期:** 2021-08-10
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51975030; No. 52022008).
作者简介: 马治强(1992-),男,博士,主要从事洞穴鱼侧线感知及其仿生学研究(E-mail: mazqbuaa@163.com).
通信作者: 蒋永刚(1982-),男,博士,教授,主要从事仿生感知和微机电系统技术研究(E-mail: jiangyg@buaa.edu.cn).

inspired flexible hydrodynamic sensors, and outlooks their practical applications in the intelligent flow-field analysis.

Key words: Biomimetics; Hydrodynamic; Flexible electronics; Flow field perception

0 引言

海洋生态环境监测在海洋资源开发、海洋基础设施建设、海洋灾害规避等方面的重大战略意义，推动了海洋传感器技术的不断进步。除了声学与温盐深(CTD)参数外，流场作为海洋动力环境要素，其有效测量技术一直受到关注。高灵敏的压力和流速传感器是智能流场分析的核心硬件，现有的电磁和超声波流速传感器可实现毫米每秒级的分辨率，然而体积和重量大，阵列化困难；压力传感器分辨率为帕级，迫切需要进一步提升。物竞天择，生物进化出了各种各样的、可用于导航、空间定位、捕食和目标监测的高灵敏度流场感知器官(如鱼类侧线、海豹胡须、鳄鱼突起等)，为研究人员开发流场感知器件提供了新思路。此外，柔性电子技术的发展为仿生流场传感器件的制造提供了新的技术手段，为传感器在复杂航行器外形上的阵列化安装乃至穿戴于动物体本身提供了技术可能性。基于仿生感知机理与柔性电子制造技术的流场感知器件与系统成为国内外水下传感器研究的前沿方向之一。

水生动物的高灵敏流场感知原理源于其在特殊生存竞争环境下感知系统的进化。洞穴盲鱼在视觉缺失的条件下其管道侧线进化出变径特征，实现压差感知的灵敏度提升；海豹基于主动捕猎时涡流感知的需要，其胡须进化出波浪状形貌以实现涡激振动的抑制。上述基于形态特征的优势与感知原理值得进一步分析和总结。柔性电子技术虽然在医疗电子、柔性显示、能源电子等领域取得了突飞猛进的发展，然而针对水下环境的感知，不但需要实现传感器性能指标上的突破，还需要在防水、耐压、防污等方面综合提升。面向柔性传感系统在海洋环境与生态监控方面的广泛应用前景，本文重点论述生物流场感知的特异原理、柔性感知器件的仿生设计与制造，及其在智能流场分析与海洋监测中的应用，并讨论仿生水下柔性电子发展的瓶颈问题与未来趋势。

1 生物流场感知原理

1.1 鱼类侧线系统

鱼类和水生两栖动物能够通过机械感知侧线系统来感知微弱的流体运动和压力梯度[1,2]。侧线系统可以帮助这些动物完成如群游[3,4]、猎物捕捉[5-7]、通讯[8,9]和趋流行为[10-12]等功能。侧线系统由大量、不均匀地分布在整个鱼体上的神经丘组成，如图1(a)所示。

作为侧线系统的功能单元，神经丘是由机械感知毛细胞和非感知细胞组成的小型感受器(图1(b))。单个毛细胞中的纤毛束由单个动纤毛和多个长度不等的短的静纤毛组成[13]。单个神经丘中所有毛细胞的纤毛束伸入到一个扁长的透明胶质顶中，使静纤毛偏转，并通过机械敏感的离子通道启动兴奋或抑制的转导过程。静纤毛的尖端通过顶端连接丝连接，它们向动纤毛的弯曲引发了离子穿过毛细胞膜的运输，使其去极化，并提高了兴奋性反应传入神经元的放电速率[14]。静纤毛向相反的方向弯曲，阻止了离子的运输，使毛细胞膜发生超极化，降低了神经元产生抑制性反应的放电率。

大多数硬骨鱼类的神经丘根据其位置可分为两种类型：体表神经丘(SN，Superficial Neuromast)和管道神经丘(CN，Canal Neuromast)，如图1(c)所示。体表神经丘位于皮肤表面，其胶质顶与外部流体直接相互作用，所以对流速敏感。体表神经丘可以感知um/s量级的流速。而管道神经丘位于表皮下充满液体的侧线管道中，通过侧线孔与外部周围环境相连通，对相邻两个侧线孔之间的压力梯度敏感[17,18]。管道神经丘可以感知mPa量级的压差。

对于流场刺激，体表神经丘主要解析直流流场(DC)刺激，可以视为一种低通滤波器，且其截止频率为数十赫兹，如图1(d)所示。相比之下，管道神经丘对直流流场不敏感，主要感知频率范围为10~500 Hz的振荡流场[19]。这就意味着，管道神经丘几乎不受低频率、大尺度流场的影响，比如动物周围水域的流场或者动物自身的运动。这使得管道神经丘能够对其他动物产生的高频信号做出响应。

常年生活在完全黑暗、复杂的洞穴里，洞穴鱼已经进化出了更为发达的侧线系统[20-23]，以弥补缺失

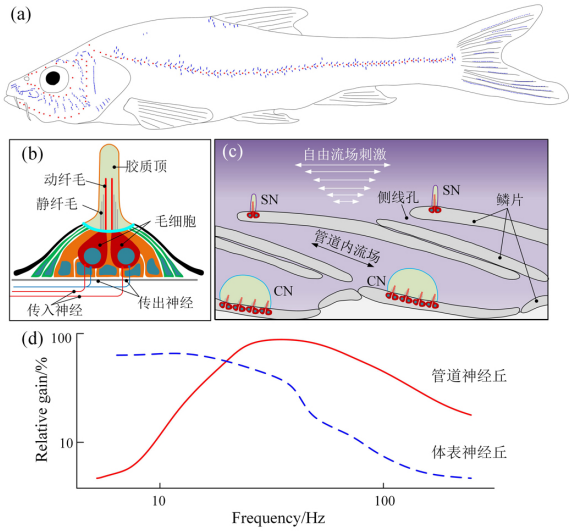

图 1 鱼类侧线系统:(a)大眼金线鲃的侧线系统分布[14],小蓝点表示体表神经丘,大红点表示管道神经丘(为表达清晰神经丘的分布,鳞片未显示);(b)神经丘结构[14];(c)神经丘空间位置;(d)体表神经丘(SN)和管道神经丘(CN)的频率响应特性示意图

Fig. 1 Lateral line system of fish(a) Distributions of SNs (small blue dots) and CNs (large red dots) in Chinese cavefish Sinocyclocheilus macrophthalmus [14] (The scales are not drawn to clearly illustrate the distribution of neuromasts); (b) Structure of neuromast [14]; (c) Spatial location of neuromasts; (d) Schematic diagram illustrates the frequency response properties of superficial neuromast (SN) and canal neuromast (CN)

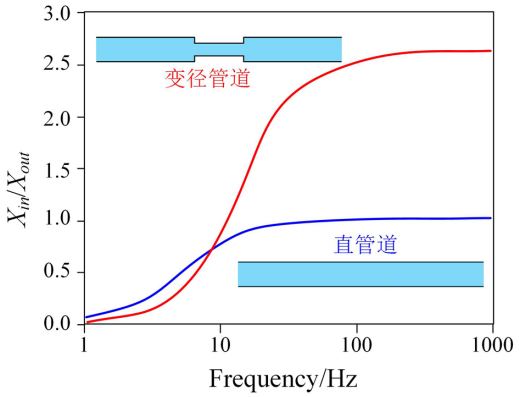

图 2 侧线管道的力学灵敏度响应示意图

Fig.2 Schematic diagram illustrates the mechanical sensitivity response of lateral line canal

的视力,适应洞穴环境。Jiang 研究团队发现金线鲃洞穴鱼的躯干管道侧线具有显著的变径结构特征[22,23]。运用流固耦合仿真,他们发现,变径结构可以提高管道神经丘附近的流速,进而提升管道侧线系统的灵敏度。

1988 年,Denton 和 Gray 提出了侧线管道的数学模型,以揭示管道力学特性[24]。侧线管道的力学灵敏度可以定义为管道内水质点位移 X_{in} 与附近管道外水质点位移 X_{out} 的比值,即 X_{in}/X_{out}[24]。如图 2 所示,侧线管道力学灵敏度计算结果表明,侧线管道中的变径结构能够:1)进一步衰减低频响应;2)增强管道侧线的高通作用;3)在高频率刺激段,具有更高的灵敏度。

1.2 海豹胡须

一些鳍足类动物能够使用它们高度敏感的胡须来追踪微小的水中扰动,比如鱼类游动的尾迹。Denhardt 等人研究发现,被蒙住眼睛的斑海豹能利用它们的胡须来检测 10~100 Hz 范围内的流场信号,检测阈值低至 245 μm/s[25-28]。即使在长达 20 s 的延迟过后,斑海豹依旧能探测和跟踪微型潜航器的尾流。它们不仅能探测到涡流,还能通过涡的大小和排列方式感知水下物体的大小、方位和速度[29,30]。海豹的胡须比其他海洋动物的胡须更长、更硬,毛囊周围有复杂的神经纤维和各种机械感受器[31-33]。海豹的胡须长度在 0.8 cm 到 10.5 cm 之间,密度为 911±100 kg/m^3,杨氏模量为 1.8~3.3 GPa[34]。有别于其他鳍足类动物如海狮,斑海豹的胡须有椭圆形的截面形状,并沿着胡须方向有波浪形的波动[35,36](图 3(a))。

Schulte-Pelkum 等人注意到,当海豹在水中向前移动时,与在空气中的姿态相比,胡须没有明显的弯曲和振动,从而提高其对上游物体留下的尾迹的检测灵敏度[30]。与普通圆柱形状相比,海豹胡须能够有效地改变胡须后方的涡流,减少胡须诱发的涡激振动,并且可以在游动的过程中保持垂直的状态[37-39]。海豹胡须产生尾迹的 CFD 仿真结果显示(图 3(b)),胡须下游的涡街被一个复杂的旋涡结构所取代:由于海豹胡须的直径在须轴方向上的波动,各种大小的卡门涡街旋涡在须轴方向上同时产生,这些涡相互交叉,因此海豹胡须难以像圆柱那样在下游形成显著而稳定的大涡结构。此外,与圆柱体相比,海豹胡须尾迹漩涡的形成区域明显向下游移动,从而减弱了漩涡对胡须的作用力[36,39]。Beem

等人使用染料从下向上拍摄由各种形状的胡须产生的尾迹[38]，与仿真结果一致。此外，他们还发现与圆柱状胡须相比，海豹胡须在上游圆柱尾迹中的振动更为显著，即使在测试的最大距离下，胡须仍能保持相同频率的振动。因此，海豹胡须作为涡流传感器具有很高的灵敏度。

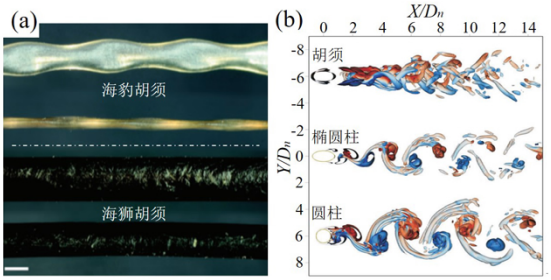

图 3　(a) 海豹胡须与海狮胡须外形对比[36]；(b) 海豹胡须、椭圆柱、圆柱的尾迹 CFD 仿真[36]

Fig.3 (a) Structure ofharbour seal and California sea lion whiskers[36]; (b) CFD simulation of the wake-flow behind seal vibrissa, ellipse and cylinder[36]

1.3　鳄鱼圆顶压力感受器

鳄鱼和短吻鳄的头部、颚部、嘴里和齿间有许多略微凸起的圆形色素“斑点”，触觉是由多种机械感受器提供的，这些感受器是位于角质层轻微变薄下的特殊神经末梢，感觉器官表面的变形刺激受体内的神经末梢，产生神经冲动。在夜间当鳄鱼的视力大大降低时，这种感觉器官显得尤为重要。2002 年，Soares 发现这些在数百万年前就在两栖的鳄鱼身上出现的外皮感受器是一种穹顶形压力感受器(dome pressure receptor)，用于探测水面上的流场扰动; 而在陆生鳄鱼身上并不具备这种感觉器官[40]。2012 年，Leitch 等人分析了密西西比鳄和尼罗鳄身上的穹顶形感受器的分布、神经支配和响应特性，发现感受器下方存在快适应性神经元(RA)和慢适应性神经元(SA)，压力的空间分辨率可达 0.1 mm^2，探测极限可达 0.08 mN; 并断定这是一种多功能的感受器，包括水流、触觉等[41]。2013 年，Milinkvitch 进一步研究认为，鳄鱼的外皮感觉器官(ISO，Integumentary Sense Organ)与其它脊椎动物感觉器官完全不同，把触觉、冷热和化学刺激探测结合在了一起，进化成一种高级装甲式的灵敏皮肤[42]，如图 4 所示。这种多功能的外皮感觉器官为水中的多功能探测提供了一种新的仿生模型[43]，其高灵敏机理和猎物定位机理有待进一步研究。

除了上述鱼类侧线、海豹胡须和鳄鱼外皮感觉器官等流场感受器外，牛蛙的球囊[44]、博比特虫的触须[45]、仰泳蝽的刚毛[46]等都被发现具有高灵敏的水下流场扰动感知能力。生物特异流场感知机理的发现为柔性流场传感器的设计提供了仿生学新思路。

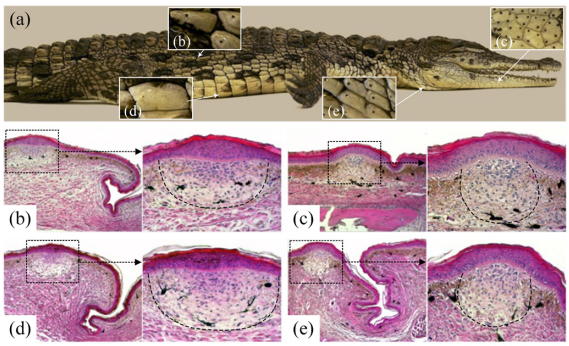

图 4　尼罗鳄的外皮感觉器官(ISO)分布与结构: (a) 尼罗鳄的 ISO 在背部、面部、腹部和颈部的分布; (b-e) 分布有 ISO 的皮肤染色的旁矢状切面图，其中，ISO 的部分用虚线标识[43]

Fig. 4 Distribution and structure of integumentary sensory organs in crocodylians. (a) The presence of integumentary sensory organs (ISOs) on dorsal, face/jaws, ventral, and neck scales in C. niloticus. (b-e) Parasagittal sections of corresponding ISO-bearing skin stained with hematoxylin and eosin. The lightly stained dermal component of ISOs is indicated by dashed lines[43]

2　仿生柔性流场传感技术

2.1　仿生流速传感器

生物侧线系统的超灵敏和高精度流场感知能力促进了人工侧线系统的研究。近年来，受体表侧线启发，国内外开发了各式各样的仿体表侧线流速传感器件。自 2002 年第一个硅基悬臂梁的流速传感器[47]之后，各种传感机制被应用到人工侧线系统的研究中，包括压阻式、压电式、电容式、热式和光纤式等。随着水下航行器、水下机器人的微型化和柔性化，水下流速传感器也逐渐向柔性、高灵敏方向发展[14]。

目前的仿生柔性流速传感器主要采用了热线式、压阻式和压电式传感原理。2006 年，Pandya 等

人利用微纳加工和三维组装技术首次开发了热式流速传感阵列(图5(a))[48],该阵列集成了16个间距1 mm的流速传感单元。传感单元由镍/聚酰亚胺薄膜复合材料制成,其工作原理是电流将热线元件加热到环境温度以上,流体流动时的热对流带走热量导致热线温度下降,而金属电阻与温度成比例,通过搭建恒温控制电路可以测量金属电阻与流速之间的关系。实验结果表明,该流速传感器可实现100 μm/s的流速检测阈值。

2016年,Kottapalli等人提出了基于液晶高分子聚合物(LCP,Liquid Crystal Polymer)基底的压阻式人工侧线流速传感器(图5(b))[49]。与硅相比,LCP膜具有更高的断裂强度,比硅膜更能承受水中压力波产生的压力冲击;它还具有较低的吸湿系数和很高的防潮性能,是水下传感器件的优良基底材料。此外,LCP对各种化学物质都比较稳定,甚至与硅片上使用的常规MEMS加工工艺兼容。该仿生传感器主要由金应变单元、LCP基底膜和人工胶质顶纤毛结构组成。其工作原理为:当外部流场通过胶质顶纤毛结构时,会在纤毛结构上施加摩擦力和阻力并使其弯曲。由于纤毛固定在柔性膜中央,因此力施加在纤毛上时,柔性LCP基底膜的一侧会有向上的拉应力而另一侧会产生向下的压应力。应力引起基底膜的应变,进而引起沉积在基底膜上的金应变单元的电阻变化。实验结果表明,该流速传感器可实现18 mm/s的流速检测阈值。

2017年,Bora等人开发了压电式柔性流速传感器(图5(c))[50]。其传感单元由聚偏氟乙烯(PVDF)纳米纤维薄膜和碳纳米管仿生纤毛组成。在仿生纤毛上滴铸水凝胶以增加粘滞阻力,进一步提高传感器的灵敏度。实验结果表明,该传感器能够实现5 mm/s的动态速度检测阈值。2019年,Hu等人开发了基于P(VDF-TrFE)/(BTO)纳米纤维的压电式流速人工侧线传感阵列(图5(d))[51]。该传感器以P(VDF-TrFE)/(BTO)静电纺丝纳米纤维薄膜为传感层,以含有阵列环形腔体的聚酰亚胺薄膜为衬底,以聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)柱为仿生纤毛。实验结果表明,与纯P(VDF-TrFE)纳米纤维相比,P(VDF-TrFE)/BTO静电纺丝纳米纤维薄膜的结晶度和压电性均有提高。仿生流速传感器的速度检测极限为0.23 mm/s,优于传统的基于纳米纤维薄膜的流速传感器。仿生柔性流速传感器能够达到

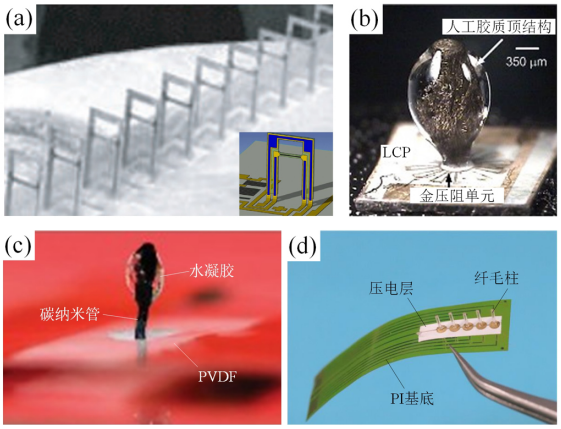

图5 流速感知的水下柔性人工侧线系统:(a)热线式流速传感阵列[48];(b)基于LCP基底的柔性流速传感器[49];(c)基于PVDF纺丝纤维的压电式柔性流速传感器[50];(d)压电式流速人工侧线传感阵列[51]

Fig.5 Underwater flexible artificial lateral line (ALL) systems for flow velocity sensing (a) Hotwire flow velocity sensor array[48]; (b) Flexible flow velocity sensor based on Liquid Crystal Polymer (LCP) substrates[49]; (c) Flexible flow velocity sensor featuring the PVDF piezoelectric membrane[50]; (d) Piezoelectric flow velocity ALL sensor array[51]

亚毫米每秒的检测极限,其阵列化为水下航行器流场感知应用奠定了基础。

2.2 仿生柔性压力传感器

受鳄鱼的ISO外皮感觉器官和鱼类的管道侧线系统的启发,研究人员研制出多种仿生压力和压差传感器。2016年Kanhere等模仿鳄鱼的穹顶形压力感受器包含SA和RA两种感受器的特点,通过集成压阻式压力传感器和压电式传感器,验证了对稳定压力和压力扰动的感知能力[43]。

通过将智能流场传感结构集成到仿管道侧线的微流体管道中,研究人员研制出仿管道侧线结构的仿生压差传感器。2017年,受鱼类管道侧线系统启发,Jiang等人将悬臂式压电传感单元集成到聚二甲基硅氧烷(PDMS)管道中,开发了管道人工侧线压差传感阵列(图6(a))[52]。柔性传感元件采用PVDF压电薄膜。其传感原理可以大致描述为:当外部流体经过侧线孔时,会在侧线孔之间产生压力差,导致管内的流体流动;侧线管内流体对仿生胶质顶施加摩擦力和粘滞阻力并使其弯曲。由于仿生胶质顶固定在柔性悬臂梁的顶端,因此悬臂梁发生位

移。压电薄膜产生应变，上下电极间有电荷输出。实验结果表明，该传感阵列实现了侧线管道的高通滤波功用，且在共振频率响应下压力梯度检测极限约为 11 Pa/m。

2019 年，Ma 等人提出了一种带有变径管道结构的柔性人工侧线压差传感阵列(图 6(b)) [53] 。柔性传感元件采用 P(VDF-TrFE) 压电薄膜悬臂梁，悬臂尖端安装有仿生纤毛柱。模仿生物侧线管道的变径增敏结构，他们在纤毛柱对应的管道处进行了变径结构的设计，以提高管道内局部粘滞阻力，增强压电信号输出。实验结果表明: (1) 变径结构能够显著提升管道侧线的灵敏度; (2) 变径管道侧线系统实现了 0.64 Pa/m 的压力梯度探测极限，相当于 3.2 mPa 的压差。可见，通过对侧线压差感知结构和功能的模仿，水下柔性压差传感器的探测能力已经接近鱼类压差感知的水平。未来应进一步把前端调理电路集成到柔性流速传感阵列，进一步提升信噪比和稳定性。

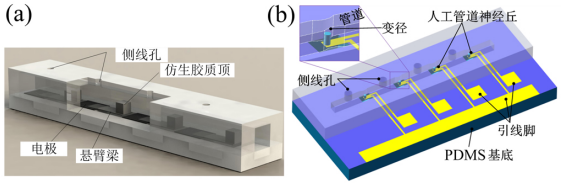

图 6　水下柔性压差感知的人工侧线系统: (a) 直管道结构的人工侧线系统 [53] ; (b) 变径管道结构的人工侧线系统 [53]

Fig.6 Underwater flexible artificial lateral line (ALL) systems for pressure difference sensing. (a) ALL system with straight canal structure [53] ; (b) ALL system with constriction canal structure [53]

2.3　仿海豹胡须涡流传感器

海豹胡须具有波浪状的外形，有效降低了胡须在流场中的阻力和涡激振动。受海豹胡须的启发，胡须结构被广泛应用于柔性涡流传感器的研发。但是，目前的柔性涡流传感器多用圆柱代替胡须，具有完全仿海豹胡须外形的柔性传感器未有报道。2017 年，Gul 等人设计并制造了一体化 3D 打印的仿海豹胡须传感器 [54] ，如图 7(a) 所示。人工胡须毛是长径比(L/d) 为 20: 1 的聚氨酯柱，其传感单元由四个围绕在聚氨酯柱上的石墨烯压阻块组成。这种胡须传感器可以检测任何方向上的应变，电阻变化可高达 1180%，并且能够在 2000 个周期内保持稳定，但响应时间却高达 220 ms。2018 年，Liu 等人报道了一种可拉伸的胡须传感器 [55] 。该传感器利用毛细力将碳纳米管(CNT) 溶液吸附在柱体上，并利用掩模板进行部分亲水处理形成薄层 CNT 和环状厚层 CNT。这种传感器可以很容易地集成制造并用于检测微小气流和水流，包括流动速度，阻尼振动和层流紊流状态等流体细节。2020 年，Sengupta 等人制造了一种基于电纺碳纳米纤维(CNF) 传感膜的人工胡须传感器 [56] ，如图 7(b) 所示。他们将钛质圆柱粘在悬空的 CNF 薄膜上，可以对胡须尖端低至 50 mm 的偏转产生响应。该传感器的稳态流速灵敏度为 6.16 mV/(m/s) ，振荡流速灵敏度为 26 mV/(m/s) ，振荡气流的检测阈值低至为 12.1 mm/s。

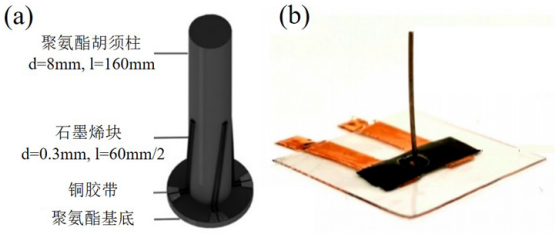

图 7　仿海豹胡须涡流传感器: (a) 完全 3D 打印的柔性胡须传感器 [54] ; (b) 基于 CNF 传感膜的胡须传感器 [56]

Fig.7 Harbour seal whisker inspired vortex sensor. (a) Fully 3D printed soft whisker inspired sensor [54] ; (b) Carbon nanofiber-based whisker inspired sensor [56]

此外，也有研究人员开发了基于硬质基底的仿胡须外形传感器。例如 Kottapalli 等人在 2014 年研发的基于仿生胡须柱和锆钛酸铅(PZT) 的胡须传感器 [57] ，能够检测到微小的水下扰动，速度检测极限为 193 μm/s。2020 年，Zhang 等人制作了一种由椭圆柱和 PZT 膜片组成的胡须传感器 [58] 。该传感器对水流速度的灵敏度高达 1.445 V/(m/s) ，同时具有检测水流攻角的能力。仿海豹胡须的涡流传感器已经达到了亚毫米每秒的检测极限，并集成了海豹胡须的外形特征以实现涡激振动抑制，提升了传感器的信噪比。目前仍以单个传感器研究为主，仿海豹胡须的阵列化是未来研究的重点。

表 1 仿生水下柔性传感器总结

Table 1 Summary of bio-inspired underwater flexible sensors

生物原型	生物功能	仿生柔性传感器				
		传感原理	传感材料	传感结构及尺寸(um)	传感性能	参考文献
体表侧线	速度传感器	热线式	镍	支撑梁: 400 (w) × 600 (h)	L: 100 μm/s;	[48]
		压阻式	金	传感薄膜: 2000 (d) × 25 (t) 仿生纤毛: 2700 (h) × 1000 (d)	L: 18 mm/s; S: 77 mV/(m/s)	[49]
		压电式	PVDF 纳米纤维薄膜	传感薄膜: 2000 (d) × 20 (t) 仿生纤毛: 4000 (h) × 1500 (d)	L: 5 mm/s; S: 45.2 mV/(m/s)	[50]
			P(VDF-TrFE)/(BTO) 纳米纤维薄膜	传感薄膜: 2400 (d) × 40 (t) 仿生纤毛: 5000 (h) × 500 (d)	方向性感知; L: 0.23 mm/s; S: 45.2 mV/(m/s)	[51]
鳄鱼圆顶感受器	压力传感器	压阻式	金	传感薄膜: 5000 (l) × 3000 (w) × 25 (t)	来流大小及方向感知	[43]
		压电式	PZT	传感薄膜: 2000 (l) × 2000 (w) × 3 (t)	检测振动源的位置	[43]
管道侧线	压差传感器	压电式	PVDF 薄膜	悬臂梁: 5000 (l) × 2000 (w) × 86 (t); 仿生纤毛: 1500 (c)	过滤低频; L: 11 Pa/m (@110±1 Hz)	[52]
			P(VDF-TrFE) 薄膜	悬臂梁: 1000 (l) × 500 (w) × 4 (t); 仿生纤毛: 500 (h) × 300 (d)	变径增强感知; L: 0.64 Pa/m	[53]
海豹胡须	涡流传感器	压阻式	石墨烯	石墨烯块: 60000 (l) × 300 (d) 胡须柱: 160000 (h) × 8000 (d)	检测人造鱼鳍尾迹旋涡	[54]
			CNT	胡须柱: 14000 (h) × 1200 (d) 覆盖 CNT 胡须柱: 2000 (h)	气流 L: 0.3 m/s; 水流 L: 0.1 m/s;	[55]
			CNF 薄膜	传感薄膜: 2000 (d) × 40 (t) 胡须柱: 8000 (h) × 400 (d)	稳态流速 S: 6.16 mV/(m/s); 振荡流速 S: 26 mV/(m/s); 振荡流速 L: 12.1 mm/s	[56]
		压电式	PZT	传感薄膜: 27 (t) 胡须柱: 3958 (h) × 1144 (d) × 523 (b)	L: 193 μm/s	[57]
				传感薄膜: 2000 (d) × 40 (t) 胡须柱: 6550 (h) × 1900 (a) × 920 (b)	S: 1.445 V/(m/s)	[58]

注释: h,高度; d,直径; l,长度; w,宽度; t,厚度; a,最大椭圆长轴; b,最大椭圆短轴; c,立方体边长; L,最小检测极限; S,灵敏度。

3 水下流场感知系统应用与趋势

3.1 水下航行器流场分析

在黑暗和浑浊的水环境中,基于视觉传感的水下航行器很难探测到周围环境。在考虑生态保护的场合中,被动传感比声纳等传统探测技术更受青睐。因此学习鱼类侧线系统的生物学原理,在水下航行器或机器人上实现人工侧线流场传感系统已成为国

内外研究的热点方向。

2015 年，Asadnia 等人开发了基于水下流场感知的仿黄貂鱼水下机器鱼(图 8(a))[59]，该机器鱼搭载了前期研究的压阻式水下流速传感器和压电式振动压力传感器，实现姿态感知和运动控制。其中，流速传感单元安装在机器鱼头部，通过流场感知来确定机器鱼的游动速度; 振动压力传感器安装在机器鱼两鳍，获取拍动频率、拍动幅度、拍动轨迹和游动方向的相关信息。实验结果表明，两鳍在 2 Hz 以下拍动时，振动压力传感器的平均检测误差约 4.7%。此外，流场感知的结果应用于反馈控制，可以预测机器鱼的运动轨迹。

2015 年，DeVries 等人在翼型水下航行器上开发了基于压力/流速融合感知的人工侧线系统(图 8(b))[60]。该系统配备了基于离子聚合物-金属复合材料(IPMC)的流速传感器和 SPR-524 商用压力传感器。IPMC 是一类重要的电活性聚合物，具有固有的驱动和传感特性，已广泛应用于水下驱动、感知和能量收集。利用 IPMC 制作的流速传感器具有工艺简单、灵敏度高等优点。他们提出了基于势流模型的递归贝叶斯滤波估计方法，利用流速和压差测量的互补性来估计来流速度和偏航角并用于反馈控制。该人工侧线系统在 0.12 m/s 的水流中，流速估计误差在 0.02 m/s 之内; 迎角控制误差在 5°以内，并且具备姿态保持和障碍物感知能力。2021 年，Jiang 等人利用 IPMC 流速传感器和商用压力传感器开发了基于压力/流速融合感知的人工侧线系统(图 8(c))[61]，并提出了基于多层感知(MLP)神经网络的目标定位算法，实现了水下偶极子振动源三维定位功能。在平面内，与单一的压力或流速传感模式相比，压力/流速融合传感模式降低定位误差约 30%; 在距离人工侧线系统 1 倍体长的三维空间范围内，融合传感方式定位误差约为 0.1 倍体长，并且该系统在三维偶极子定位功能方面对环境水流的干扰具有一定的鲁棒性。

可见，分布式流场感知已初步在航行器模型上展示了其流场分析与姿态测量的功能，压力与流速融合系统体现了其在涡街探测和目标定位方面的优势。航行器表面的分布式流场感知除了要求传感器的稳定性和一致性外，随着传感器数量的增加，亟待电路和控制系统的集成化和小型化。

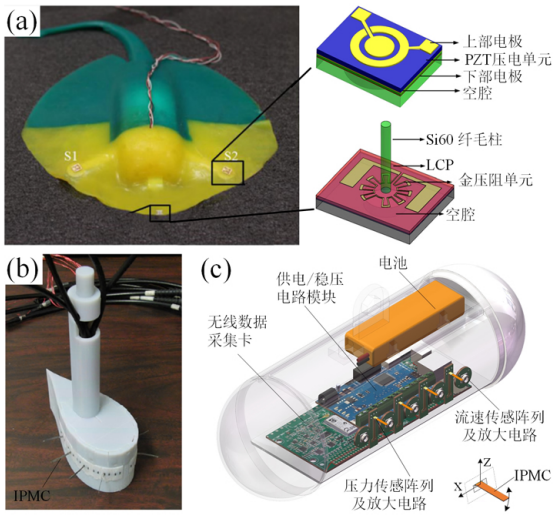

图 8　基于人工侧线系统的水下航行器流场感知: (a) 基于水下流场感知的仿黄貂鱼机器鱼[59]; (b) 基于压力/流速融合感知的翼型人工侧线系统[60]; (c) 基于压力/流速融合感知的人工侧线系统[61]

Fig.8 Flow field perception of underwater vehicle based on ALL system. (a) Biomimetic robotic stingray based on underwater flow field perception[59]; (b) An airfoil ALL system based on pressure/velocity fusion sensing[60]; (c) ALL system with pressure/velocity fusion sensing[61]

3.2　水生动物可穿戴柔性传感系统

水生动物的可穿戴传感系统提供了有关动物行为、环境条件和地理位置等信息。2012 年，Broadbent 等人研发了一种基于商用传感器的小型盐度-温度-深度(CTD)生物标签，扩展测量了加速度，环境光等参数; 将该生物标签固定于海龟的体表，他们获得了墨西哥湾的电导率、温度和深度的垂直剖面数据[62]。但是商用传感器的硬质封装结构限制了其适用的动物范围。

近年来随着柔性电子技术的发展，水生动物可穿戴柔性传感系统也得到了广泛的研究。2015 年，Zhang 等人开发了一种鱼体可穿戴的 ECG 传感器(图 9(a))，这种基于 Parylene-C 封装的心电传感器被制造成一个可穿戴外套结构，方便安装到鱼体表面，进行实时测量。该传感器解决了对鱼类进行微心电图(mECG)测量时需将其麻醉和移出水生环境所产生的混杂影响，揭示了鱼类心率(HR)和心率变异性(HRV)的昼夜变化[63]。2016 年，Li 等人开发了一种基于柔性压电单元的自供能鱼体声发射

装置(图 9(b)),使用柔性压电束从游动的鱼身上获取能量作为动力源。发射器可被检测范围高达 100 m,在空气中重约小于 1g;可贴附于鱼类体表,当鱼以一种自然的方式游动时,很容易被探测到,实现位置追踪[64]。2019 年,Shaikh 等人为研究环境变化及其对海洋生态系统的影响,开发了一种基于 PDMS 可拉伸的电子皮肤(图 9(c),9(d)),其集成了温度、盐度和深度三种传感模态。该水下电子皮肤能在 2 km 深的高盐红海海水中连续工作 4 周。这种可穿戴电子皮肤(在空气中小于 0.5 g)装置被安装在澳洲鲈、鲷科和普通金鱼身上,而不会妨碍动物的自然运动或行为[65,66]。

目前水生动物柔性可穿戴传感系统在水生环境和动物行为的检测方面的应用前景已被初步展示,可以远程监测动物的习性与栖居地生态环境的变化。目前仍然面临生物体表适应性不足,水下工作时长短和耐压性差等方面的问题。

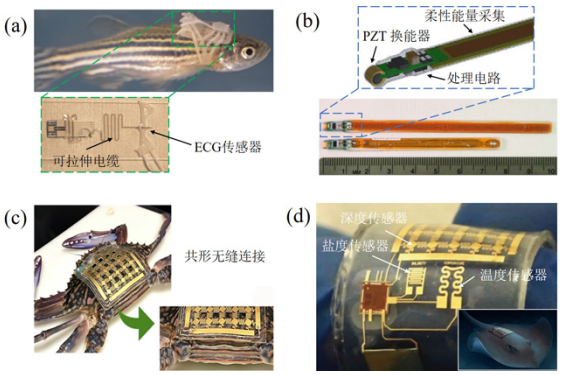

图 9 (a)基于 PDMS 的心电图传感器(ECG)安全地粘附在斑马鱼的腹腔表面[63];(b)鱼体自供电声发射机的设计与原型机[64];(c)无缝附着在螃蟹上的海洋电子皮肤系统[65];(d)可穿戴的多传感海洋皮肤装置[66]

Fig.9 (a) The PDMS-based electrocardiogram sensor (ECG) was safely attached to the abdominal surface of zebrafish[63]; (b) Design of the self-powered acoustic transmitter: CAD of the transmitter and photograph of the actual transmitter prototypes[64]; (c) Digital photos of the marine skin system seamlessly attached on the crab using superglue[65]; (d) The wearable multisensory Marine Skin gadget with a reliable interlocking mechanism showing all the components[66]

3.3 柔性水下流场感知系统的技术挑战与发展趋势

水下流场感知系统是融合了生物学、流体力学、微纳制造、信息通讯等多学科交叉的研究。目前面临的主要技术挑战包括:(1)目前生物流场感知仍是一种近场感知手段,灵敏度和探测极限的提升需要我们对生物感知和信号处理机理的进一步揭示;(2)高灵敏柔性流场传感器的稳定性和一致性仍面临挑战;(3)随着分布式流场传感器数量的增加,迫切需要传感器及其处理电路的进一步集成化和小型化。

面向智能流场分析的需求,柔性流场感知系统的未来发展趋势可聚焦于以下几个层面:(1)运用可靠的加工工艺路线,开发出性能稳定、可靠的感知系统,以进一步提升柔性流场感知系统的实际应用能力;(2)柔性流场感知系统可实现放大电路、调理电路及采集电路等电路的集成,降低系统的噪音,进一步提升其感知性能;(3)生物流场感知系统是多模态同时并行的,所以人工柔性流场感知系统可以融合如压力、流速、温度、深度、酸碱度等多种模态,实现复杂流场的精确、同步感知;(4)集成运算等模块,结合神经网络等算法,赋予柔性流场感知系统以智能特性,实现流场的智能感知及自主反馈。

4 结论

经过数千年的进化,水生生物已经进化出如鱼侧线系统、海豹胡须、鳄鱼圆顶压力感受器等性能十分优异的流场感知器官,以对流场进行精准解析。受此启发,研究人员开发了各式各样的柔性水下流场感知系统。相当一部分柔性水下流场感知系统实现了与生物原型相当的性能。但是,生物原型的感知增强原理仍需进一步揭示,更高灵敏度的水下流场感知系统也需进一步研发。此外,柔性水下流场感知系统的实际应用,仍需研发人员进一步努力实现。

致谢:

本论文研究得到了国家自然科学基金(51975030 和 52022008)的经费支持。

参考文献:

[1] Bleckmann H. Reception of Hydrodynamic Stimuli in Aquatic and Semiaquatic Animals [M]. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 1994.

[2] Coombs S, Montgomery J. The enigmatic lateral line system.

// Popper A, Fay R. Comparative Hearing: Fishes and Amphibians. Springer Handbook of Auditory Research. New York: NY: Springer, 1999, 319-362.

[3] Pitcher T J, Partridge B L, Wardle C S. A blind fish can school [J]. Science, 1976, 194(4268): 963-965.

[4] Middlemiss K L, Cook D G, Jerrett A R, et al. Morphology and hydro-sensory role of superficial neuromasts in schooling behaviour of yellow-eyed mullet (Aldrichetta forsteri) [J]. Journal of Comparative Physiology A-Neuroethology Sensory Neural and Behavioral Physiology, 2017, 203(10): 807-817.

[5] Coombs S, Patton P. Lateral line stimulation patterns and prey orienting behavior in the Lake Michigan mottled sculpin (Cottus bairdi) [J]. Journal of Comparative Physiology A-Neuroethology Sensory Neural and Behavioral Physiology, 2009, 195(3): 279-297.

[6] Schwalbe M A B, Bassett D K, Webb J F. Feeding in the dark: Lateral-line-mediated prey detection in the peacock cichlid, Aulonocara stuartgranti [J]. Journal of Experimental Biology, 2012, 215(12): 2060-2071.

[7] Loyda E, Oliveb C, Stahla B A, et al. Evolutionary shift towards lateral line dependent prey capture behavior in the blind Mexican cavefish [J]. Developmental Biology, 2018, 441(2): 328-337.

[8] Butler J M, Maruska K P. The mechanosensory lateral line is used to assess opponents and mediate aggressive behaviors during territorial interactions in an African cichlid fish [J]. Journal of Experimental Biology, 2015, 218(20): 3284-3294.

[9] Butler J M, Maruska K P. The mechanosensory lateral line system mediates activation of socially-relevant brain regions during territorial interactions [J]. Frontiers in Behavioral Neuroscience, 2016, 10: 93.

[10] Baker C F, Montgomery J C. The sensory basis of rheotaxis in the blind mexican cave fish, Astyanax fasciatus [J]. Journal of Comparative Physiology A - Neuroethology Sensory Neural and Behavioral Physiology, 1999, 184(5): 519-527.

[11] Kulpa M, Bak-Coleman J, Coombs S. The lateral line is necessary for blind cavefish rheotaxis in non-uniform flow [J]. Journal of Experimental Biology, 2015, 218(10): 1603-1612.

[12] Montgomery J C, Baker C F, Carton A J. The lateral line can mediate rheotaxis in fish [J]. Nature, 1997, 389(6654): 960-963.

[13] Suli A, Watson G M, Rubel E W, et al. Rheotaxis in larval zebrafish is mediated by lateral line mechanosensory hair cells [J]. PLoS ONE, 2018, 7(2): e29727.

[14] Jiang Y G, Ma Z Q, Zhang D Y. Flow field perception based on the fish lateral line system [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2019, 14(4): 041001.

[15] Flock A, Wersäll J. A study of the orientation of the sensory hairs of the receptor cells in the lateral line organ of fish, with special reference to the function of the receptors [J]. Journal of Cell Biology, 1962, 15(1): 19-27.

[16] Coombs S, vanNetten S. The hydrodynamics and structural mechanics of the lateral line system. // Chadwick R, Lauder G. Fish Biomechanics, Vol. 23, Fish Physiology. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2006, 103-139.

[17] Coombs S, Görner P, Münz H. The mechanosensory lateral line. neurobiology and evolution [M]. New York: Springer Verlag, 1989.

[18] Webb J F. Gross morphology and evolution of the mechanoreceptive lateral-line system in teleost fishes [J]. Brain Behavior and Evolution, 1989, 33(1): 34-53.

[19] Voigt R, Carton A G, Montgomery J C. Responses of anterior lateral line afferent neurones to water flow [J]. Journal of Experimental Biology, 2000, 203(16): 2495-2502.

[20] Yoshizawa M, Goricki S, Soares D, et al. Evolution of a behavioral shift mediated by superficial neuromasts helps cavefish find food in darkness [J]. Current Biology, 2010, 20(18): 1631-1636.

[21] Yoshizawa M, Jeffery W R, van Netten S M, et al. The sensitivity of lateral line receptors and their role in the behavior of Mexican blind cavefish (Astyanax mexicanus) [J]. Journal of Experimental Biology, 2014, 217(6): 886-895.

[22] Jiang Y G, Fu J C, Zhang D Y, et al. Investigation on the lateral line systems of two cavefish: Sinocyclocheilus macrophthalmus and S. microphthalmus (Cypriniformes: Cyprinidae) [J]. Journal of Bionic Engineering, 2016, 13(1): 108-114.

[23] Ma Z Q, Herzog H, Jiang Y G, et al. Exquisite structure of the lateral line system in eyeless cavefishSinocyclocheilus tianlinensis contrast to eyed Sinocyclocheilus macrophthalmus (Cypriniformes: Cyprinidae) [J]. Integrative Zoology, 2020, 15(4): 314-328.

[24] Denton E, Gray J. Mechanical factors in the excitation of the lateral line of fishes. //Atema J, Fay R, Popper A, Tavolga W. Sensory biology of aquatic animals. Springer: New York, 1988: 595-617.

[25] Frederick M H J, Deane R. Determination of the vibration

sensitivity of harbour seal Phoca - vitulina (L) vibrissae [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1986, 100(1-3): 3-9.

[26] Dehnhardt G, Mauck B, Bleckmann H. Seal whiskers detect water movements [J]. Nature: International weekly journal of science, 1998, 394(6690): 235-236.

[27] Dehnhardt G, Mauck B, Hanke W, et al. Hydrodynamic Trail-Following in Harbor Seals (Phoca vitulina) [J]. Science, 2001, 293 (5527): 102-104.

[28] Gläser N, Wieskotten S, Otter C, et al. Hydrodynamic trail following in a California sea lion (Zalophus californianus) [J]. Journal of Comparative Physiology A-Neuroethology Sensory Neural and Behavioral Physiology, 2011, 197 (2): 141-151.

[29] Murphy C T, Reichmuth C, Eberhardt W C, et al. Seal Whiskers Vibrate Over Broad Frequencies During Hydrodynamic Tracking [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 8350.

[30] Schulte-Pelkum N, Wieskotten S, Hanke W, et al. Tracking of biogenic hydrodynamic trails in harbour seals (Phoca vitulina) [J]. The Journal of experimental biology, 2007, 210(5): 781-787.

[31] Marshall C D, Amin H, Kovacs K M, et al. Microstructure and innervation of the mystacial vibrissal follicle-sinus complex in bearded seals, Erignathus barbatus (Pinnipedia: Phocidae) [J]. The anatomical record Part A-Discoveries in molecular cellular and evolutionary biology, 2006, 288A (1): 13-25.

[32] Dykes R W. Afferent fibers frommystacial vibrissae of cats and seals [J]. Journal of neurophysiology, 1975, 38(3): 650-662.

[33] Summarell C C G, Ingole S, Fish F E, et al. Comparative Analysis of the Flexural Stiffness of Pinniped Vibrissae [J]. PLoS ONE, 2015, 10(7): e0127941.

[34] Shatz L F, Groot T D. The Frequency Response of the Vibrissae of Harp Seal, Pagophilus Groenlandicus, to Sound in Air and Water [J]. PLoS ONE, 2013, 8(1): e54876.

[35] Miersch L, Hanke W, Wieskotten S, et al. Flow sensing by pinniped whiskers [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences, 2011, 366(1581): 3077-3084.

[36] Hanke W, Witte M, Miersch L, et al. Harbor seal vibrissa morphology suppresses vortex-induced vibrations [J]. Journal of Experimental Biology, 2010, 213(15): 2665-2672.

[37] Rinehart A, Shyam V, Zhang W. Characterization of seal whisker morphology: implications for whisker-inspired flow control applications [J]. Bioinspiration & biomimetics, 2017, 12(6): 066005.

[38] Beem H R, Triantafyllou M S. Wake-induced 'slaloming' response explains exquisite sensitivity of seal whisker-like sensors [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2015, 783: 306-322.

[39] Bunjevac J, Turk J, Rinehart A, et al. Wake induced by an undulating elephant seal whisker [J]. Journal of Visualization, 2018, 21(4): 597-612.

[40] Soares, D. An ancient sensory organ in crocodilians-Waiting alligators can detect silent ripples in the water even in total darkness [J]. Nature, 2002, 417(6886): 241-242.

[41] Leitch D B, Catania K C. Structure, innervation and response properties of integumentary sensory organs in crocodilians [J]. The Journal of Experimental Biology, 2012, 215(23): 4217-4230.

[42] Di-Poï N, Milinkovitch M C. Crocodylians evolved scattered multi-sensory micro-organs [J]. EvoDevo, 2013, 4: 19.

[43] Kanhere E, Wang N, Kottapallli A G P, et al. Crocodile-inspired dome-shaped pressure receptors for passive hydrodynamic sensing [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2016, 11(5): 056007.

[44] Nadrowski B, Martin P, Jülicher F. Active hair-bundle motility harnesses noise to operate near an optimum of mechanosensitivity [J]. Proceedings of the National Academy of the Sciences of the United States of America, 2004, 101 (33): 12195-12200.

[45] Lachat J, Haag-Wackernagel D. Novel mobbing strategies of a fish population against a sessile annelid predator [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 33187.

[46] Mail M, Klein A, Bleckmann H, et al. A new bioinspired method for pressure and flow sensing based on the underwater air-retaining surface of the backswimmer Notonecta [J]. Beilstein Journal of Nanotechnology, 2018, 9: 3039-3047.

[47] Fan Z F, Chen J, Zou J, et al. Design and fabrication of artificial lateral line flow sensors [J]. Journal of Micromechanics & Microengineering, 2002, 12(5): 655-661.

[48] Pandya S, Yang Y, Jones D L, et al. Multisensor processing algorithms for underwater dipole localization and tracking using MEMS artificial lateral-line sensors [J]. Eurasip Journal on Applied Signal Processing, 2006, SI: 76593.

[49] Kottapalli A G P, Bora M, Asadnia M, et al. Nanofibril scaffold assisted MEMS artificial hydrogel neuromasts for enhanced sensitivity flow sensing [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 19336.

[50] Bora M, Kottapalli A G P, Miao J M, et al. Biomimetic hy-

drogel-CNT network induced enhancement of fluid-structure interactions for ultrasensitive nanosensors [J]. Npg Asia Materials, 2017, 9: e440.

[51] Hu X H, Jiang Y G, Ma Z Q, et al. Bio-inspired Flexible Lateral Line Sensor Based on P(VDF-TrFE)/BTO Nanofiber Mat for Hydrodynamic Perception [J]. Sensors, 2019, 19(24): 5384.

[52] Jiang Y G, Ma Z Q, Fu J C, et al. Development of a flexible artificial lateral line canal system for hydrodynamic pressure detection [J]. Sensors, 2017, 17(6): 1220.

[53] Ma Z Q, Jiang Y G, Wu P, et al. Constriction canal assisted artificial lateral line system for enhanced hydrodynamic pressure sensing [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2019, 14(6): 066004.

[54] Gul J Z, Su K Y, Choi K H. Fully 3D Printed Multi-Material Soft Bio-Inspired Whisker Sensor for Underwater-Induced Vortex Detection [J]. Soft Robotics, 2018, 5(2): 122-132.

[55] Liu Z Y, Qi D P, Leow W R, et al. 3D-Structured Stretchable Strain Sensors for Out-of-Plane Force Detection [J]. Advanced materials, 2018, 30(26): 1707285.

[56] Sengupta D, Trap D, Kottapalli A G P. Piezoresistive Carbon Nanofiber-Based Cilia-Inspired Flow Sensor [J]. Nanomaterials, 2020, 10(2): 211.

[57] Kottapalli A G P, Asadnia M, Hans H, et al. Harbor seal inspired MEMS artificial micro-whisker sensor [C]. 2014 IEEE 27th International Conference on MICRO Electro Mechanical Systems (MEMS), San Francisco, CA, 2014: 741-744.

[58] Zhang X X, Shan X B, Xie T, et al. Harbor seal whisker inspired self-powered piezoelectric sensor for detecting the underwater flow angle of attack and velocity [J]. Measurement, 2021, 172: 108866.

[59] Asadnia M, Kottapalli A G P, Haghighi R, et al. MEMS sensors for assessing flow-related control of an underwater biomimetic robotic stingray [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2015, 10(3): 036008.

[60] De Vries L, Lagor F D, Lei H, et al. Distributed flow estimation and closed-loop control of an underwater vehicle with a multi-modal artificial lateral line [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2015, 10(2): 025002.

[61] Jiang Y G, Gong Z, Yang Z, et al. Underwater source localization using an artificial lateral line system with pressure and flow velocity sensor fusion [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2021: 1-1.

[62] Broadbent H. A CTD Biotag for Mid-sized Marine Predators [J]. Dissertations & Theses Gradworks.

[63] Zhang X X, Beebe T, Jen N, et al. Flexible and waterproof micro-sensors to uncover zebrafish circadian rhythms: The next generation of cardiac monitoring for drug screening [J]. Biosensors & Bioelectronics, 2015, 71: 150-157.

[64] Li H D, Tian C, Lu J, et al. An Energy Harvesting Underwater Acoustic Transmitter for Aquatic Animals [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 33804.

[65] Nassar J M, Khan S M, Velling S J, et al. Compliant lightweight non-invasive standalone "Marine Skin" tagging system [J]. npj Flexible Electronics, 2018, 2(1): 13.

[66] Shaikh S F, Mazo-Mantilla H F, Qaiser N, et al. Environmental Monitoring: Noninvasive Featherlight Wearable Compliant "Marine Skin": Standalone Multisensory System for Deep-Sea Environmental Monitoring [J]. Small, 2019, 15(10): 1804385.