

doi: 10.7690/bgzdh.2013.12.012

人造侧线系统综述

王伟, 仲昆, 谢广明

(北京大学工学院, 北京 100871)

摘要: 侧线系统是水中动物特别是鱼类的重要感知系统, 可以帮助动物有效感知周围的水动态环境信息。在水中机器人, 特别是仿生机器鱼上设计和安装人造侧线系统, 是当前水中机器人研究的新方向和热点。概述了鱼类侧线系统的结构特点和感知原理; 介绍了人造侧线系统的实现原理和的实验研究状况; 分析了人造侧线系统研究存在的一些难点和问题, 并对今后的发展趋势和应用前景进行了展望。

关键词: 水下机器人; 人造侧线系统; 水动态环境感知; 仿生技术

中图分类号: TJ242.6 **文献标志码:** A

Survey of Artificial Lateral Line Systems

Wang Wei, Zhong Kun, Xie Guangming

(College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Lateral line systems are important sensing systems for underwater animals, especially for fish, which help the animal sense the surrounding hydrodynamic environment information effectively. Designing and installing artificial lateral line systems on underwater robots, especially on bionic robotic fish are now a novel direction and focus of underwater robotics. In this paper, we first introduce the structural characteristics and the sensing principles of fish lateral line system in nature. Then, we introduce the artificial lateral line systems including the realization principle and experimental research results. Finally, some difficulty and problems of artificial lateral line systems are analyzed and the direction of future development and application prospect are discussed.

Key words: underwater robot; artificial lateral line systems; hydrodynamic environment sensing; bionic technology

0 引言

由于水对光能的选择性吸收, 悬浮物遮挡及光线折射等因素, 会造成水下成像扭曲, 在没有光照的夜晚或者深海区域, 水下环境更是漆黑一片, 这些原因导致生物视觉部分或者全部丧失作用。大量学者对鱼类等生物如何在这种环境下正常生存, 避开障碍物的遮挡, 完成其各种姿势的游动进行研究, 鱼类的侧线系统也随之被发现。侧线系统是鱼类和水生两栖类动物特有的感觉器官, 与其捕食、避敌、群游、生殖等行为密切相关^[1-3]。鱼类依靠侧线系统感觉周围水动力特征, 获取水流运动信息。神经丘是构成鱼类侧线系统的基础。对侧线系统的研究开始于17世纪Stenonis对侧线管道的观察, 直到1884年神经丘正式定名并沿用至今^[4]。此后, 学者们对侧线器官的结构功能和神经支配等展开了较为细致的研究。其中国外学者对侧线系统的研究已较为深入^[5-7], 包括侧线系统的组成分布以及功能描述。

世界上第一条仿真机器鱼——仿生金枪鱼RoboTuna^[8]于1994年由MIT成功研制。此后, 不

同式样、不同功能的仿生机器鱼样机相继被研制出来。早期研制的机器鱼都以鱼尾推进的鱼类为研究模型, 并未在机器鱼上安装传感器, 因而只能实现游动机理, 不能对周围环境进行感知和监测。基于仿生启发来设计人造侧线系统, 可以使机器鱼或水下航行器等能像鱼类一样感知和获取环境信息, 快速准确地做出反应。然而, 模仿鱼类侧线非常困难, 存在信息感知、机械设计、安装布局、建模控制等诸多问题, 如何将生物学上侧线系统的研究成果成功地运用到实践之中, 综合侧线理论机制和机器人技术的发展来设计人造侧线系统, 是近些年科研人员研究的一个重点和难点。基于此, 笔者对鱼类侧线系统进行仿生性研究, 并对人造侧线系统存在的一些问题进行分析。

1 鱼类侧线系统的结构及其特点

对鱼类侧线系统生物学的研究是人造侧线仿生和设计的基础。鱼类的侧线系统由体表神经丘与侧线管神经丘组成, 这2种神经丘都是由感觉细胞来感受水流产生的刺激, 由于分布位置不同以及感觉

收稿日期: 2013-07-15; 修回日期: 2013-10-07

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(10972003); 广西汽车零部件先进设计制造重点实验室开放基金重点项目(2012KFZD03)

作者简介: 王伟(1987—), 男, 河北人, 在读博士, 从事智能机器人研究。

细胞数量和形态上的差异，导致了 2 种神经丘有不同的功用^[9]。

侧线系统对水流方向和强度的感知主要由位于体表的纤毛细胞来实现，其对位移敏感，响应低频直流分量，相当于位移传感器。当水流和鱼体表面发生相对运动时，位于体表的纤毛细胞产生倾斜，引起纤毛细胞下面的神经元产生神经冲动：纤毛束倒向动纤毛一侧，细胞产生刺激，若是纤毛束倒向静纤毛一侧，则细胞抑制刺激^[10]。这些神经冲动由神经末梢传递到大脑神经中枢，因而对水流产生了感觉。图 1 为体表纤毛细胞作用示意图。

侧线管神经丘位于鱼类的表皮下的侧线管中，对加速度敏感，响应高频分量，能感觉压力梯度，相当于压力梯度传感器。侧线管神经丘位于皮下充满黏液的管道中，并通过一些小孔与外界水环境相通^[11]。如图 2(a)所示。相邻小孔之间存在流速梯度时，会产生压力差，导致侧线管内液体运动，触动

神经丘突起上的感觉毛，从而产生神经冲动，最后通过神经网络传输到神经中枢，因而侧线管神经丘能够对压力产生感觉，如图 2(b)所示。此外，侧线管神经丘对空间内的非均匀流有反应，在静止与流动的水流中都能对震动产生感觉。由神经丘组成的侧线系统能够接受不同方向的各种刺激，使得鱼类能够获取周围水环境中足够的信息，从而对水流产生感觉^[12]。

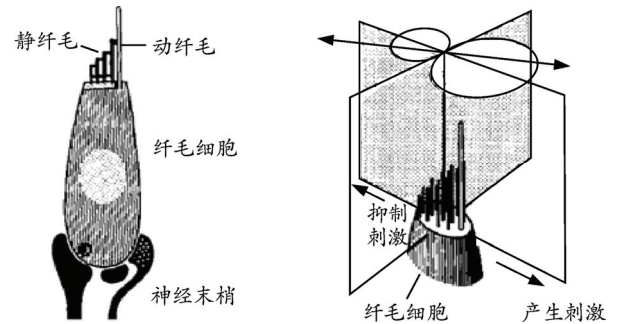
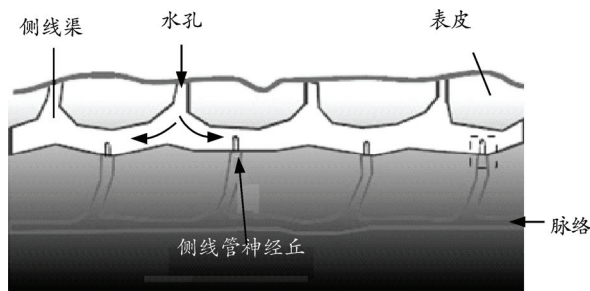
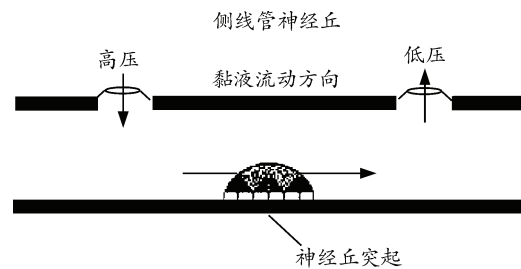


图 1 感知细胞及其感知作用示意图^[10]



(a) 侧线管机构^[13]



(b) 压强差感知作用^[10]

图 2 侧线管神经丘及其感知作用示意图

基于侧线系统的生物学功能及特点，研究人员着手人造侧线系统的设计和研发，各种微型流速传感器被设计出来用来感知水流作用^[14-15]。基于鱼类侧线系统组成结构特点，人造侧线系统主要基于传感器进行设计，主要有 2 种途径和方式：基于人造纤毛感知器的人造侧线系统和基于压强传感器阵列的人造侧线系统。前者主要是利用位于体表的神经丘感知水流运动的原理，设计出的人造纤毛感知器，从而构成人造侧线系统；后者则是利用位于表皮下侧线管神经丘感知压强梯度的原理，利用压强传感器阵列来实现其功能，构成人造侧线系统。

2 人造侧线感知器的设计及实现

2.1 人造纤毛感知器

鱼类通过神经元的偏移来感知外界刺激，并以电流的形式进行传递，是一个集机械和电场的生物

过程。而大多传感器的工作原理与之相似，是通过一种物理特性发生改变，导致另外一种物理特性发生变化的过程。结合鱼类表皮神经丘感知特点，研究人员设计出一种微机械分布的人造纤毛流体感知器，用以感知水流的速度和强度。这种传感器一般都具有显微机械工艺，体积极小，集成密度高，多采用特殊材料如环氧树脂材料制作而成。人造纤毛感知器工作原理大都相通，结构上通常由一个刚性的硅质悬臂梁固定在感知器末端，来充当神经纤毛束，压力应变片水平固定在悬臂基座上，一端与悬臂梁相连接，另一端与检测电路相连接，如图 3 所示。当水流流经感知器表面时，带动悬臂梁发生倾斜，带动与之相连的压力应变片发生形变。压力应变片发生形变会导致电阻发生变化，最终通过检测电路检测，从而确定悬臂梁的倾斜情况，来实现对流体流动方向和强度的感知。

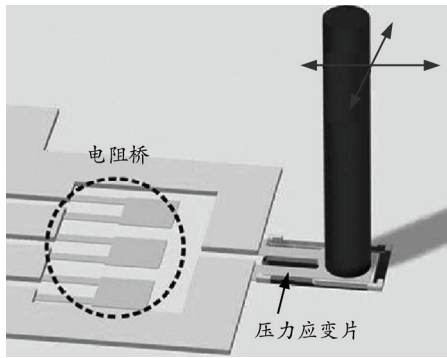


图 3 人造纤毛感知器^[15]

Fred Delcomyn 从鱼类侧线得到启发, 研制出基于微型机械分布式流体传感器的鱼类侧线感知器^[13]。感知器基于显微结构, 具备一定的感知能力, 但只是在理论上分析了构成侧线系统的可行性, 并未在实验中验证其对水流的感知作用。Craig Tucker 模拟研制出一种仿生人造纤毛细胞感知器 (AHC)^[15], 并在稳态层流和振荡流里进行了实验, 能够感知流体流速。然而只是利用单个 AHC 进行了实验, 未能对构成侧线系统进行研究。Chang Liu^[16]概述了人造纤毛感知器的构成方式和表现性能。

2.2 基于压强传感器的侧线感知器

侧线管神经丘通过压强差来感知压强梯度。基于这个原理, 研究人员利用压强传感器作为感知部分, 直接测量出水流的压强大小, 模拟侧线感知系统来得到周围流体信息。压强传感器多采用 MEMS 气压计, 这种传感器体积小, 功耗低, 满足大批量安装使用的要求。高采样速率, 使其具有高反应速率, 能实时感知流体的动态变化。Erik Stegman 等^[17]运用压强传感器来评估作用在水下航行器上的流体水动力, 通过附加信息来简化建模过程和提高航行器水下勘探和环境监测等任务的控制精度, 并通过建模和算法推导, 得到水动力压力感知评估关系。Roberto 等^[18]运用压强传感器按固定间隔安装组成阵列来模拟鱼体侧线系统, 能对均流和卡门涡街进行区分, 多个传感器的共同使用, 能够在一定程度上感知水流特征如漩涡脱落频率和漩涡流动速度。

2 种形式的感知器体积小, 精度较高, 能大量安装构成侧线阵列。并且都具备流体感知能力, 获得流体速度和方向信息。然而作为水下感知系统, 最主要考虑的是防水问题, 小体积更是加大了水密性的难度。水下环境变化快, 对感知器的反应速度有较高的要求才能满足对流体变化的实时信息采集

与更新。并且研究设计出侧线感知器最终目标是为了构建人造侧线系统, 实现侧线系统对环境感知的研究, 为水下机器人扩展水下感知方式, 向着更高的自主性和智能化进步^[19]。

3 人造侧线系统环境感知研究

人造侧线系统的实现, 给流体特性的研究提供了一种新的感知途径, 使得水下航行器等能获得像鱼一样的感知能力。鱼类在漆黑的环境下利用侧线系统感知障碍物的位置, 避开障碍物进行捕食和避敌。人造侧线系统具有水下定位能力, 能感知周围动态物体的位置。Xiaobo Tan^[20-22]利用 IPMC (离子聚合物金属复合材料) 传感器阵列固定在圆柱体上模拟侧线系统, 用来定位水下振荡偶极子的位置。Douglas L Jones 利用仿生人造纤毛细胞感知器 (BN) 组成阵列覆盖在一个圆柱体周围, 来设计人造侧线装置用于开发水下定位能力^[23]。测线装置主要由一个圆柱体上安装 15 个 BN 来组成, 其中 9 个沿着圆柱体的轴线间隔 30 mm 放置, 6 个沿着圆柱体的横截面间隔 30° 放置。通过这个实验装置模拟鱼类侧线系统进行了实验: 将人造偶极子振动源和野生小龙虾分别放置到侧线装置的周围进行定位实验。经过实验和算法处理, 最终能大致感知到动态障碍物的位置, 误差在 0.13 倍体长内。Douglas L Jones 的人造侧线定位研究能在装置固定的情况下对周围障碍物进行定位, 并能达到一定精度, 在侧线感知研究取得了一个重大突破, 开创了一种新的定位思维和方法。但是由于其实验装置只是简单地通过仿生感知器的排列进行实验, 并没有按照真实鱼类侧线的位置来进行感知器的安装排列, 并且在实验过程中侧线装置是固定不动的, 未能达到真鱼一样的游动避障, 仿生性上有待提高。

Maarja Kruusmaa^[24]通过压强传感器在机器鱼上面的排列安装构成人造侧线系统, 如图 4 所示, 来感知流体特性, 并通过感知到的信息来实现机器鱼相对于流体的运动控制。Maarja 首次将人造侧线系统运用于机器鱼上面, 通过侧线系统对均流和周期性扰动进行了鉴别和区分, 测量出流体的流速, 控制机器鱼游动方向在稳流中与流体流向保持平行, 并且在流体中, 使机器鱼尾随物体, 通过侧线系统感知扰动, 控制机器鱼游动在流体减少区域, 来减少能量消耗, 提供游动效率。

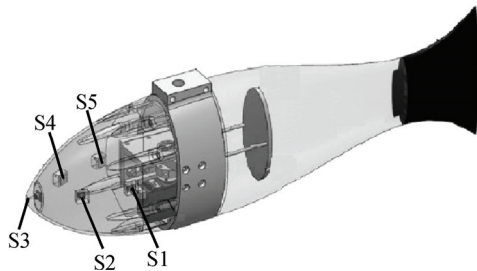


图4 Maarja 装载人造侧线的机器鱼(S1~S5 压强传感器)

4 人造侧线系统难点问题

综上所述可以看出,关于人造侧线系统的研究多集中在感知器的设计和侧线系统的构造,虽然取得了一定的进展,但是离真实鱼类侧线还有很大差距,稳定性、精确性需要进一步保证。要研制出功能更加强大的人造侧线,实现趋流性,避障,完美模仿鱼类游动还有很多难点问题需要克服:

1) 人造侧线系统安装位置。研究人员关于侧线的安装和位置的分布,多是固定在一个长的圆柱形装置上,其位置摆放没有太多的理论依据。生物体在长期的进化历程中获得了精细的身体结构和巧妙的神经控制来与环境相适应,其侧线系统位置的分布是经过选择淘汰而最终确定的,能够完美感知流体环境变化。人造侧线系统的分布应该基于生物学侧线系统位置来决定,基于仿生学原理,能最大程度发挥生物适应环境的优势。同时,在确定侧线分布后应进行大量实验,通过数据分析来确定各个感知器的距离和摆放的方向。将理论和实际相结合,最终确定人造侧线的安装位置。

2) 完整意义上侧线系统的实现。针对人造侧线系统的研究,研究人员只是实现了鱼类侧线系统的一部分功能:体表神经纤毛的仿生或者侧线管的仿生。单一的仿生侧线系统在一定意义上对环境进行了感知,能够获取部分周围环境信息,但并没有达到鱼类那么完美。完整意义上的侧线系统实现应该包括体表感知器和侧线管感知器,两者相结合,能够实现对流体方向和水下深度的感知,既能获得流体信息,又能得到自身在流体环境中位姿信息。

3) 信息处理与融合。水下生物通过多种感官感知外界环境及自身信息,并将信息进行融合,对采取的运动模态进行决策。人造侧线系统通过感知器对环境进行感知,获得大量的测量数据,对数据进行处理与融合,提取有用的信息如流体方向与速度、自身位置信息、障碍物探测、水中深度等,利用这些信息及时对机器人进行反馈,控制机器人对运动

参数做出调整,实现更高效率的运动。

除了上述问题,人造侧线系统还有一些技术性问题,如信息的采集与传输、感知器的密封性与防水、控制算法的选取、电源的供电等。工作环境的特殊性还带来了驱动、材料等相关问题。如何解决这些问题,使信息感知、数据处理、控制等各个模块有机地整合在一个合理的框架内,保证系统的可靠,是制约人造侧线系统发展的关键问题。

5 总结

随着科学技术的发展,材料学、仿生学、控制理论、机械设计与制作,以及低成本、低功耗的计算机发展将促使人造侧线系统的快速稳定发展,其感知能力将愈加强大。人造侧线系统在水下机器人的运用,将使得机器人向着更高的自主化与智能化发展,具有类似真鱼般的感知能力,使其能更好地运用于军事、搜救、航海和环境监测过程中。可以预见,在不久的将来,人造侧线系统将具有更加广阔的发展和应用前景。

参考文献:

- [1] Webb J F. Gross morphology and evolution of the mechanoreceptive lateral-line system in teleost fishes[J]. *Brain BehavEvol*, 1989(33): 34-53.
- [2] Bodanick D, Northcutt G R. Electroreception in lampreys: evidence that the earliest vertebrates were electroreceptive Science[J]. 1981, 212: 465-467.
- [3] Melissa A G. Lateral line receptors: where do they come from developmentally and where is out research going. *Brain[J]. Behavior and Evolution*, 2004, 64: 163-181.
- [4] 杨国华,程红,付宏兰,等. 中国大鲵机械感受器的超微结构[J]. *动物学报*, 2001, 47(5): 587-592.
- [5] Schlessor G. Development and evolution of lateral line placodes in amphibians I[J]. *Development. Zoology*, 2002, 105(2): 119-146.
- [6] Schlessor G. Development and evolution of lateral line placodes in amphibians II[J]. *Evolutionary diversification. Zoology*, 2002, 105(3): 177-193.
- [7] Germanà A, Abbate F, Guerrera M, et al. S100 expression in the lateral line system of zebra fish from juvenile to adult stages[J]. *Anatomia Histologia Embryohigia*, 2005, 34: 16.
- [8] Triantafyllou M. S., Triantafyllou G. S. An efficient swimming machine[J]. *Scientific American*, 1995, 272(3): 64-71.
- [9] Maruska K P. Morphology of the mechanosensory lateral line system in elasmobranch fishes: ecological and behavioral considerations[J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2001, 60(1): 47-75.