

doi: 10.7690/bgzd.2015.05.023

基于人工侧线系统的机器鱼游动模态感知研究

李 渊^{1,2}, 王 伟², 罗文广¹, 谢广明²

(1. 广西科技大学电气与信息工程学院, 广西 柳州 545006; 2. 北京大学工学院, 北京 100871)

摘要: 针对水下机器人面临着感知周围水环境信息的困难的问题, 在自主式机器鱼上设计一种人工侧线系统。首先介绍了自主式机器鱼及其人工侧线系统, 其次通过改变中枢模式发生器(central pattern generator, CPG)的运动控制参数决定机器鱼的游动模态, 最后通过人工侧线系统得到机器鱼在向前、左转右转和上升下潜时的压强变化。分析结果表明: 该套人工侧线系统设计能有效的感知水流信息, 为水下机器人提供了一种感知游动模态的新办法。

关键词: 人工侧线系统; 机器鱼; 游动模态感知

中图分类号: TP242.3 **文献标志码:** A

Study on Swimming Modes Sensing of Robotic Fish Based on Artificial Lateral Line System

Li Yuan^{1,2}, Wang Wei², Luo Wenguang¹, Xie Guangming²

(1. College of Electric & Information Engineering, Guangxi University of Science & Technology, Liuzhou 545006, China;

2. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Aiming at underwater robots face difficult problem of sensing the surrounding hydrodynamic environment, this article design the artificial lateral line system for the robotic fish. We first introduce the robotic fish and its artificial lateral line system, then the robotic fish' swimming modes are decided by changing motion control parameters of central pattern generator, finally we record the pressure changes by the artificial lateral line system when the robotic fish executes different swimming modes(forward, turn left, turn right, rise, dive). Analysis results prove that the artificial lateral line system has the ability of sensing the flow information, and become a new way of sensing the swimming mode for underwater robots.

Keywords: artificial lateral line system; robotic fish; swimming mode sensing

0 引言

大部分鱼类和水生物在水下无光照等恶劣的环境下都能用侧线系统作为主要的感知器官来探测周围的环境。一个侧线系统包含很多纤毛感知细胞, 也叫神经丘^[1]。每个神经丘都包含多束感知纤毛, 这些神经丘可以分为 2 种: 体表神经丘和侧线管神经丘^[2]。

体表神经丘主要分布在鱼类体表。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, 因而对水流产生了感觉^[3]。

侧线管神经丘位于鱼类的表皮下的侧线管中。其对加速度敏感, 响应高频分量, 能感觉压力梯度, 相当于压力梯度传感器。相邻小孔之间存在流速梯度时, 会产生压力差, 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^[4]。侧线系统可以让水生物探测周围感兴趣的物体并且可以描绘出周围水环境的情况, 特别是在距离水生物一到两倍体长的范围内。正因为侧线系统优越的水环境感知能力, 水生物很多行为习惯都与侧线系统有直接关系, 例如捕食者和食物探测^[5-7]、群居行为^[8]、趋流性^[9]、交配行为和物种交流^[10-12]等。另外侧线系统也可以对水生物行为进行定量分析, 有些学者研究了信息是怎样在神经系统中编码和译码的。

人造水下机器人目前主要依靠超声波和视觉图像感知周围水环境信息。通常水下航行器是通过多普勒分析仪来感知水流信息。多普勒分析仪能测量全局水流速度, 同时它的数值会被用到导航系统里面来补偿漂移^[13-14]。相对于水生物高密度分布的侧线系统, 多普勒分析仪不能探测局部水流。同时多普勒分析仪相当昂贵, 笨重的仪器还需要耗费大量的能量, 不适合小型水下机器人使用。

收稿日期: 2015-02-05; 修回日期: 2015-03-16

基金项目: 广西教育厅重点科研项目(ZD2014073)

作者简介: 李 渊(1990—), 男, 湖北人, 硕士, 从事智能机器人研究。

一些应急应用方案需要小型高效自主的水下机器人来完成任务。例如管道探测, 遇难船营救以及海港监控等情况。在这些情况下, 往往视觉信息和超声波信息都无法使用, 然而小型水下机器人可以通过周围水环境信息轻松规划出他们前行的路线。因此, 水生物侧线系统给了科学家灵感, 激发科学家去通过工程手段研制水下机器人。其中最主要的挑战是水环境的不稳定性, 高信号噪声和具有高分辨率和低噪声水平的传感器缺乏。目前, 研究人员正在研制人工侧线传感器并构造人造侧线系统, 这些传感器包括热线传感器、电容器、光电传感器和IPMC传感器等^[15-20]。模仿鱼类侧线系统并不是一件容易的事, 存在信息感知、机械设计、安装布局和建模控制等诸多问题。如何将生物学上的侧线系统成功运用到实践中, 综合侧线理论机制和机器人技术的发展, 设计出人工侧线系统, 是近些年科研人员研究的一个重点和难点。基于此, 笔者为自主式机器鱼设计了人工侧线系统, 并探讨自主式机器鱼游动模态下的周围水环境压强变化规律。

1 实验设置

1.1 机器鱼

如图1所示, 这条机器鱼模仿自然界中黄色斑点盒子鱼的几何外形和游动模式, 并且拥有流线型的鱼体, 一对胸鳍和一个尾鳍。机器鱼游动是通过尾鳍和胸鳍提供推进力, 所以机器鱼可以执行多个游动模态, 例如前向运动、左转运动、右转运动、上升运动和下降运动。机器鱼游动是通过尾鳍和胸鳍。由于正弦信号能产生平滑摆动运动并且允许灵活调试器控制参数, 所以笔者选用正弦信号作为控制信号提供给伺服舵机。



(a) 自然界盒子鱼

(b) 机器鱼

图1 机器鱼的模仿外形

为了能使自主式机器鱼产生多个游动模态并能自如切换模态, 笔者引进了一种新型运动控制算法——中枢模式发生器(central pattern generator,

CPG), 希望这种 CPG 模型具有鲁棒性并且能在机器鱼在外界短暂的小干扰下迅速达到稳定状态。为了达到这个目的, 笔者设计耦合神经振荡器如下:

$$\ddot{\alpha}_i = \alpha(\alpha(A_i - a_i) - 2\dot{\alpha}_i) \quad (1)$$

$$\ddot{x}_i = \beta(\beta(X_i - x_i) - 2\dot{x}_i) \quad (2)$$

$$\ddot{\phi}_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N \mu_{ij} (\mu_{ij} a_j (\phi_j - \phi_i) - 2(\dot{\phi}_i - 2\pi f_i)) \quad (3)$$

$$\theta_i = x_i + a_i \cos \phi_i \quad (4)$$

其中: α_i 、 x_i 、 ϕ_i 分别代表着第 i 振荡器振幅, 偏移角和相位。变量 θ_i 代表着整个振荡器的输出, 也就是最后伺服舵机执行摆动角度。参数 f_i 、 A_i 、 X_i 是振荡器理想振幅, 偏移角和相位的控制参数。耦合权重 μ_{ij} 决定了振荡器之间的耦合作用。 α 和 β 是不变的正数比。可以注意到, f_i 会逐渐收敛到相同的频率, 原因是振荡器之间的耦合作用会有不同的内在频率。因此笔者在实验过程设置所有振荡器频率相同。故胸鳍和尾鳍控制参数 a_i 、 x_i 、 f_i 可以影响到推进力的方向, 而相位差则被用来匹配各个伺服舵机的运动, 使自主式机器鱼产生多样游动模态。

自主式机器鱼是以一种卡片形状的微计算机树莓派(Raspberry Pi)作为自己的主控制器。它拥有博通片上系统 BCM2835, 包括 ARM1176JZF-S 700 Hz 的处理器。这个机器鱼被 Linux 系统控制自主运行。机器鱼的各种状态(电量质量, CPU 温度, 内部湿度等)都能通过无线网络被窗口系统监控。此外, 一款廉价的迷你型像素点 130 W 像素的摄像头被用来记录水下图像。摄像头成像最大的尺寸是 1 024×768, 可以满足低性能过程下实时性的要求。机器鱼还装备了惯性导航模块 IMU, 包括了三轴加速度计, 三轴陀螺仪和电子罗盘, 能提供偏航角、翻滚角、俯仰角和三轴加速度等实验数据。

1.2 侧线系统设计与压力传感器

如图2所示, 盒子鱼的侧线系统^[21]组成仅仅是分布在鱼体外的表面神经丘, 这些表面神经丘不是封闭在普通的管道里面。整个侧线系统包括眼眶上侧线(supraorbital line, SOL), 眼眶下侧线(infraorbital line, IOL), 耳部侧线(otic line, OTL), 耳后侧线(postotic line, POL), 上颞骨侧线(supratemporal line, STL), 躯干侧线(trunk line, TRL)和背部躯干侧线(dorsal trunk line, DTL)。结合机器鱼机械结构特点通过9个选好的压力传感器去模拟 IOL 和 TRL, 从而构成一套人工侧线系统。

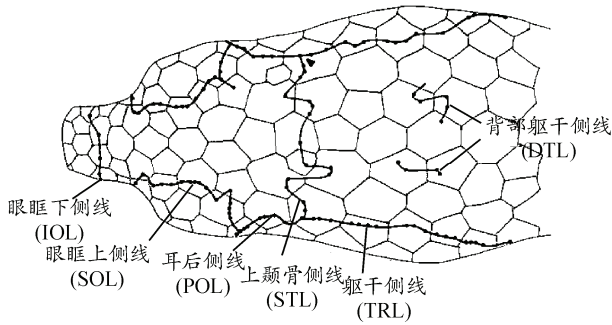


图 2 盒子鱼侧线系统

为了让自主式机器鱼具有跟真鱼一样的压强感知能力，笔者根据自然界盒子鱼的侧线系统分布特点给自主式机器鱼装备了一套新颖的人工侧线系统，并选用压力传感器列阵作为机器鱼的感知机构。如图 3 所示，这种新颖的人工侧线系统是由 9 个压力传感器组成。P₁、P₂和 P₃分布在机器鱼头部模拟箱鲀鱼 IOL。P₄、P₅和 P₆分布鱼体左边，P₇、P₈和 P₉分布在鱼体右边，他们对称的分布在机器鱼两侧来模拟箱鲀鱼 TRL。这些传感器组成了人工侧线系统可以来感知周围水环境信息，提供了一种新型的水下感知机构。

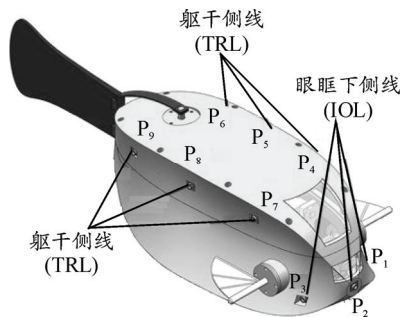


图 3 机器鱼侧线系统

因此压力传感器^[21]和侧线系统采集电路被设计去实现机器鱼在线感知能力。笔者挑选商用型防水压力传感器 CPS131 作为单个感知单元。这些压力传感器是高品质电容式的绝对压强传感器，其分辨率在 0.1 Pa 左右。0.1 Pa 分辨率很低特别是在探测微波水环境刺激的情况下，压强测量的范围为 30~120 kPa，它集成了温度补偿器和 A/D 转换，最终输出数字压强值。从各个压力传感器读取的压强信号都会进行温度补偿确保精度。经过温度补偿和 A/D 转换会被发送到 STM32 处理器中进行处理。在微处理器 STM32 的作用下，采集电路会以 40 Hz 的频率对压强信号采样。

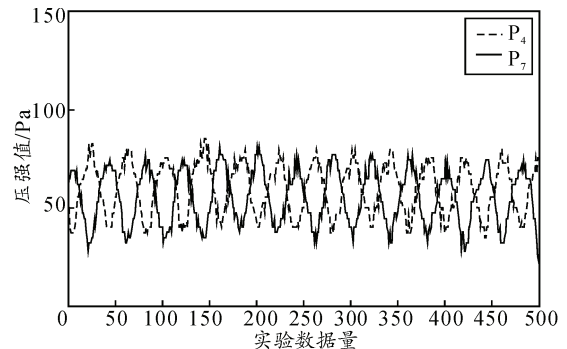
在实验前，笔者针对水深、温度等等因素对压力传感器进行测试，发现温度深度对其数据读取影

响很大。为了减小这些影响，每个实验执行时间会被限制在很短时间范围内，并保持各个时间的间隙时间长度。关于深度的影响，笔者会对机器鱼进行机械配平，确保其在实验水池内进行各种模态运动。

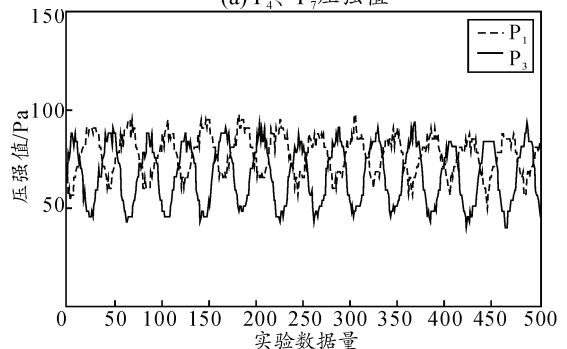
2 机器鱼在不同模态下的周围压强特征

2.1 机器鱼做前向运动时压强变化

笔者通过改变 CPG 运动控制参数(a_i, x_i, ϕ_i)使机器鱼做前向运动。当机器鱼在前向运动模式下游动时，笔者将人造侧线系统感知压强信息传送到上位机进行数值分析。如图 4 所示，显示了 4 个压力传感器(P₁, P₃, P₄, P₇)在前向运动下压强数据信息。这里 4 个压力传感器是对称分布在机器鱼两侧，通过机器鱼游动模态数据比较可以知道机器鱼对称两点水环境压强数据也是对称交替呈现的，整体趋势是左右两点相同，其中数据虚线代表左侧数压力传感器，数据实线代表右侧压力传感器。其中，单个压力传感器的数值变化呈现类正弦曲线分布主要是因为机器鱼在运动的时候，机器鱼头部会产生摆动运动，当机器鱼头部运动到极限位置时，压力传感器数值会出现在波峰的位置。当然，数据中会出现压强数据变大的现象，主要是因为机器鱼水深变化带来的影响，多以此时压强值大于其他时刻的压强值，不得不说水深变化对压强值变化影响很大。



(a) P₄、P₇压强值



(b) P₁、P₃压强值

图 4 前向运动的压强特征

2.2 机器鱼做左转右转运动时压强变化

当机器鱼在转弯模式下，机器鱼两侧运动的路径不同。左转模式下，右侧运动路径大于左侧运动路径。右转模式下，左侧运动路径大于右侧运动路径。这样两侧的压力传感器会呈现不同的特征。如图5和图6所示，笔者选取对称点 P_4 、 P_7 的实验数据来说明模态信息，其中 P_4 代表机器鱼左侧压力传感器列阵的数值，用数据虚线呈现； P_7 代表机器鱼右侧压力传感器列阵的数值，用数据实线呈现。笔者通过机器鱼对称位置的传感器的数据来描述转弯过程周围水环境压强特征。通过图5可以看出：当机器鱼做右转运动时，鱼身右边压强值大于鱼身左边压强值。相似的结果如图6，当机器鱼做左转运动时，鱼身左边压强值大于鱼身右边压强值。

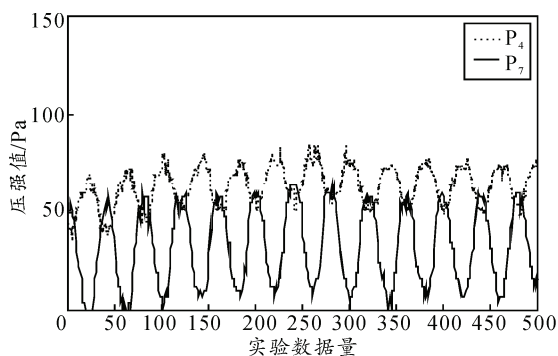


图5 右转运动的压强特征

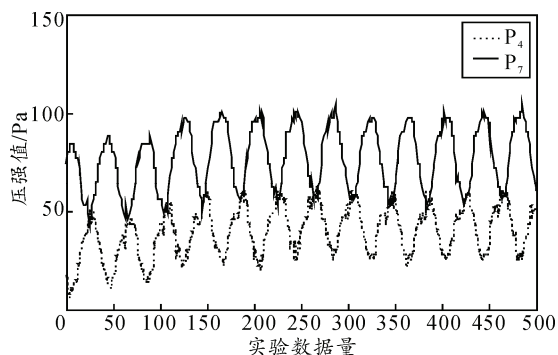


图6 左转运动的压强特征

2.3 机器鱼进行上升下潜运动时压强变化

当机器鱼进行上升运动和下降运动时，机器鱼在实验水池里的深度时刻在变。如图7显示机器鱼在进行上升运动和下降运动时，每个压力传感器的读数变化。在整个运动过程中，曲线上升表示机器鱼在做下潜运动，曲线下降表示机器鱼在进行上升运动，并且对称点上压力传感器读数变化一致。明显可以看到上升曲线的斜率大于下降曲线的斜率，这是因为整个过程上升过程除了胸鳍提供的推力外

还收到自身浮力的作用，从而上升速度比下降速度快，因此才有相应的压强数据规律。正如笔者前面所说，机器鱼在做前向运动时，周围水环境压强会有微弱的变化，但在这里水深变化给压力传感器带来的变化远远大于自身运动带来的压强变化，所以通过水深水压的变化就能很好地说明上升运动和下降运动。

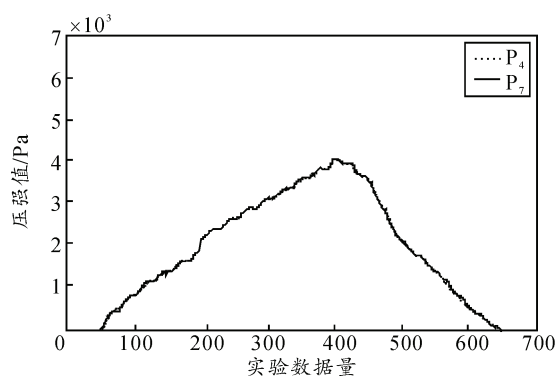


图7 上升下潜运动的压强特征

凭借机器鱼周围水环境压强信息，人工侧线系统能测量和显示机器鱼在不同游动模态下的水环境压强信息。基于压力传感器的人造侧线系统能有效的感知水流信息，充分说明了这套人工侧线系统设计的有效性和合理性。

3 总结

笔者根据自然界盒子鱼侧线系统分布特点和神经丘的工作原理，设计了一套基于压力传感器的人工侧线系统。通过新设计的人工侧线系统可以感知机器鱼在不同模态下周围水环境的压强分布关系并做定性分析，为水下机器人提供了一种感知周围水环境信息的新办法。将来，笔者也希望使用人工侧线系统对机器鱼游动特性进行定量分析，例如机器鱼游速与压强的关系，从而丰富机器鱼的控制策略。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Bleckmann H. 3-D-orientation with the octavolateralis system[J]. Journal of Physiology-Paris, 2004, 98(13): 53-65.
- [4] Münz H. Morphology and innervation of the lateral line system in *Sarotherodon niloticus* L. (Cichlidae, Teleostei)[J]. Zoomorphol, 1979, 93: 73-86.

- [5] Montgomery J C, Macdonald J. A. Sensory tuning of lateral line receptors in Antarctic fish to the movements of planktonic prey[J]. *Science*, 1987, 235(4785): 195-196.
- [6] Pohlmann K, Atema J, Breithaupt T. The importance of the lateral line in nocturnal predation of piscivorous catfish[J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2004, 207(17): 2971-2978.
- [7] Coombs S, Braun C B, Donovan B. The orienting response of Lake Michigan mottled sculpin is mediated by canal neuromasts[J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2001, 204(2): 337-348.
- [8] Pitcher T J, Partridge B L, Wardle C S. A blind fish can school[J]. *Science*, 1976, 194(4268): 963-965.
- [9] Montgomery J C, Baker C F, Carton A G. The lateral line can mediate rheotaxis in fish[J]. *Nature*, 1997, 389(6654): 960-963.
- [10] Webb J F. Gross morphology and evolution of the mechanoreceptive lateral-line system in teleost fishes[J]. *Brain Behavior and Evolution*, 1989, 33(1): 34-43.
- [11] Bodanick D, Northcutt G R. Electroreception in lampreys: evidence that the earliest vertebrates were electroreceptive[J]. *Science*, 1981, 212(4493): 465-467.
- [12] Melissa A G. Lateral line receptors: where do they come from developmentally and where is out research going[J]. *Brain Behavior and Evolution*, 2004, 64(3): 163-181.
- [13] Atanway JM. 2010 Water Profile Navigation with an Acoustic Doppler Current Profiler[C]. In OCEANS 2010 IEEE, Sydney, Australia, New York, NY: Institute of Electrical and Electronic Engineers, 2010: 1-5.
- [14] Medagoda L, Williams SB, Pizarro O, Jakuba MV. 2011 Water column current aided localization for significant horizontal trajectories with Autonomous Underwater Vehicles[C]. In OCEANS 2011 IEEE, Sydney, Australia, New York, NY: Institute of Electrical and Electronic Engineers, 2010: 1-5.
- [15] Liu P, Zhu R, Que R. A Flexible Flow Sensor System and Its Characteristics for Fluid Mechanics Measurements[C]. *Sensors*, 2009.
- [16] Chen Nannan, Craig Tucker, Jonathan M. Engel, Member, IEEE, Yingchen Yang, Saunvit Pandya, and Chang Liu. Design and Characterization of Artificial Haircell Sensor for Flow Sensing With Ultrahigh Velocity and Angular Sensitivity[J]. *Journal of Microelectro Mechanical Systems*, 2007, 16(5): 999-1014.
- [17] Liu Chang. Micromachined biomimetic artificial haircell sensors[D]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2007.
- [18] Xu Yiming, Erik Stegman, Bobby Hodgkinson, et al. Lateral Line Inspired Hydrodynamic Force Estimation for Autonomous Underwater Vehicle Control[C]. Preprint submitted to 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2012.
- [19] Roberto Venturelli, Otar Akanyeti, Francesco Visentin, Jaas Ježov, Lily D Chambers, Gert Toming, Jennifer Brown, Maarja Kruusmaa, William M Megill and Paolo Fiorini. Hydrodynamic pressure sensing with an artificial lateral line in steady and unsteady flows[C]. *BIOINSPIRATION & BIOMIMETICS*, 2012.
- [20] Ahmad T. Abdulsadda; Xiaobo Tan. An Artificial Lateral Line System Using IPMC Sensor Arrays[J]. *International Journal of Smart and Nano Materials*, 2012, 3(3): 226-242.
- [21] Salumäe T, Kruusmaa M. Flow-relative control of an underwater robot, *Proceedings of the Royal Society*[C]. 2013, 469(2152), Article ID 2012: 671.
- [22] Masanori Nakae, Kunio Sasaki. The lateral line system and its innervation in the boxfish *Ostracion immaculatus* Tetraodontiformes Ostraciidae description and comparisons with other tetraodontiform and perciform conditions[D]. *Ichthyological Research*, 2005.