

形状记忆合金丝驱动的仿生墨鱼水下机器人的原型设计

高 飞¹, 王玉魁¹, 王振龙^{1,2}, 王扬威¹, 李 健¹

(1. 哈尔滨工业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 微系统与微结构制造教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 采用鳍波动推进和喷射推进复合方式进行游动的墨鱼, 兼具机动性和快速性. 本文模仿其肌肉结构, 采用在柔性硅胶中嵌入形状记忆合金丝的结构设计, 分别研制了一种能够柔性弯曲的柔性鳍单元结构和一种能够柔性收缩和扩张的仿生外套膜结构, 并以此为基础分别研制出一种仿生波动鳍推进器和一种仿生喷射推进器, 用以模拟墨鱼的游动机理, 并对两种仿生推进器的推进性能进行了测试. 最后研制了一种仿生墨鱼水下机器人原理样机, 并进行了游动试验.

关键词: 墨鱼; 鳍波动推进; 喷射推进; 形状记忆合金丝; 仿生机器人

中图分类号: TP242.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2013)-03-0346-06

Prototype Design of a Kind of Biomimetic Cuttlefish Underwater Robot Actuated by SMA Wires

GAO Fei¹, WANG Yukui¹, WANG Zhenlong^{1,2}, WANG Yangwei¹, LI Jian¹

(1. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Key Laboratory of Micro-systems and Micro-structures Manufacturing, Ministry of Education, Harbin 150001, China)

Abstract: Cuttlefish can swim with great maneuverability by undulating their fins and can swim with high speed by jetting. To mimic the muscle structure of the cuttlefish, a kind of flexible fin unit which can bend to both sides and a kind of biomimetic mantle which can flexibly contract and expand, are developed with the structure that SMA (shape memory alloy) wires are embedded into the flexible silicone rubber. Then a kind of biomimetic undulating fin and a kind of biomimetic jet propeller based on the former design are developed to mimic the swimming mechanism of cuttlefish. And the thrust performance of both of the propellers is tested. At last, a prototype of biomimetic cuttlefish robot is developed and the swimming experiments are carried out.

Keywords: cuttlefish; undulating fin propulsion; jet propulsion; shape memory alloy wire; biomimetic robot

1 引言 (Introduction)

墨鱼是海洋中最善于游动的动物之一, 能够实现翻滚、原地打转、快速后退等鱼类难以实现的动作^[1]. 这一方面与墨鱼独特的身体构造相关, 另一方面主要得益于其独特的鳍波动和喷射复合推进的游动机理. 其中鳍波动推进使墨鱼在低速游动时能够灵活地调整姿态, 而喷射推进则为墨鱼快速游动提供强劲的推进力. 因此, 墨鱼这种复合推进方式对仿生水下机器人的设计具有重要的借鉴意义. 然而, 目前国内外尚无以墨鱼为仿生对象并模拟其鳍波动和喷射复合推进游动机理的仿生水下机器人. 其原因为墨鱼鳍的柔性弯曲运动以及喷射过程中外套膜的柔性收缩和扩张运动难以通过电机驱动的机

械结构来实现.

目前, 国内外已有相关研究机构分别对生物的鳍波动推进和喷射推进机制进行了研究, 并利用不同的机械结构设计研制了相应的仿生推进装置, 如美国西北大学^[2]、新加坡南洋理工大学^[3]、日本大阪大学^[4]和国防科技大学^[5]等分别模拟不同生物的鳍波动推进方式而研制的仿生波动鳍装置或推进器. 然而上述设计采用的均是电机驱动的刚性鳍条摆动的结构, 存在体积庞大、结构复杂、有噪音等缺点, 并且刚性鳍条的摆动不符合真实鱼鳍的柔性弯曲运动. 而中国科学技术大学的章永华等人研制了一种以 SMA 薄板对作为鳍条的仿生鱼鳍^[6], 不仅简化了结构, 并且所研制的仿生鳍条能够实现柔性

弯曲. 但它采用间接加热方法驱动 SMA 薄板, 这不仅实现困难, 而且存在能量利用率低的缺点. 关于仿生喷射推进, 虽然美国加州理工大学^[7]和科罗拉多州立大学^[8]模仿墨鱼喷射原理分别设计了两种不同但均为螺线管致动器驱动的脉冲式涡流喷射推进器 (pulsatile vortex generator), 然而它们的实现机制与墨鱼依靠外套膜柔性收缩和扩张运动实现的喷射推进机制仍存在显著差异.

墨鱼鳍和外套膜能够实现大幅度的柔性运动主要得益于其特殊的肌肉性静水骨骼结构, 该结构是由沿 3 维方向上紧密排列的肌肉纤维阵列构成. 它没有硬骨骼的限制, 通过肌肉纤维的收缩, 可实现大幅度变形^[9]. 本文正是从墨鱼这种特殊的肌肉组织及其动作机制中获得启发, 选择 SMA 丝作为驱动材料, 模拟其肌肉纤维的运动, 选择硅胶作为主体材料, 模拟其肌肉组织及其弹性机制, 采用柔性硅胶中嵌入 SMA 丝的结构设计, 分别研制了一种能够实现双向弯曲的柔性鳍单元结构以及能够柔性收缩和扩张的仿生外套膜结构, 并以此为基础分别研制了基于柔性鳍单元的仿生波动鳍结构和基于仿生外套膜的仿生喷射推进器来模拟墨鱼的鳍波动推进和喷射推进机制, 并将两者进行有机结合, 从而设计出一种新型的仿生墨鱼水下机器人.

2 仿生墨鱼水下机器人总体设计 (Overall design of the biomimetic cuttlefish robot)

墨鱼, 如图 1 所示, 其躯干呈扁平状, 沿躯干一周为墨鱼的鳍, 躯干的腹部被外套膜包裹, 向内形成外套膜腔体. 通过鳍的波动, 墨鱼能够实现低速的机动灵活的游动, 而通过外套膜的柔性收缩和扩张, 能够实现快速的喷射推进游动. 研制仿生墨鱼水下机器人的目的正是要模拟墨鱼这种鳍波动推进和喷射推进的复合游动机理.

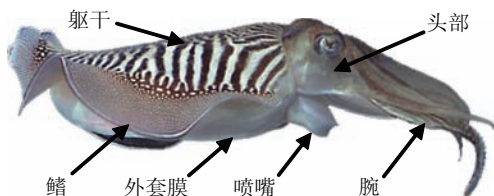


图 1 墨鱼形态结构示意图

Fig.1 Morphology of the cuttlefish

墨鱼扁平的身体外形能有效降低其游动过程中的流体阻力, 因此, 模仿墨鱼的形态结构, 从总体上构建了仿生墨鱼水下机器人的 3 维 UG 模型, 如图 2 所示. 该机器人的推进系统由仿生波动鳍和仿生喷

射推进器两部分来实现. 其中, 仿生波动鳍实现鳍波动推进的功能, 为机器人低速条件下的前进、后退以及转弯等机动灵活的游动提供推进力和力矩. 而仿生喷射推进器则由仿生外套膜、仿生进水膜和仿生喷嘴等组成, 通过三者的协调运动来模拟墨鱼的喷射推进机制, 为机器人的快速游动提供强劲的推力. 其中, 仿生外套膜的功能是实现柔性收缩和扩张运动, 为喷射推进提供动力来源. 而仿生进水膜的功能是控制进水口的开合, 降低脉冲喷射充水阶段的速度损失. 仿生喷嘴的功能是实现柔性弯曲, 从而使喷射的方向可控. 通过上述两种推进系统的有机结合, 使机器人兼具鳍波动推进的机动灵活性和喷射推进的快速性.

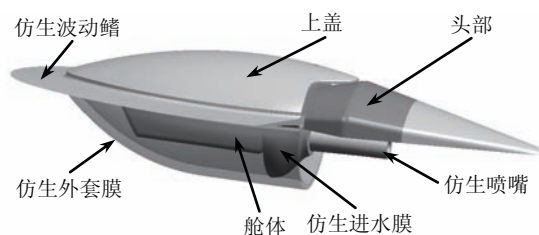


图 2 仿生墨鱼水下机器人的结构示意图

Fig.2 Structure of the biomimetic cuttlefish robot

3 关键功能结构的设计与实现 (Design and implementation of key functional structures)

3.1 仿生波动鳍的设计与实现

若将墨鱼鳍沿长度方向分割成无数段小窄条, 并且每个小窄条的运动可视为简单的柔性弯曲运动, 那么鳍的波动可以看成是这些并列鳍条弯曲运动的合成. 而鳍条的柔性弯曲则是通过其背腹部横肌纤维 T 的交替收缩以及结缔组织的弹性机制来实现的^[9]. 为了模拟鳍条柔性弯曲运动的功能, 设计了如图 3 所示的柔性鳍单元结构, 主要由 SMA 丝、弹性体、硅胶蒙皮及基体组成. 弹性体固定在基体上, 在弹性体的两侧分别布置 SMA 丝, 在 SMA 丝上覆盖硅胶蒙皮.

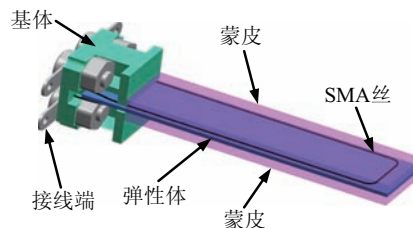


图 3 柔性鳍单元结构示意图

Fig.3 Structure of the flexible fin unit

如图 4 所示, 柔性仿生鳍单元以差动方式工作:

一侧 SMA 丝收缩, 带动鳍单元弯曲, 同时拉伸另一侧的 SMA 丝; 另一侧 SMA 丝收缩, 带动鳍单元向该侧方向弯曲, 同时拉伸相反侧的 SMA 丝. 在两根 SMA 丝差动收缩的带动下鳍单元能够实现向上和向下的柔性弯曲摆动运动. SMA 丝的收缩动作可以很好地模拟墨鱼横肌纤维 T 的收缩运动. 柔性仿生鳍单元在差动运动过程中, 聚乙烯材料的弹性体和硅胶蒙皮能够在 SMA 丝收缩时存储弹性性能, 而在 SMA 丝回复时释放弹性性能, 提高能量的利用效率.

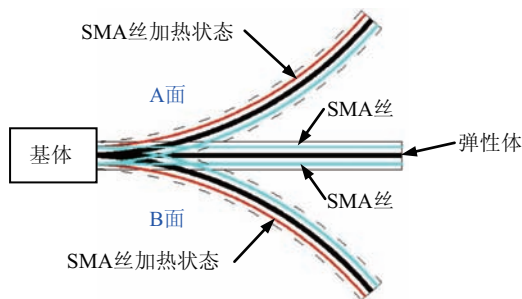


图4 柔性鳍单元运动示意图
Fig.4 Schematic diagram of the flexible fin unit

在实现了模拟鳍条柔性弯曲运动的基础上, 设计了基于柔性鳍单元的仿生波动鳍结构, 如图5所示. 柔性鳍面是由人体硅胶灌注而成, 将对称分布的柔性鳍单元连接成整体. 而鳍面基线则是依据实测的墨鱼长鳍基线拟合而成. 仿生波动鳍原型设计的目的在于功能验证, 在保证单侧鳍面至少能够呈现1个完整波形的前提下, 为降低控制的复杂性, 单侧鳍面柔性鳍单元的个数仅设计为5个.

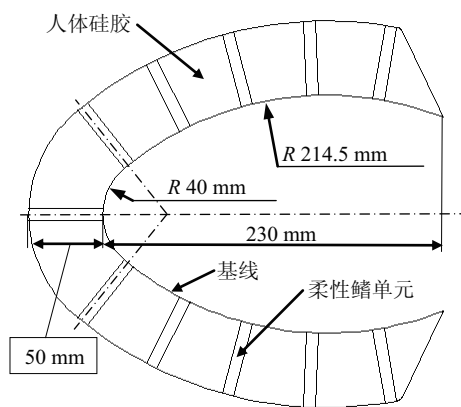
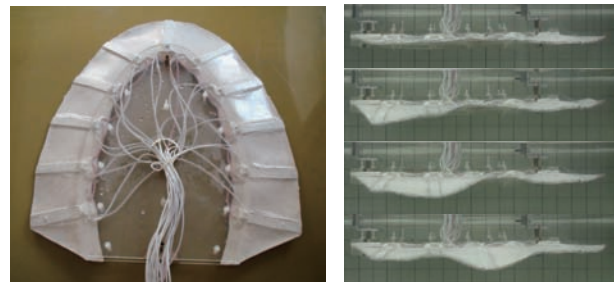


图5 仿生波动鳍结构示意图
Fig.5 Structure of the biomimetic undulating fin

图6所示为所研制仿生波动鳍实物及其波动图像序列. 仿生鳍面可通过柔性鳍单元的有序运动形成波动, 其波幅和波频由柔性鳍单元弯曲幅度和动作频率决定, 而波速则由相邻柔性鳍单元运动时的时序差决定. 柔性鳍单元通过电压脉冲进行驱动,

脉宽和脉间决定了其弯曲幅度和动作频率. 因而, 可通过调节驱动脉宽和脉间的大小来调节仿生波动鳍的波幅和波频等波形参数, 进而调节所产生的推进力和力矩. 该仿生波动鳍具有结构简单、易于驱动和动作柔性无噪音等优点.



(a) 研制的仿生波动鳍 (b) 波动图像序列

图6 仿生波动鳍及其波动图像序列

Fig.6 The biomimetic undulating fin and its motion sequence

3.2 仿生外套膜的设计与实现

仿生外套膜是实现仿生喷射的关键功能结构, 通过其柔性收缩和扩张运动为喷射提供动力来源. 所设计的仿生外套膜结构与尺寸如图7所示, 主要由硅胶、筋条和 SMA 丝所构成. 硅胶通过模具灌注成外套膜的形状, 并沿其圆周方向嵌入 SMA 丝, 用以模拟肌肉组织中的环状肌纤维^[9]. 筋条沿外套膜的长度方向布置, 一方面为穿丝提供小孔, 另一方面则起到保持外套膜形状的作用.

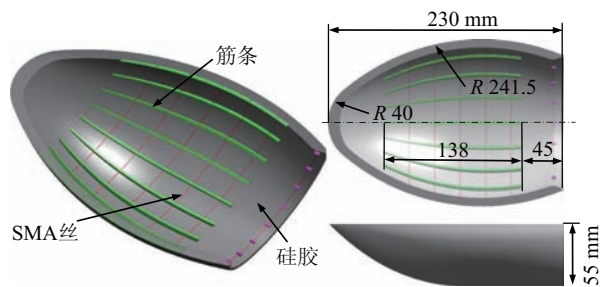


图7 仿生外套膜结构及形状尺寸

Fig.7 Structure and dimensions of the biomimetic mantle

仿生外套膜的动作原理可由其横截面的形变示意图表示, 如图8所示. 当 SMA 丝加热收缩后, 仿生外套膜的横截面由位置1变化至位置2, 其内径、外径以及与水平线所包围的面积均减小, 从而使仿生外套膜所包围的腔体体积减小实现喷射. 硅胶体在形变过程中受到挤压, 存储部分弹性性能. 当 SMA 丝断电冷却时, 存储的弹性性能被释放, 在外力的作用下, SMA 丝逐渐恢复至原始长度, 仿生外套膜的横截面也由位置2恢复至位置1, 其内径、外径及与水平线所包围的面积均增大, 从而使仿生外套膜所包围的腔体体积增大实现充水.

图 9 所示为仿生外套膜实物及其柔性收缩前后的状态变化图. 仿生外套膜通过电压脉冲进行驱动, 在电压恒定的条件下, 可通过调节驱动脉宽的大小来调节 SMA 丝所能达到的应变, 从而调节仿生外套膜的收缩率以及喷射推力的大小.

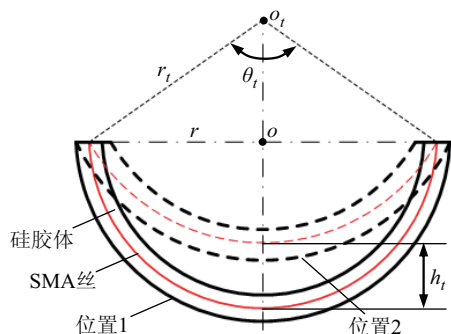
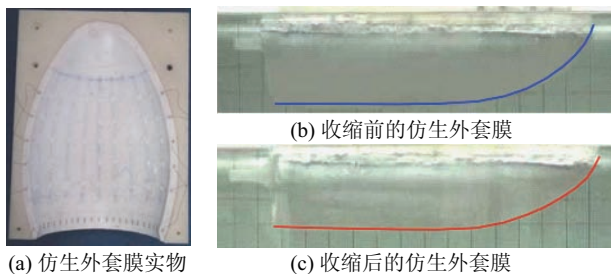


图 8 仿生外套膜横截面形变示意图

Fig.8 Schematic diagram of cross-section deformation of the biomimetic mantle



(a) 仿生外套膜实物

(b) 收缩前的仿生外套膜

(c) 收缩后的仿生外套膜

图 9 仿生外套膜实物及其变形

Fig.9 The biomimetic mantle and its deformation

4 推进器推力性能测试 (Thrust performance testing of the propellers)

为研究所研制的仿生波动鳍和仿生喷射推进器的推进性能, 并确定其最优的驱动参数, 搭建了如图 10 所示的推进力测试平台. 力传感器用于测量推进力, 通过数据采集卡对传感器信号进行采集和保存.

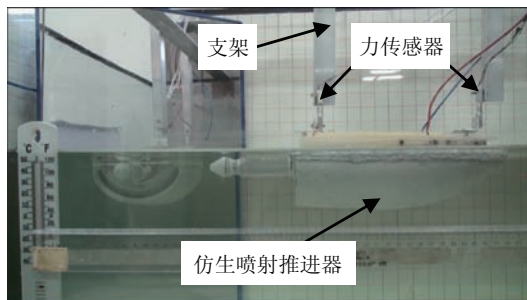


图 10 推进力测试平台

Fig.10 Platform of propulsion testing

图 11 所示为实验测得的仿生波动鳍产生的推进力变化曲线. 柔性鳍单元的驱动电压为 7.4 V, 驱

动脉宽为 80 ms. 为使 SMA 丝能够充分冷却, 将脉间值设置为脉宽的 10 倍, 因而此时仿生鳍的波动周期为 1.76 s, 频率约为 0.57 Hz, 而波幅通过实验测量可达 45 mm. 由图示推进力变化曲线可得, 仿生鳍波动产生的推进力呈周期性变化, 且变化频率约为 1.14 Hz, 恰好为仿生鳍波动频率的 2 倍, 验证了文 [10] 中所述的仿生波动的倍频效应, 即在一个仿生波动运动周期内, 鳍波动产生的推进力将出现两次周期性变化. 在驱动脉宽为 80 ms 时, 鳍波动产生的最大推力可达 159 mN, 平均推力约为 80 mN.

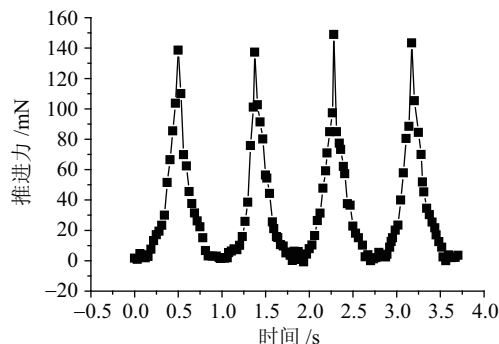


图 11 仿生鳍波动推进力变化曲线

Fig.11 Thrust curve produced by biomimetic undulating fin

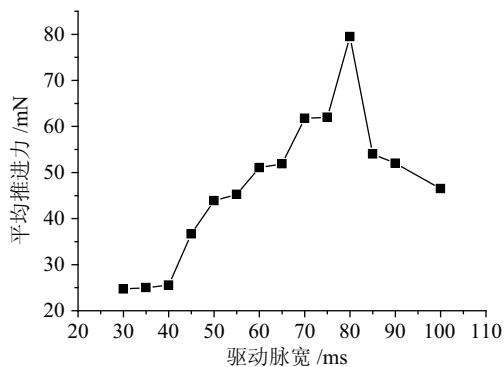


图 12 不同驱动脉宽下鳍波动平均推进力的变化曲线

Fig.12 Average thrust produced by undulating fin at different pulse width

鳍波动产生的推进力主要由其波动参数所决定, 即波动的波幅、波频和波速的大小. 前人理论研究 [11] 表明, 在波速恒定的条件下, 鳍波动产生的推进力随波幅和波频单调变化, 即通过增大波幅和波频可以得到更大的推进力. 然而, 对于实际的仿生波动鳍装置, 波幅和波频无法同时增大, 波幅的增大必然导致波频的降低. 因此, 将存在一个最优的波动参数使得仿生波动鳍推进力达到最大值. 如前文所述, 柔性鳍单元通过电压脉冲驱动, 仿生波动鳍的波幅随驱动脉宽的增加而增加, 而波频则相反. 为获得其最优驱动参数, 测量了不同驱动脉宽下仿生波动鳍产生的平均推力的变化曲线, 如图 12 所

示. 由图可知, 开始时鳍波动产生的平均推力随驱动脉宽的增加而增加, 在驱动脉宽为 80 ms 时达到最大, 然后随着驱动脉宽的继续增加, 产生的平均推进力反而减小. 实验表明, 确实存在一个最优的驱动参数使得仿生波动鳍产生的推进力达到最优.

图 13 所示为实验测得的仿生喷射推进器产生的推进力变化曲线. 仿生外套膜的驱动电压为 30 V, 驱动脉宽为 1.5 s, 脉冲间隔约 2 s. 由图可知, 由喷射形成的推进力为脉冲式的推进力, 推进力在开始时刻急速增加达到峰值, 随后又迅速降低逐渐变为 0. 期间, 峰值推进力可达 600 mN 左右, 产生的平均推进力约为 140 mN.

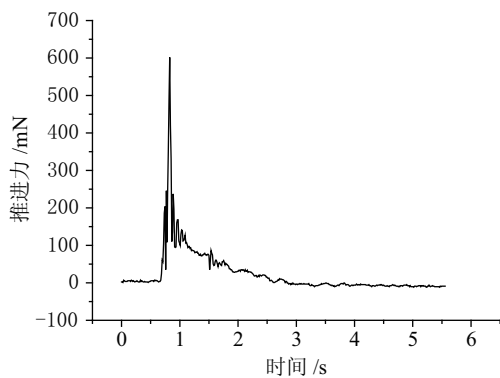


图 13 仿生喷射推进力变化曲线

Fig.13 Thrust curve produced by biomimetic jetting

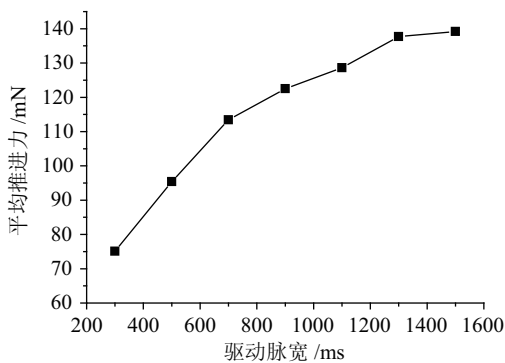


图 14 平均喷射推进力随驱动脉宽的变化曲线

Fig.14 Average thrust produced by jetting at different pulse width

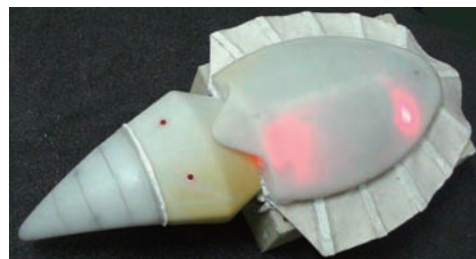
在驱动电压恒定的条件下, 测量了不同驱动脉宽下仿生喷射推进器产生的平均推力的变化曲线, 如图 14 所示. 实验结果表明, 喷射产生的平均推进力随驱动脉宽的增加而增大, 但增加的趋势趋于平缓. 这是因为随着驱动脉宽的增加, SMA 丝所能达到的收缩应变也随之增加, 从而使仿生外套膜横截面的变化率增加, 所以将有更多的流体从仿生外套膜腔内喷出, 因而由喷射产生的平均推力也随之提高. 当继续增加驱动脉宽对 SMA 丝应变影响较小

时, 喷射产生的平均推进力趋于稳定.

上述实验结果表明, 本文所研制的仿生波动鳍和仿生喷射推进器均能为机器人提供一定的推进力, 并且由仿生喷射推进器所产生的喷射推力大于由仿生波动鳍产生的推进力.

5 机器人样机及其游动试验 (Robot prototype and swimming test)

在成功研制了仿生波动鳍和仿生喷射推进器等关键功能结构的基础上, 研制了仿生墨鱼水下机器人的原型样机, 如图 15 所示. 该机器人样机的上盖、头部和舱体结构均采用树脂材料, 利用快速成型方法加工. 机器人的控制电路分别安装于头部和舱体内. 控制电路以单片机为核心, 通过引脚输出的控制信号来控制 SMA 驱动回路中场效应管的通断, 从而控制 SMA 丝的加热和冷却. 单片机可通过无线通讯模块与上位机进行通讯, 然后依据上位机所设定的运动模式和驱动参数来控制仿生波动鳍和仿生外套膜的运动, 从而实现机器人的自主游动. 该样机总长度为 480 mm, 宽度为 260 mm, 高度为 100 mm, 总质量为 2 127 g.



(a) 仿生墨鱼机器人样机



(b) 头部内硬件电路



(c) 舱体内硬件电路

图 15 仿生墨鱼机器人样机及硬件电路实物

Fig.15 Prototype of the biomimetic cuttlefish robot and its hardware circuit

为了验证机器人的游动能力, 对其进行了游动试验, 主要包括采用鳍波动推进方式进行向前和向后的直线游动以及原地转弯游动, 采用喷射推进方式进行向后的直线游动. 仿生波动鳍和仿生外套膜的驱动参数均选择上述最优驱动参数. 试验过程采用摄像机以 25 帧/秒的速度进行拍摄, 然后通过视频处理软件对拍摄视频进行分析. 图 16 所示为机器人直线游动时的图像序列, 图 17 所示为机器人进行

原地转弯游动时的图像序列。

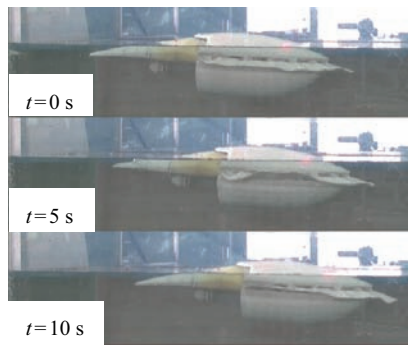


图 16 仿生墨鱼机器人直线游动图像序列

Fig.16 The swimming image sequence of the biomimetic cuttlefish robot

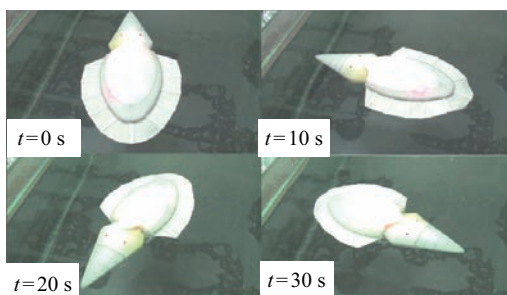


图 17 仿生墨鱼机器人转弯游动图像序列

Fig.17 The turning image sequence of the biomimetic cuttlefish robot

试验结果表明: 机器人能够通过仿生波动鳍实现如前进、后退以及原地转弯等机动灵活的游动, 直线游动最高速度可达 25 mm/s, 旋转游动角速度可达 9°/s。而通过仿生喷射推进器能实现较为快速的直线游动, 最高游动速度可达 35 mm/s。

6 结论 (Conclusion)

本文采用在柔性硅胶中嵌入 SMA 丝的结构设计, 分别研制出一种能够双向柔性弯曲的柔性鳍单元结构和一种能够柔性收缩和扩张的仿生外套膜结构, 并以此为基础分别研制出一种柔性的仿生波动鳍推进器和一种仿生喷射推进器, 从而研制出一种仿生墨鱼水下机器人, 并通过游动试验验证了机器人采用鳍波动推进和喷射推进的复合推进游动力, 达到了预期的设计目标和效果。在未来的工作中, 将主要围绕如何进一步提高喷射推进力从而提升机器人的游动速度, 如何对鳍波动推进和喷射推进进行优化组合, 如何提升机器人的自主游动能力等问题展开研究。

参考文献 (References)

[1] 董正之. 中国动物志软体动物门头足纲 [M]. 北京: 科学出版社, 1988: 21-22.

Dong Z Z. Fauna in China Mollusca Cephalopods[M]. Beijing: Science Press, 1988: 21-22.

- [2] MacIver M A, Fontaine E, Burdick J W. Designing future underwater vehicles: Principles and mechanisms of the weakly electric fish[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004, 29(3): 651-659.
- [3] Low K H. Modelling and parametric study of modular undulating fin rays for fish robots[J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(3): 615-632.
- [4] Rahman M M, Toda Y, Miki H. Computational study on a squid-like underwater robot with two undulating side fins[J]. Journal of Bionic Engineering, 2011, 8(1): 25-32.
- [5] 谢海斌, 张代兵, 沈林成. 基于柔性长鳍波动推进的仿生水下机器人设计与实现 [J]. 机器人, 2006, 28(5): 525-529.
- Xie H B, Zhang D B, Shen L C. Design and realization of a bionic underwater vehicle propelled by undulation of a long flexible fin[J]. Robot, 2006, 28(5): 525-529.
- [6] 章永华, 何建慧, 张世武, 等. NiTi 形状记忆合金驱动的仿生鱼鳍的研究 [J]. 机器人, 2007, 29(3): 207-213.
- Zhang Y H, He J H, Zhang S W, et al. Research on biomimetic fish fin driven by NiTi shape memory alloy[J]. Robot, 2007, 29(3): 207-213.
- [7] Thomas A P, Milano M, G'Sell M G, et al. Synthetic jet propulsion for small underwater vehicles[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 181-187.
- [8] Mohseni K. Pulsatile vortex generators for low-speed maneuvering of small underwater vehicles[J]. Ocean Engineering, 2006, 33(16): 2209-2223.
- [9] 王振龙, 杭观荣, 王扬威, 等. 乌贼游动机理及其在仿生水下机器人上的应用 [J]. 机械工程学报, 2008, 44(6): 1-9.
- Wang Z L, Hang G R, Wang Y W, et al. Swimming mechanism of squid/cuttlefish and its application to biomimetic underwater robots[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(6): 1-9.
- [10] 徐海军. 液压驱动波动鳍仿生推进器关键技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- Xu H J. Research on key technologies of hydraulic-driven bionic propeller inspired by undulating fins[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [11] 周晗. 仿生波动推进水下机器人水动力计算与实验研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
- Zhou H. Computational and experimental hydrodynamics of underwater robots propelled by bionic undulating fins[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.

作者简介:

- 高飞 (1986-), 男, 博士生. 研究领域: 仿生水下机器人技术, 流体仿真, 智能材料应用等.
- 王玉魁 (1977-), 男, 博士, 副教授. 研究领域: 特种加工技术, 微细加工技术, 仿生水下机器人技术等.
- 王振龙 (1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师. 研究领域: 特种加工技术, 微细加工技术, 仿生水下机器人技术等.