

形状记忆合金丝驱动的触手推进式仿生水母

李 健¹, 郭艳玲¹, 王振龙²

(1.东北林业大学 机电工程学院, 150040 哈尔滨; 2.哈尔滨工业大学 机电工程学院, 150001 哈尔滨)

摘要:为研制一种高效自主游动的新型水下机器人,受水母的身体特征和鱼尾的推进模式的启发,利用智能材料——形状记忆合金丝(shape memory alloy, SMA)模拟肌肉纤维作为驱动材料,在对水母整体结构进行仿生改造,并对其运动策略进行分析的基础上,研制了一种由6个仿生触手推进器驱动的仿生水母原理样机.该机器人总长230 mm,直径110 mm,总质量590 g,自带能源动力,在无线遥控下能达到115 mm/s的直线游动速度和18°/s的转弯速度.实验结果表明:该仿生水母机器人结构、密封简单,机动性强,能够无声推进,并具有生物友好性等优点,验证了形状记忆合金丝做仿生肌肉材料的可行性.

关键词:形状记忆合金丝;仿生水母;水下机器人;触手推进;多推进器

中图分类号: TP242.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2014)01-0104-07

A bionic jellyfish robot propelled by bio-tentacle propulsors actuated by shape memory alloy wires

LI Jian¹, GUO Yanling¹, WANG Zhenlong²

(1.College of Electromechanical Engineering, Northeast Forestry University, 150040 Harbin, China;

2.School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China)

Abstract: Inspired by the body character of jellyfish and the swimming mode of caudal fin, a new-style efficient autonomous underwater vehicle tends to be developed. A kind of smart material-shape memory alloy wire is adopted as the actuator to imitate the muscle of jellyfish. Based on rebuilding the configuration of jellyfish and analyzing the swimming strategy, a bionic jellyfish robot prototype propelled by 6 bionic tentacle propulsors is developed. The robot is 230 mm in length, 110 mm in diameter, 590 g in weigh and contains power supply. The robot can reach 110 mm/s straight speed and 18°/s turning speed in wireless control. The swimming experiment demonstrates that the bionic swimmer has the merits of simple structure, easy to seal, good maneuverability, silent propulsion and biology friendly. The feasibility of taking shape memory alloy wires as bionic muscle material is verified.

Keywords: shape memory alloy wires; bionic jellyfish; underwater robots; propelled by bio-tentacle propulsors; multi-propulsor

水中生物经过亿万年的进化,各自具备了适应海洋环境的独特的游动能力.受到大自然的启发,针对传统水下机器人效率不高、噪音大等诸多

问题^[1],科研工作者模仿水下生物研制出了仿生水鱼^[2]、仿生龙虾^[3]、仿生海龟^[4]等多种适应不同需求的仿生水母机器人.仿生水母机器人的研究尚处于起步阶段,大多数仿生水母机器人采用电动机驱动,驱动机构复杂,游动水平和水中生物相比还存在着较大差距.近十年来,智能材料的出现为研制人工肌肉进而应用到各种仿生装置中提供了可能,形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)^[5-6]、电流驱动聚合物(ion-exchange polymer

收稿日期: 2012-12-19.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(DL12BB19); 国家自然科学基金资助项目(50775049).

作者简介: 李 健(1985—),男,讲师;

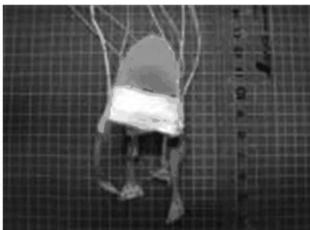
郭艳玲(1962—),女,教授,博士生导师;

王振龙(1963—),男,教授,博士生导师.

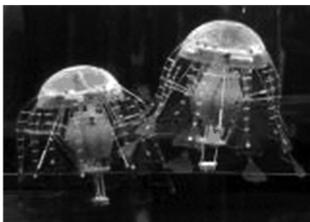
通信作者: 郭艳玲, guo.yl@hotmail.com.

metal composite, IPMC)^[7]、压电陶瓷^[8]、导电聚吡咯^[9]等智能材料驱动机器人鱼相继出现,使仿生水下机器人的柔性化、结构简单化以及微型化程度都得到了大幅度提高,有效改进了其推进性能。

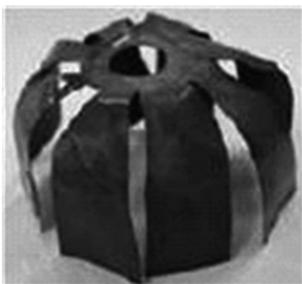
水母是一种常见的海洋生物,因游速较慢受关注较少,模拟水母的仿生水下机器人也比较有限。哈尔滨工程大学的郭书祥教授等采用形状记忆合金丝作为驱动材料,研制出了环绕式和直拉摆臂式两种仿生水母^[10-11](图1(a)所示),但存在着产生推力较小,结构所占空间大,动作柔性化和仿生化程度不高等缺点。德国费斯通公司从水母的起伏运动得到启发,开发了一款仿生水母^[12](图1(b)所示),其主要结构包括激光烧结制成的密封舱及8根触须推进器,每根触须推进器在电机带动下可以来回弯曲,推动机器水母前进,该机器水母还配备了一系列的传感、通讯系统。韩国智能系统设计与控制实验室研制了初始形状为弯曲状态的IPMC致动器,并基于这种致动器研发了模拟海月水母的机器水母结构^[13](图1(c)所示),该项研究尚处于初级阶段,尚无成熟的原理样机。



(a) 哈工程大学仿生水母



(b) 费斯通公司仿生水母



(c) 韩国 IPMC 水母

图1 3种仿生水母机器人

上述国内外研制的仿生水母虽名为水

母,但推进方式大都为摆动触须推进方式,与水母大不相同,主要旨在模仿水母的身体特征,为命名方便仍然称为仿生水母机器人。

本文所要设计并研制的仿生水母机器人是由6个仿生触手推进器推动的,该触手推进器采用内嵌式SMA丝模拟其肌肉纤维作为驱动原件。对多个仿生触手的协同动作策略进行了分析,并计算了单个仿生触手的推进力,在此基础上完成了仿生水母机器人直线游动和转弯游动的原理性验证实验。

1 仿生水母的设计

水母是海洋中重要的浮游生物,是无脊椎动物,属腔肠动物门钵水母纲。总体上,水母的身体外形呈现出伞状,在水母翼的边缘有一圈拖尾的触手。水母通过收缩伞体挤压内腔的方式改变内腔体积,从而喷出腔内的水,水流喷出产生的推力使水母沿身体轴向方向运动。触手主要用于捕食,并起着辅助推进作用,如水母借助触手可以有效地改变运动方向。和大多数无脊椎动物类似,水母伞体的组织结构没有硬骨骼的支撑,是一种典型的肌肉性静水骨骼,其结构是一种肌肉纤维阵列,可以输出力并实现大幅度的运动。同样地,水母触手内也分布着各种肌肉纤维,使触手可以在多个方向上弯曲动作。

对水母来说,由于其肌肉动作缓慢,喷流速度小,导致其推进速度非常有限,且只靠细小的触手实现的转弯机动性较差。仿生学的原则为源于生物,但不局限于生物,本研究对水母进行仿生化研究时对其动作方式和结构都进行了改造。鱼类尾鳍推进是水中生物最常见的推进方式,其具备柔性化程度高,动作幅度大,推进效率高,推进力大等优点;因此在对水母进行仿生化设计时,首先借鉴尾鳍的推进作用,对水母触手的作用进行强化,设计一种类似鱼类尾鳍的仿生触手推进器。多个仿生触手推进器分布在水母的伞体外缘,共同推动仿生水母机器人前进。与真实水母相比,仿生水母机器人的动作幅度大为增加,由此在运动中引起的虚质量也得到了增强,进而推进力和推进速度得到了强化。图2所示为装备有仿生触手推进器的机器水母,上部分为仿生水母伞体,其中包含着电池、驱动控制电路、通信装置等,6个仿生触手推进器均匀分布在舱体下端的圆周方向上。

仿生触手推进器的结构设计最大程度地模仿了鱼鳍的动作原理,为了增强其柔性化、简单化程度,采用形状记忆合金丝作为驱动材料,由弹性

体、SMA 丝、蒙皮、支撑体和被动尾鳍导线构成。弹性体(PVC 塑料片)的两侧壁各紧贴有一根 SMA 丝,单侧的每根 SMA 丝折成“U”字状,底端固定于弹性体的一端上,开口端固定于支撑体上,并连出两根导线以便通电。SMA 丝的外面覆上一层蒙皮(704 硅橡胶),主要起着给 SMA 丝绝缘的作用。为了增大推进性能,仿生触手推进器的尾部为柔软的模仿尾鳍形状的被动薄片。仿生触手推进器的动作原理: SMA 丝在通电前处于预拉伸状态,给单侧的 SMA 丝通电加热, SMA 丝发生马氏体逆相变开始收缩;收缩过程中保持一定的轴向

应力,由于 SMA 丝在推进单元中是偏心布置的,在这个偏心的应力作用下整个仿生触手推进器就会产生柔性弯曲动作;由于 SMA 丝径、弹性体及蒙皮厚度都比较小,弯曲幅度会很大;实现弯曲动作的同时,弹性体和蒙皮中都存储了足够的能量;给 SMA 丝断电之后, SMA 丝会在水中快速冷却,发生马氏体相变,此时弹性体和蒙皮中存储的能量释放, SMA 丝在此能量的带动下再次被拉长,仿生触手推进器回到初始位置;给两侧的 SMA 丝交替供电,则推进单元实现来回摆动,置于水中与水相互作用即可产生向前的推进力。

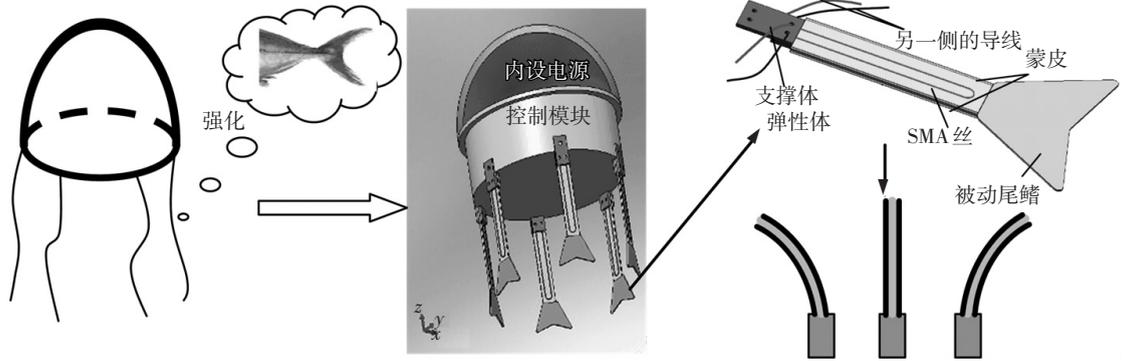


图 2 机器水母的仿生设计示意图

2 仿生机器水母运动策略分析

6 个仿生触手推进器都沿着机器水母中心轴方向配置,其在水中动作产生的推进力也主要沿着轴线方向,忽略其他方向上力的影响;因此在触手推进器的作用下,机器水母只能沿其轴线向前运动。通过多个触手推进器之间的协同运动产生期望的推力与操控力矩,即可实现仿生水下机器人的运动与姿态控制。为描述方便,首先建立机器水母的地面坐标系和本体坐标系,选择水面上的一点作为地面坐标系的原点建立笛卡尔坐标系,其中 X 轴方向竖直向下, YOZ 平面为水平面,如图 3 所示。

本体坐标系用于描述水母的转动,将本体坐标系的坐标原点建立在其重心上, $O_1 Y_1$ 轴与水母轴线重合,指向头部为正, $Y_1 Z_1$ 面平行于水平面, 3 个坐标轴与水母固连,随着机器水母一起运动,与地面坐标系配合,可以确定探头的姿态。

对于机器水母来说,在水中受到重力 G 、阻力、浮力及仿生触手推进器产生的作用力协同运动。在设计时通过配重将重力与浮力抵消,设机器水母运动速度为 V ,质量为 m ,则机器水母沿轴向上的质心运动方程为

$$m \frac{dV}{dt} = F_{Y_1} = \sum_{i=1}^6 F_i - F_D.$$

其中 F_{Y_1} 为机器水母在 Y_1 方向上的合外力, F_i 为各个仿生触手推进器产生的推进力, F_D 为机器水母受到的阻力,大小主要和其游动速度有关,可以表达为

$$F_D = C_D \rho_w A V^2 / 2. \quad (1)$$

其中 C_D 是阻力系数, A 是最大迎风面积, V 是游动速度。

水母绕质心转动的运动方程为

$$J \frac{d\omega}{dt} = M = \sum_{i=1}^6 M_i - M_D = \sum_{i=1}^6 F_i \times r - M_D.$$

其中 J 为水母的转动惯量, ω 为转动角速度, M 为总的转矩, M_i 为每个仿生触手推进器产生的推进力对质心的转矩, r 为仿生触手推进器到质心的距离, M_D 为转动过程中受到的水的阻力矩。

在对机器水母进行实际控制时,使之只能在水平面内运动,不允许其俯仰和横滚运动,则 6 个仿生推进器的布置如图 3 的侧视图,关于 X_1 轴和 Z_1 轴都对称。在采取不同的游动策略时,对仿生触手推进器采取不同的协同方式。将 6 个仿生触手推进器分成 2 类 3 组, X_1 轴左、右侧分别为 A 类和 B 类,相对的 2 个推进器为一组。要实现直线游动,需控制组内的两个推进器同时动作,幅度和频率都要一致,以便将产生的对质心力矩抵消,推进速度的快慢可通过增减动作的组数实现。转弯游动

时只需控制 A 或 B 类的推进器单独动作, 其中 2 号可单独动作实现转弯, 1 号和 3 号则需协同动作,

使得产生的力矩保持在水平面内。

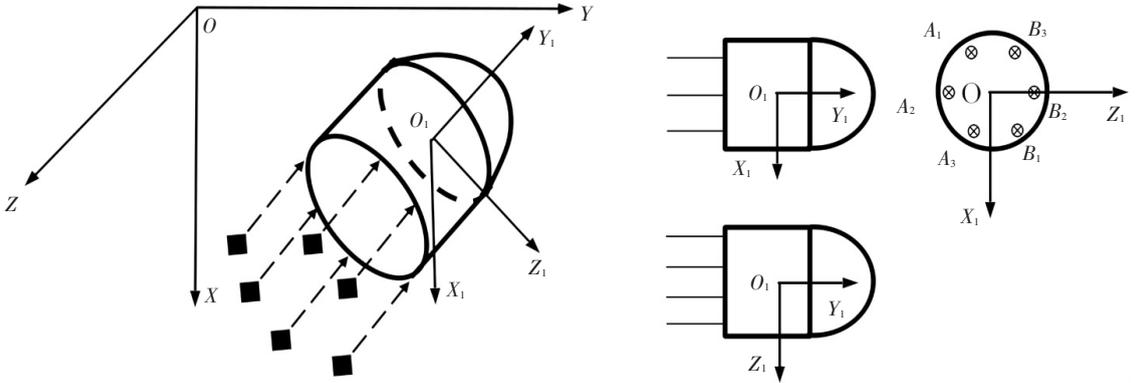


图 3 仿生水母机器人的坐标示意图

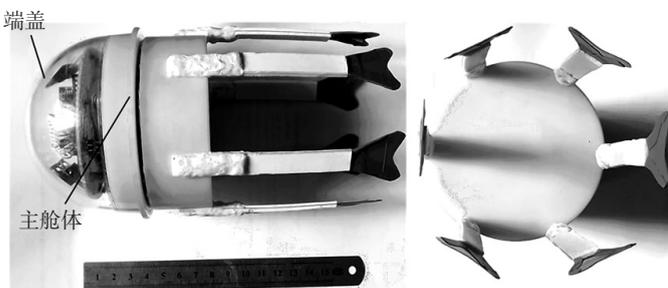
3 仿生触手推进器推进力计算

和鱼类尾鳍推进类似, 在仿生触手推进器推进方向上, 主要有两种作用力: 其动作产生的推进力和受到水的阻力. Lighthill 的细长体理论^[14] 被广泛用于估算推进力. 仿生触手推进器可以被看成是一个细长体是因为沿着其长度方向上的横截面积为小量, 且变化不大. 根据细长体理论, 作用在仿生触手推进器微元上的推进力可以由该微元对应的一部分水的附加质量计算得来, 而这部分水正是由于推进器的带动而在斜向上有一个加速度. 假定仿生触手推进器进行周期性的弯曲动作时, 沿着体长方向坐标为 z 的点在 t 时刻的位置为 $w(z, t)$, 在稳态时, 仿生触手推进器会最终达到一个在周期内的平均前进速度 U , 则从仿生触手推进器的末端部可以得出周期内的平均推进力 $\overline{F_T}$ 为

$$\overline{F_T} = \frac{1}{2} m(l) \left[\overline{\left(\frac{\partial w(z, t)}{\partial t} \right)^2} - U^2 \overline{\left(\frac{\partial w(z, t)}{\partial z} \right)^2} \right]_l$$

所示的上划线表示周期内的平均值. 所有的量都是从末端部, 即 $z = l$ (l 是仿生触手推进器的长度) 时进行计算的, 其中 $m(l)$ 表示虚质量, 其表达式为

$$m(l) = \frac{1}{4} \pi S_c^2 \rho_w.$$



其中 S_c 是仿生触手推进器末端的宽度, ρ_w 是水的密度。

4 仿生机器水母原理样机及其控制系统

图 4 为所研制的仿生水母机器人及控制原理图, 其总长为 230 mm, 直径为 110 mm, 总质量为 590 g. 主要包括主舱体、端盖、6 个仿生触手推进器和置于舱体内部的电池、控制电路板、配重块等部件. 主舱体由聚乙烯制成, 和透明亚克力制成的端盖通过螺纹进行联接, O 型圈进行密封. 6 个仿生触手推进器直接嵌入到主舱体的外部槽中, 并将导线通过小孔引入到舱体内部, 无动密封. 每个仿生触手推进器单侧的 SMA 丝分别与电路板上的 1 个 MOSFET 相连接, 采用 PIC16F877A 单片机为控制电路板的主控芯片来控制 MOSFET 的通断, 进而实现对 SMA 丝的差动脉冲开环供电. SMA 丝两端的驱动电压则由 3 节串联起来的 3.7 V、1 500 mAh 的可充电电池来提供. 控制电路板上还装有遥控模块, 通过外置遥控器与单片机进行通信. 无线接收和发射模块为 PT2262 和 SC2272 芯片, 能提供 6 路无线通讯信号, 该模块体积小, 调试方便, 然而信号路数少, 通信距离受限。

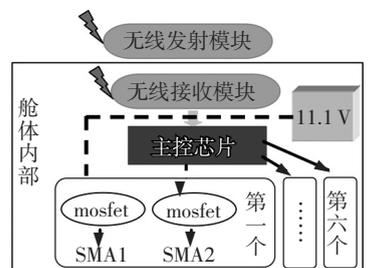


图 4 仿生水母机器人原理样机及控制原理图

仿生触手推进器所采用的 SMA 丝为直径 0.2 mm 的 Ni-Ti 基,其无应力状态下的相变温度依次为: $M_f = 43.4\text{ }^\circ\text{C}$, $M_s = 52.2\text{ }^\circ\text{C}$, $A_s = 51.4\text{ }^\circ\text{C}$, $A_f = 58.8\text{ }^\circ\text{C}$.SMA 丝的最大应力可达 800 MPa,SMA 丝及弹性体的弹性模量分别为 26.69 GPa 和 2.796 GPa,SMA 的收缩动作足以克服弹性体的弯曲应力.仿生触手推进器总长 90 mm,宽 10 mm,厚 2 mm,其中弹性体长 50 mm,厚度 $h = 0.4\text{ mm}$,经计算,当 SMA 丝的应变为 2% 时,最大弯曲角度可达 191° .

5 仿生机器水母游动的验证实验

由于对形状记忆合金丝本身的控制研究还不成熟,导致无法精确控制仿生触手推进器的动作,所研制的机器水母也没有配备加速度计、电子罗盘等传感器,无法进行闭环控制,因此本节中的实验都为功能验证试验.

5.1 仿生触手推进器的动作验证实验

为了验证所研制仿生触手推进器的性能,对其进行了水中动作实验,实验水温为 $22\text{ }^\circ\text{C}$.给两侧 SMA 丝以差动方式通电,控制时序如图 5 所示.图中 t_{on} 表示 SMA 丝的通电时间(即驱动脉冲宽度), t_{off} 表示 SMA 丝的冷却时间(即驱动脉冲间隔), t_{int} 表示两侧的 SMA 丝通电的间隔时间.图 6 为仿生触手推进器在通电电压为 7.4 V 、 t_{on} 为 60 ms 、 t_{off} 为 150 ms 时的实验结果,表明仿生触手推进器弯曲动作柔顺、可靠,幅度大.

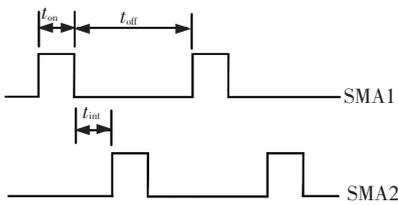


图 5 通电脉冲参数示意图

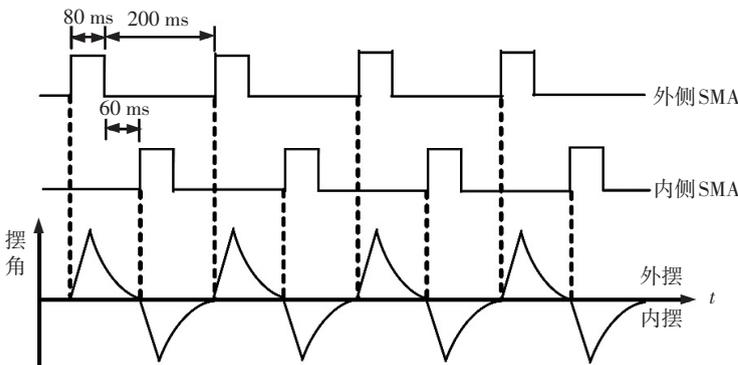


图 7 仿生触手推进器的摆角相位及周期内 6 个推进器的协同动作示意图

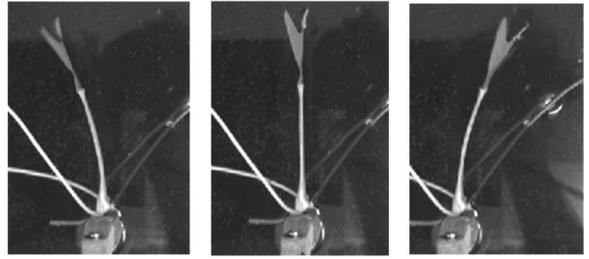


图 6 仿生触手推进器动作图

5.2 仿生机器水母的直线游动验证实验

根据本文第 2 节分析的直线运动策略,使得 A、B 两类的 6 个仿生触手推进器同时在同样的电参数下动作,相对的每 2 个推进器同时实现同幅度外摆和内摆动,则产生的关于质心的力矩可以抵消,以此完成了机器水母的直线游动验证实验.图 7 为单个仿生触手推进器的摆角相位及周期内 6 个推进器的协同动作示意图,图 8 所示为机器水母 20 个周期的游动状态图,通电脉冲为 $t_{on} = 80\text{ ms}$, $t_{off} = 200\text{ ms}$.从图中可以看出,仿生触手推进器的外摆和合拢状态,共同推进本体向前游动.图 9 所示为仿生水母的游动距离及游动速度随时间的变化情况,可以看出游动速度随着推进过程的进行逐渐增大,这是由于在初始时刻,仿生水母的速度为零,只受到 6 个触手推进器摆动后产生的推进力作用,且平均推进力在全过程中始终保持不变;因此仿生水母开始处于加速状态.随着速度的增大,受到的阻力也在增大,最终平均推进力和阻力达到平衡状态,仿生水母以一个相对恒定的速度推进.在局部上,游速呈现上下起伏变化状态,这是由于仿生触手推进器摆动产生的推进力为非定常力,呈现出尖脉冲状的分布,因此在局部上仿生鱼始终处于加速-减速的循环状态.仿生水母在此通电脉冲参数下的最大平均游动速度可以达到 115 mm/s .

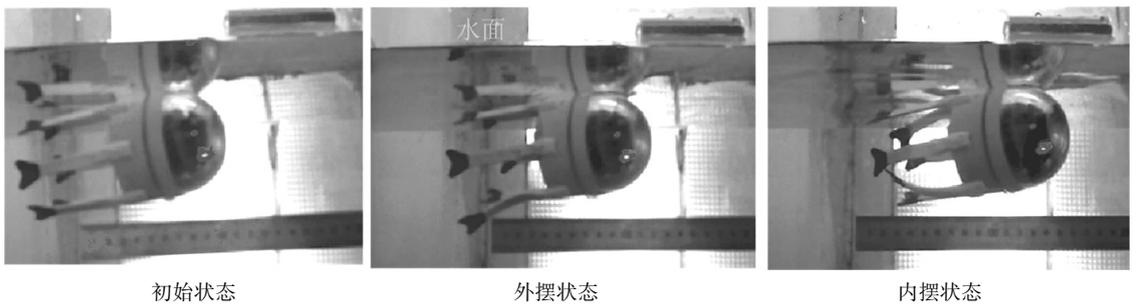


图8 仿生水母直线游动状态图

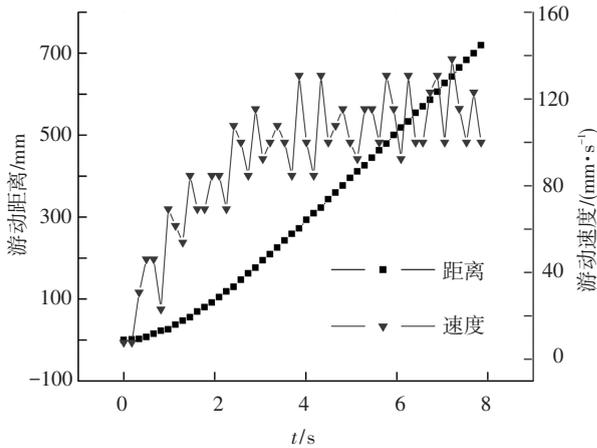


图9 仿生水母直线游动距离和速度随时间变化

基于仿生水母的游动数据,可用来计算仿生水母在推进过程中受到的推进力.对仿生水母的游动距离-时间曲线进行拟合,用一个近似的三次多项式表示如下:

$$S = -0.8586t^3 + 14.899t^2 + 27.844t - 8.9715.$$

公式拟合的决定系数 $R^2 = 0.9998$.其中 S 为机器

水母的游动距离, t 为游动时间,对 s 两次求导,则 $t = 0$ s 时刻的加速度为 29.8 mm/s^2 ,此刻6个仿生触手产生的总的平均推进力为: 17.6 mN .在整个过程中,推进力保持不变,因此这个推进力为平均推进力.同时,由于达到匀速后,推进力与阻力相平衡,可以根据式(1)求出阻力系数 $C_D = 0.28$.

5.3 仿生机器水母的转弯游动验证实验

根据本文第2节分析的转弯运动策略,为了对仿生机器水母进行转弯游动的实验验证,实验时只让处于A侧面2号位的单个仿生触手推进器完成来回弯曲动作,产生对质心的转矩,带动整机完成转弯运动.通电脉冲同样为 $t_{\text{on}} = 80 \text{ ms}$, $t_{\text{off}} = 200 \text{ ms}$.图10为其转弯游动时的状态图,可见侧向的仿生触手推进器的动作会产生一个偏心的推进力,同时会使仿生水母产生一个转矩,带动仿生水母做出图中箭头所示的转弯游动,转弯速度可达 $18^\circ/\text{s}$.

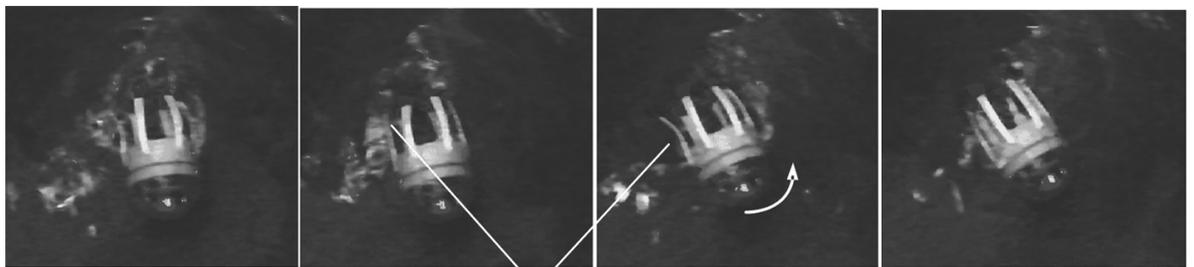


图10 仿生水母转弯游动时的状态图

6 结论

1) 仿生水母原理样机结合了水母的身体特征和鱼类尾鳍的推进特点,由人工肌肉-形状记忆合金丝驱动,结构简单,无需动密封,能实现无声推进.

2) 仿生水母原理样机通过6个仿生触手推

进器进行推进,动力部件多.在对其运动策略进行规划的基础上,具有良好的直线行走性能和灵活的转弯性能,控制简单可靠.

3) 该样机也存在一些问题:多个触手推进器的动作一致性和协调性不够,电池的电流供给能力不足.

4) 对形状记忆合金丝的精确定制及对整机

水母的运动协同控制将在下一步工作中进行研究和解决。

参考文献

- [1] 孔庆福,吴家明,贾野. 舰船喷水推进技术研究[J]. 舰船科学技术,2004,26(3):28-30.
- [2] HU H, LIU J, DUKES I, et al. Design of 3D swim patterns for autonomous robotic fish [C]//International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing: Proceedings of the IEEE/RSJ,2006:2406-2411.
- [3] AYERS J, WITTING J, WILBUR C. Biomimetic robots for shallow water mine countermeasures [C]//Proc of the Autonomous Vehicles in Mine Countermeasures Symposium. [S.l.]: Massa Products Corporation, 2000: 1-16.
- [4] LICHT S, POLIDORO V, FLORES M. Design and projected performance of a flapping foil AUV[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004,29(3):786-794.
- [5] SULEMAN A, CRAWFORD C. Design and testing of a biomimetic tuna using shape memory alloy induced propulsion[J]. Computers and Structures, 2008, 86(3/4/5):491-499.
- [6] 王扬威,王振龙,李健. 形状记忆合金丝驱动的仿生喷射推进器[J]. 哈尔滨工业大学学报,2011,43(9): 33-37.
- [7] AURELI M, KOPMAN V, PORFIRI M. Free-locomotion of underwater vehicles actuated by ionic polymer metal composites [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2010,15(4):603-614.
- [8] BORGEM M G, ASHINGTON G N, KINZEL G L. Design and evolution of a piezoelectrically actuated miniature swimming vehicle [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2003,8(1):66-76.
- [9] MCGOVERN S T, ABBOT M. Evaluation of thrust force generated for a robotic fish propelled with polypyrrole actuators[J]. Polymer International,2010,59:357-364.
- [10] GUO S X, SHI L W, YE X F, et al. A new jellyfish type of underwater microrobot [C]//International Conference on Mechatronics and Automation. Harbin: IEEE, 2007: 509-514.
- [11] YANG Y C, YE X F, GUO S X. A new type of jellyfish-like microrobot [C]//International Conference on Integration Technology. Shenzhen: IEEE, 2007: 509-514.
- [12] FESTO Inc. AquaJelly [EB/OL]. Germany: FESTO press, 2008 [2013-04-22]. http://www.festo.com/cms/en_corp/9772.htm.
- [13] Intelligent Systems Design & Control Laboratory. Polymer actuator [EB/OL]. Korea: Mechanical Systems Engineering, 2008 [2013-04-22]. <http://altair.chonnam.ac.kr/%7Eikoh/new%20home/pa.html>.
- [14] LIGHTHILL M J. Note on the Swimming of Slender Fish [J]. Journal of Fluids Mechanics, 1960,9:305-317.

(编辑 杨波)