

基于波速驱动机器海豚平均推进速度控制方法

任光¹ 戴亚平¹ 曹志强² 沈飞³

摘要 通过分析海豚体波推进特点,提出了波速与平均推进速度的匹配方法和工程化的速度匹配方程 (Speed-velocity matching equation, SVME),并进一步设计了基于速度匹配方程的机器海豚平均速度控制实现方法.首先,分析了海豚尾部摆动时呈现的正弦体波波特征,指出某一豚体波波速与相应海豚推进平均速度存在严格对应关系,据此给出了速度匹配系数 (Speed-velocity matching coefficient, SVMC) 定义及速度匹配方程.然后,以三关节尾部机器海豚为例,根据速度匹配关系特征,建立了三关节尾部摆动豚体波波速与推进平均速度的数学关系.最后,基于已知的速度匹配系数分布状况,采用分区线性化处理策略分别设计了开环控制方法和自校正控制实现方法.通过速度匹配系数的取值对机器海豚进行驱动与控制,机器海豚可到达目标平均速度.实验结果表明,豚体波波速与海豚平均速度存在严格对应关系,基于速度匹配系数这一数据驱动的机器海豚速度控制方法是可行的.

关键词 机器海豚, 豚体波, 速度匹配系数, 速度匹配方程, 平均推进速度, 自校正控制

引用格式 任光, 戴亚平, 曹志强, 沈飞. 基于波速驱动的机器海豚平均推进速度控制方法. 自动化学报, 2015, 41(10): 1734–1744

DOI 10.16383/j.aas.2015.c140867

An Average Propulsive Speed Control Method for a Robotic Dolphin with Wave Velocity Propulsion

REN Guang¹ DAI Ya-Ping¹ CAO Zhi-Qiang² SHEN Fei³

Abstract By analysis of dolphin's propulsion characteristics, a speed-velocity matching method and an engineering speed-velocity matching equation (SVME) are proposed to describe the relation between the average propulsive speed and the body wave velocity. Furthermore, driving methods using the speed-velocity matching coefficient (SVMC) are put forward to realize the average speed control of the robotic dolphin. Firstly, the sinusoidal body wave created by the swimming dolphin is analyzed. The corresponding relation between the average propulsive speed and the wave velocity is determined, and the SVMC and the SVME are defined. Then, taking a three-joint caudal fin robotic dolphin as an example, a mathematical relation between the average propulsive speed and the dolphin's body wave velocity is determined based on the speed-velocity matching characteristics. Finally, according to the distribution of the SVMCs, an open-loop control method and a self-tuning control method are designed by using a partition linearization policy. The SVMC is taken as a feature data and used to drive the robotic dolphin's swimming, as well as to effectively realize the average speed control. The experimental results show a strict matching relation between the average propulsive speed and the dolphin's body wave velocity, and that the average speed control method using the SVMC is feasible.

Key words Robotic dolphin, dolphin's body wave, speed-velocity matching coefficient (SVMC), speed-velocity matching equation (SVME), average propulsive speed, self-tuning control

Citation Ren Guang, Dai Ya-Ping, Cao Zhi-Qiang, Shen Fei. An average propulsive speed control method for a robotic dolphin with wave velocity propulsion. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(10): 1734–1744

数十年前,人们就开始了海豚的研究,早期的

研究多集中在海豚推进身体波特征、运动学数学描述方面,得到了不少经典的运动学方程.随后,随着机械工业和电子基础技术的发展,人们逐步制造出外形相似的机器海豚实体,模仿生物海豚游动.实际上,人们对机器海豚的研究很大程度上是尾鳍推进仿生机器鱼研究的延续,大量仿生机器鱼研究方法和成果被应用于机器海豚研究.文献 [1–2] 指出,海豚的游动模式属于鱼类鲭科模式,且其尾鳍是水平而非垂直.目前,基于特征提取的数据驱动理论与技术得到了快速发展,这为机器海豚的研究提供了新方向,将推动机器海豚实现自动识别环境,自动完成

收稿日期 2015-01-04 录用日期 2015-06-12
Manuscript received January 4, 2015; accepted June 12, 2015
本文责任编辑 侯增广

Recommended by Associate Editor HOU Zeng-Guang

1. 北京理工大学自动化学院 北京 100081 2. 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室 北京 100190 3. 中国科学院自动化研究所精密感知与控制中心 北京 100190

1. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081 2. State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190 3. Research Center of Precision Sensing and Control, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

运动控制, 成为真正意义上的智能海豚。

水动力学建模和运动学模型研究是机器海豚研究领域重要方向之一。在已有的研究中, 人们通常从流体力学角度, 探讨机器海豚与水接触的受力情况, 获得水动力学模型, 进而分析得到运动学方程。比较典型的成果有, Fish^[3-4] 研究了海豚体型对游动的影响, 指出流线型的身体和光滑紧贴的皮肤有助于减小水波对海豚游动的阻力, 而高度发达的尾部肌肉和尾鳍为海豚提供了前进的主要动力, 带有后掠角的胸鳍不但能起到平衡的作用, 更是海豚能够进行各种灵活动作的有力保证。关于生物海豚身体推进波的描述, Semyonov 等^[5] 在 1974 年给出了描述鼠海豚属和短喙真海豚的豚体波曲线数学表达式。Romanenko^[6] 提出海豚身体各部分推进波的相速度不是常量, 他通过分析海豚游动视频影像和在海豚身上安装加速度计两种方式测量海豚喙部、背鳍和尾鳍三个点的运动情况来分析这三个点之间的关系, 研究发现相速度从头至尾在显著增大, 可以近似为线性关系, 并通过实验给出了该类正弦波的近似表达式。沈飞等^[7] 采用 Kane 方法对机器海豚进行了动力学建模, 并提出了一种对豚体波拟合推进进行速度优化的方法。Nakashima 等^[8] 提出一种计算两关节机器海豚水动性能的方法。另外, Weihs^[9] 通过受力分析研究了小海豚能跟随大海豚进行游弋的原因, 同时也提出了海豚跃出水面的几个过程: 跳跃前水平游动、出水、空中滑翔、入水和跳跃后水平游动。Niiler 等^[10] 将“细长体理论”用来计算海豚的平均推进力, 分析得知海豚通过产生与游动方向相反的推进力来减速。Zhou 等^[11] 采用拉格朗日方法对一关节鲭科模式的机器鱼进行动力学建模, 水动力学分析采用“阻力模型”, 仿真得到了机器鱼的前行游动曲线, 转弯游动曲线和实时功率曲线。Yu 等^[12] 采用 Schiehlen 方法对三维游动的机器鱼, 机器海豚进行动力学建模, 仿真得到了模型的游动曲线等运动学性能曲线。汪明等^[13] 对振荡器进行建模分析, 把中枢模式发生器 (Central pattern generator, CPG) 与机器海豚关节进行配对, 建立 CPG 单元间耦合环节等, 从而获得机器海豚的链式弱耦合 CPG 运动控制模型, 并以此为基础提出一种基于 CPG 激发产生多模态振荡波形控制机器海豚运动的方法。

基于水动力学研究获得的机器海豚运动学方程, 其理论依据充分, 成果丰富。但是, 其存在明显不足。主要表现为, 模型获取过程计算复杂, 所得到的模型方程过于复杂, 且失真较大, 这造成模型实用性低, 难于用来指导海豚运动控制的实践与应用。

在机器海豚运动控制方面, 目前人们已经设计出能实现三维运动的机器海豚实体, 完成前进、转

弯和下沉等动作。如 Nakashima 等^[14] 通过尾部推进关节来实现机器海豚的俯仰运动控制, 通过背鳍和胸鳍来实现偏航和滚转运动, 采用 PID 对三种运动的控制进行了仿真和实验。由于其在偏航方向的控制效果不理想, 所以只通过协调控制机器海豚的滚转运动和俯仰运动实现了在滚转方向和俯仰方向的姿态变换控制。Yu 等^[15] 通过控制机器海豚尾部的拍动频率和幅度实现了对机器海豚的速度控制, 通过控制转弯关节实现了机器海豚的偏航控制。但是, 该方法控制是没有反馈的开环控制。Yu 等^[16] 通过将动态轨迹法用于机器海豚, 实现了机器海豚的精准俯仰控制, 并首次完成了前滚翻与后滚翻的控制与实验。通过对比机器海豚的俯仰角速度与偏航角速度, 印证了真实海豚在不同方向上的运动性能的差异。Wang 等^[17] 利用 CPG 来实现机器海豚的推进控制。Shen 等^[18] 提出一种基于模糊 PID 控制的机器海豚定深控制方法。在智能开关上引入非线性积分环节, 很好地处理了在定深控制过程中由于尾部浮力变化等因素带来的稳态误差问题。

上述运动控制的研究对不同的运动情形进行了理论和实验探索。然而, 专门针对机器海豚的平均推进速度的控制研究较少。近年来, 平均推进速度具有越来越重要的实际应用意义。比如在水质监测领域, 机器海豚搭载水质传感器在大片水域自由游动, 收集水体各项参数指标。这需要海豚具有一定的自动调节速度的能力, 以便在人工指令无法到达时能顺利完成巡游任务。在深海探测中, 机器海豚搭载探测装备下潜, 在人们难于进入的危险水域搜寻目标等, 这也需要机器海豚自动控制前进速度。比如, 2014 年 3 月 8 日, 在马来西亚航空公司飞机坠落事件中, 可使用类似机器海豚的潜水设备对目标海域进行搜寻。

为了实现机器海豚平均推进速度的自我控制, 本文研究了一种基于波速驱动的推进速度控制方法。首先针对水动力学建模方法的不足, 采用特征提取方法, 对机器海豚运动学特征进行分析, 获得海豚尾部摆动正弦波波速与推进平均速度之间存在严格匹配关系, 并给出了速度匹配系数 (Speed-velocity matching coefficient, SVMC) 定义。接着, 以三关节尾部机器海豚为例, 具体分析获得了工程化的速度匹配方程 (Speed-velocity matching equation, SVMME)。然后, 以速度匹配方程为基础, 基于速度匹配系数这一特征数据, 分别设计了开环控制和自校正控制实现系统。这项研究表明, 速度匹配系数可用来驱动机器海豚动力机构, 而开环控制和自校正控制方法能实现机器海豚按目标平均速度推进的目标。

1 豚体波推进特征提取

1.1 豚体波分析

海豚游动快速灵活, 推进效率高, 这与其独特的尾部摆动方式密切相关. 生物海豚身体后端摆动时呈现出豚体波形状, 可实现高效率的推进与减阻机制. 尾鳍摆动的同时, 海豚身体后端的三分之一部分呈现类似正弦豚体波形状, 且频率与尾鳍摆动频率一致, 使得海豚运动时可有效减少水体阻力. 图 1 给出了海豚游动时的尾部摆动情形.

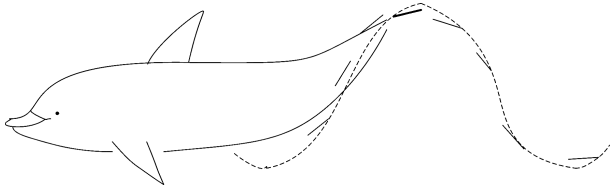


图 1 海豚尾部摆动波形

Fig. 1 The swing waveform of robotic dolphin's tail

图 1 所示豚体波呈现出类似正弦波特征, 代表了海豚后端豚体的运动轨迹. 尾鳍与身体后端组合摆动是动力主要来源.

1.2 速度匹配特征提取

观察生物海豚的运动发现, 海豚游动时, 尾部的摆动频率与海豚前进速度直接相关. 摆动越快, 前进速度越大, 摆动越慢, 前进速度越小. 对图 1 所示尾部波形进行观察, 可发现摆动频率与豚体波的波长及波速有直接的对应关系. 进一步的分析可知, 在一段较长运动时间内考虑, 当豚体波波长固定时, 豚体波波速与海豚前进速度有严格的匹配关系. 即波速越大, 海豚前进平均速度越快, 波速越小, 前进平均速度越慢.

为了研究豚体波波速对海豚对游动速度的影响, 可提取速度匹配关系来描述波速与前进速度的匹配特征.

定义 1. 速度匹配系数

海豚游动时, 当尾部豚体波波速稳定时, 即有稳定的波长和频率, 海豚前进平均速度也会稳定. 波速与前进速度之间有严格的匹配关系称为速度匹配关系. 相应地, 分别采样前进平均速度与波速, 其比值可定义为速度匹配系数, 记为 c .

根据速度匹配系数, 可得到海豚运动时速度匹配方程:

$$V = cv \quad (1)$$

$$v = \lambda f \quad (2)$$

其中, V 是海豚游动平均速度, c 是速度匹配系数, v

是豚体波波速, λ 是波长, f 是尾部摆动频率.

速度匹配系数是海豚运动的一个特征数据. 系数的值与海豚的质量、体型和豚体波波长等因素有关, 当这物理特点固定时, 一个尾部摆动频率仅对应一个速度匹配系数. 这一特点使得速度匹配系数可以被用来驱动机器海豚运动.

对于机器海豚而言, 实验观察表明, 当尾关节的摆动频率和幅度固定时, 机器海豚的平均游动速度也会稳定. 而尾关节的摆动会组合形成一个类正弦波, 用这个类正弦波替代豚体波, 即可把速度匹配特征提取出来. 这种替代的可行性需要结合合适的控制方法, 并通过机器海豚平均速度控制实验加以验证.

2 工程化速度匹配方程

2.1 豚体波拟合

以三关节尾鳍机器海豚为例, 如下设计给出了工程化豚体波拟合过程. 根据 Romanenko 对海豚运动学的研究, 海豚尾部中心线的摆动运动方程如下^[6]:

$$h(x_n, t) = h^T f(x_n) \sin 2\pi f t \quad (3)$$

式中, x_n 表示尾部质点到海豚喙部距离; h^T 表示尾鳍最大摆幅; $f(x_n)$ 表示各质点波幅函数. 文献 [19] 给出了一个简化的工程化波幅函数:

$$f(x_n) = 0.1 - 1.3x_n + 2.2x_n^2 \quad (4)$$

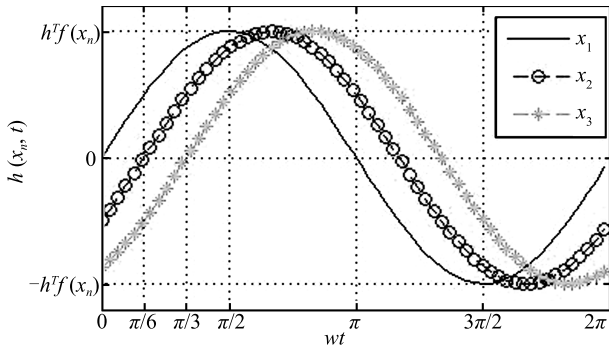
式 (3) 和式 (4) 描述了海豚尾部摆动运动情形, 当采用三个关节拟合时, 要求三个关节呈现无相位差的摆动特点. 而生物海豚的尾部摆动却呈现出豚体波特征, 即三个关节摆动存在相位差. 当采用三个关节拟合方程 (3) 和图 1 所示豚体波摆动情形时, 关节摆动方程如下:

$$\begin{cases} h(x_1, t) = h^T f(x_1) \sin 2\pi f t \\ h(x_2, t) = h^T f(x_2) \sin(2\pi f - \phi_1) t \\ h(x_3, t) = h^T f(x_3) \sin(2\pi f - \phi_2) t \end{cases} \quad (5)$$

其中, x_1 、 x_2 和 x_3 是三个关节的质心位置, 原点是海豚喙部; $h^T f(x_1)$ 、 $h^T f(x_2)$ 和 $h^T f(x_3)$ 是三个关节最大幅度角; ϕ_1 和 ϕ_2 是关节相位差. 相位差的存在使得机器海豚尾部摆动呈现出豚体波特征. 以相位差都为 $\pi/6$ 为例, 图 2 给出了三个关节的摆动情形.

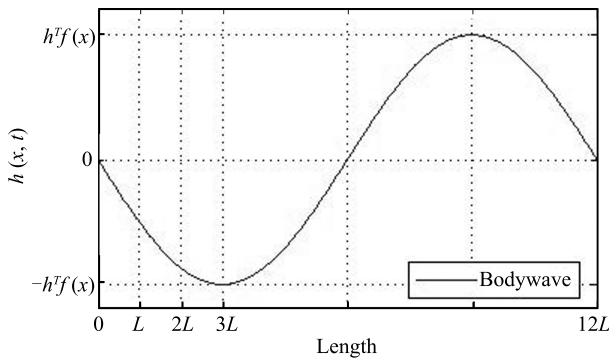
图 2(a) 的关节摆动特点使得机器海豚尾部呈现出 2(b) 所示的类似正弦豚体波. 豚体波实际上是一种延伸的波形, 机器海豚的尾部实体只占据图

2(b) 中从 0 到 $3L$ 的部分. 其中, L 是一个尾部关节的物理长度. 通过尾部长度和相位差, 可以计算得到豚体波的波长.



(a) ϕ_1 和 ϕ_2 为 $\pi/6$ 时关节摆动情形

(a) The swing situation of joints when ϕ_1 and ϕ_2 are $\pi/6$



(b) 关节合成豚体波波形

(b) The combined dolphin's body waveform

图 2 机器海豚尾部拟合正弦波

Fig. 2 The fitted sinusoidal waveform of robotic dolphin's tail

考虑式 (5), 其中的关节相位差 ϕ_1 与 ϕ_2 是需要预先设定的, 而 ϕ_1 和 ϕ_2 的取值与机器海豚一个尾部关节的实际长度共同决定了豚体波的波长. 当豚体波波长固定时, 由波速与频率的数学关系式 (2) 可知, 波动频率与波速成正比. 结合速度匹配系数的定义, 进一步分析可知, 波动频率与推进速度成正比关系. 从水体力学角度看, 摆动频率越大, 尾鳍受到的推力越大, 机器海豚推进速度越大.

水体环境下机器海豚尾部摆动的力学过程非常复杂, 需要考虑的因素很多. 采用尾部关节拟合豚体波时, 并不能完全反映豚体部分的受力状况. 但是, 关节拟合豚体波是已知最可行的研究途径. 而且, 通过采用合适的控制实现方法, 拟合误差不会影响机器海豚的速度控制实现的效果. 当运用速度匹配原理来实现机器海豚的推进运动时, 已把速度控制问题转化为一类纯控制问题.

2.2 速度匹配方程

设关节拟合形成豚体波波长为 λ , 通过图 2(a) 和图 2(b) 对比, 有如下方程:

$$\frac{\phi_1 + \phi_2}{2\pi} = \frac{2L}{\lambda} \quad (6)$$

计算得到豚体波波长为

$$\lambda = \frac{4\pi L}{\phi_1 + \phi_2} \quad (7)$$

由波长与波速的关系, 可知波速为

$$v = \frac{4\pi L f}{\phi_1 + \phi_2} \quad (8)$$

由速度匹配关系, 可得工程化速度匹配方程:

$$V = c \frac{4\pi L f}{\phi_1 + \phi_2} \quad (9)$$

式 (9) 即是基于摆动频率控制的速度匹配方程. 速度匹配方程 (9) 的波速控制表达式为

$$V = c \frac{4\pi L}{(\phi_1 + \phi_2)\lambda} v \quad (10)$$

工程化速度匹配方程具有如下特点:

1) 速度匹配系数给出了特定波速与推进平均速度的对应关系, 但是它不是一个常量, 不同的波速下系数不同;

2) 速度匹配方程是一个非线性方程, 应用于速度控制时需要采用合适的控制方法, 比如各类智能控制方法;

3) 速度匹配系数用于驱动机器海豚时, 需要预先离线辨识系数, 即部分已知速度匹配系数.

注 1. 式 (3)~(5) 中的坐标原点是海豚喙部, 而采用关节拟合机器海豚尾部摆动实验时, 关节摆动方程中是幅度角方程, 且幅度角的坐标原点是各自的连接点. 因此, 关节摆动实验中需要把摆动方程进行转换. 但是, 不论是基于哪个坐标原点所获得的幅度, 只要幅度值不变, 都不会影响推进效果. 式 (9) 和式 (10) 给出的速度方程说明, 最大幅度或幅度角是固定的, 与速度控制无关.

3 工程化速度匹配方程

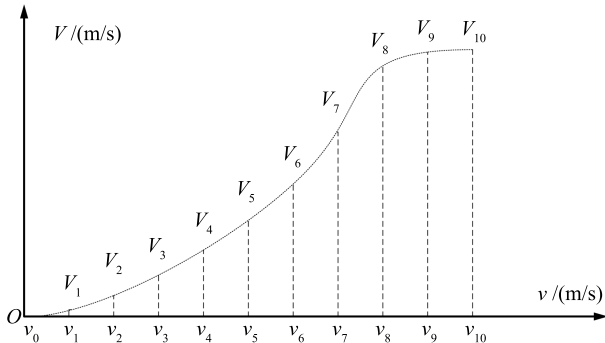
速度匹配系数 (SVMC) 表征了稳态下豚体波波速与机器海豚推进平均速度对应关系, 是一类特征数据. 结合速度匹配方程 (10), 可以产生期望平均速度目标下的尾部摆动波速, 建立基于特征数据的驱动控制实现系统.

速度匹配方程 (SVMC) 本质上是一类参考模型, 且含有速度匹配系数这个需要辨识的不确定参

数. 在离线辨识时, 实际上完成了一个模型定点校准过程, 或者说是一个模型与机器海豚在该水体环境下的定点无缝对接过程, 校准或对接的关键就在速度匹配系数的辨识值上. 为了实现对机器海豚的准确驱动, 需要已知速度匹配系数的分布状况, 并建立分布函数.

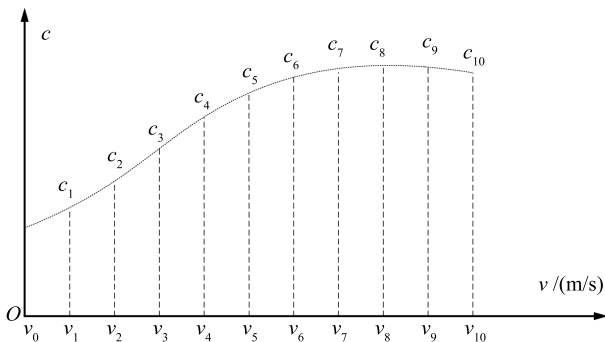
3.1 分区离线辨识与区间线性化

假设豚体波推进下的波速与平均推进速度关系已知, 且其分布如图 3 所示.



(a) 波速与推进平均速度对应

(a) The matching relation between waveform velocity and propulsion speed



(b) 相应的速度匹配系数

(b) The corresponding SVMC

图 3 豚体波波速与平均推进速度假设分布情形

Fig. 3 The supposed distribution of the body's waveform and the average speed

图 3(a) 中, 把豚体波波速划分为 10 个区间, 分别从 v_1 到 v_{10} . 与此对应, 随着豚体波波速的增加, 不同波速下对应的机器海豚平均速度从 V_1 增大至 V_{10} . 相应地, 由式 (8)~(10) 可得, 在各点的速度匹配系数为 $c_1 \sim c_{10}$, 如图 3(b) 所示.

根据图 3 所示区间划分规律, 对于任意机器海豚推进速度目标 V_d , 系统需要直接让速度匹配系数进入相应区间, 系统将在该区间封闭运行. 由于区间范围较小, 速度匹配系数可近似处理为线性变化. 因此, 可建立该区间内速度匹配系数线性化函数:

$$c_d = c_i + \frac{c_{i+1} - c_i}{V_{i+1} - V_i} (V_d - V_i) \quad (11)$$

式中, c_d 是目标速度相应的匹配系数值, c_{i+1} 和 c_i 分别是所在区间的匹配系数上界和下界, V_{i+1} 和 V_i 是所在区间速度上界和下界.

图 3 给出的分区本质上是一种数据库. 当分区间隔足够小时, 就等同于全覆盖的离线辨识. 此时, 只需要读取速度匹配系数, 产生驱动信号就可以达到目标速度. 但是, 全覆盖离线辨识有两个不足之处: 1) 需要太大的辨识工作量; 2) 一旦机器海豚物理参数或水环境发生变化时, 数据库就需要重新辨识. 事实上, 机器海豚的物理参数是会变化的. 如充气量变化、搭载装置变化等. 因此, 有限的分区及区间线性化方法提供了可行的途径, 既能减少离线辨识工作量, 也可引入反馈控制使得系统适应速度匹配系数真值的变化.

3.2 开环控制

获得图 3 所示的速度匹配系数分布数据后, 即可通过区间线性化函数 (11) 计算获得 V_0 到 V_{10} 范围内任意目标速度下的速度匹配系数, 并基于这个速度匹配系数值产生控制输入角速度, 从而实现机器海豚的开环控制.

依据区间线性化函数 (11), 得到当前目标速度 V_d 对应的速度匹配系数值. 依据该值设计开环控制波速输入:

$$v = \frac{V_d}{c_d} \quad (12)$$

式 (12) 给出了基于特征数据-速度匹配系数的输入波速. 把 c_d 代入后, 可获得摆动相应频率输入的表达式:

$$f = \frac{V_d(V_{i+1} - V_i)}{c_i(V_{i+1} - V_i) + (c_{i+1} - c_i)(V_d - V_i)} \quad (13)$$

理论上, 输入该摆动频率运行后, 机器海豚平均推进速度会接近于 V_d . 在精确性要求不是特别高的情况下, 该开环控制基本可以有效地到达目标速度.

3.3 自校正控制实现

当水环境出现大的变化, 或者机器海豚需要充气、需要搭载传感装置时, 都会造成海豚物理参数的变化, 前述开环控制的效果会出现较大误差. 另外, 区间线性化处理函数 (11) 也会带来少量误差, 需要引入反馈控制来加以修正.

针对这些复杂随机的因素, 设计出基于迭代辨识和自校正的控制实现方法, 以减少输出平均速度误差. 图 4 给出了系统原理框图.

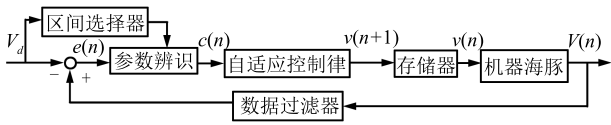


图 4 基于速度匹配系数的自校正控制系统
Fig. 4 Self-tuning system based on SVMC

图 4 中, $e(n)$ 是速度测量误差, $V(n)$ 是测量平均速度, n 是采样序列号. 按照系统运行过程, 分别给出具体设计如下.

1) 区间选择器设计

$$c(0) = c_i + \frac{c_{i+1} - c_i}{V_{i+1} - V_i}(V_d - V_i), \quad V_i < V_d < V_{i+1} \quad (14)$$

式中, $c(0)$ 表示速度匹配系数初始值. 输出误差方程:

$$e(n) = V(n) - V_d \quad (15)$$

2) 参数迭代辨识律

$$c(n) = c(n-1) + \rho \frac{c_{i+1} - c_i}{V_{i+1} - V_i} e(n) \quad (16)$$

其中, $c(n)$ 是速度反馈后的匹配系数调整值 ρ 为一常数, 且有 $0 < \rho < 1$.

3) 自校正律

$$v(n+1) = \frac{V_d}{c(n)} \quad (17)$$

4) 数据过滤器

$$V(n) = \begin{cases} V_d, & V(n) < V_i \text{ 或 } V(n) > V_{i+1} \\ V(n), & V_i \leq V(n) \leq V_{i+1} \end{cases} \quad (18)$$

其中, 区间选择器和数据过滤器是两个约束措施, 确保系统快速收敛, 不会发散.

3.4 收敛性分析

对于由区间选择器 (14)、数据过滤器 (18) 和误差方程 (15)、参数辨识律 (16) 以及自校正律 (17) 组成的控制系统, 具有如下性质.

- 1) 系统所有信号有界;
- 2) 当 n 趋近于无穷大时, 系统误差趋近于零, 即:

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} e(n) = 0$$

证明. 1) 当目标速度 V_d 给定后, 区间选择器会自动计算获得 $c(0)$. 而且, 依据已知的系数库可确定 $c(0)$ 所在区间, 即系统运行的区间. 由参数迭代律 (16) 可知, $c(n)$ 具有单调性, 且其上下界分别

为 $[c_i, c_d]$ 或 $[c_d, c_{i+1}]$. $c(n)$ 单调性有两种情况, 当 $e(1) > 0$ 时, 由于 c_i 与 V_i 具有直接对应匹配关系, 且 $0 < \rho \leq 1$, 使得 $c(n)$ 处于不充分单向增加状态, 且在区间 $[c_d, c_{i+1}]$ 内; 类推, 当 $e(1) < 0$ 时, $c(n)$ 处于不充分单向减小状态, 且在区间 $[c_i, c_d]$ 内.

由自校正律 (17) 可知, $v(n+1)$ 有界, 且其界为 $[V_d/c_i, V_d/c_d]$ 或 $[V_d/c_d, V_d/c_{i+1}]$. 输出速度也有界, 且其界为 $[c_0 V_d/c_i, c_0 V_d/c_d]$ 或 $[c_0 V_d/c_d, c_0 V_d/c_{i+1}]$, c_0 为真值.

此外, 从工程应用的角度, 区间选择器 (14) 对速度匹配系数进行了限制, 因此可知 $c(n)$ 有界; 根据自校正律 (17), 可知输入波速 $v(n+1)$ 有界; 同样, 由数据过滤器 (18) 可知, 输出平均推进速度 $V(n)$ 有界.

2) 由自校正律 (17) 可知, 输入波速取决于当前速度匹配系数 $c(n)$. 因此, 系统的收敛性取决于 $c(n)$ 的收敛性.

令目标速度 V_d 对应的速度匹配系数真值为 c_0 , 且处于第 i 区间. 第 i 个区间速度匹配系数与输出平均速度的变化关系如图 5 所示.

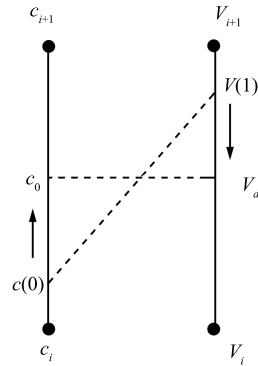


图 5 系数匹配与调整规律

Fig. 5 Parameter matching and adjusting law

由误差方程 (15) 和参数线性化处理及更新律 (16):

$$c(n) = c(n-1) + \rho \frac{c_{i+1} - c_i}{V_{i+1} - V_i} [V(n) - V_d] \quad (19)$$

图 5 中, 速度匹配系数与速度调整有如下关系:

$$\frac{c_0 - c(0)}{c_{i+1} - c_i} = \frac{V(1) - V_d}{V_{i+1} - V_i} \quad (20)$$

对于第 n 次运行, 有:

$$\frac{c_0 - c(n-1)}{c_{i+1} - c_i} = \frac{V(n) - V_d}{V_{i+1} - V_i} \quad (21)$$

将式 (21) 代入式 (19):

$$c(n) = \rho c_0 - (1 - \rho)c(n-1) \quad (22)$$

对于第 $n-1$ 次运行, 有:

$$c(n-1) = \rho c_0 - (1-\rho)c(n-2) \quad (23)$$

将式 (22) 减去式 (23):

$$c(n) - c(n-1) = (1-\rho)[c(n-1) - c(n-2)] \quad (24)$$

对于式 (24), 当 $c(n-1) > c(n-2)$, 由于 $(1-\rho) > 0$, 必有: $c(n) > c(n-1)$. 当 $c(n-1) < c(n-2)$, 由于 $(1-\rho) > 0$, 必有: $c(n) < c(n-1)$. 这说明, $c(n)$ 相对于 $c(n-1)$ 的变化方向决定了 $c(n)$ 的变化方向, 且极值为 c_0 .

当 $V(1) > V_d$ 时, 误差为正. 由式 (19) 可知, $c(1) > c(0)$, $c(n)$ 单调递增, 即 $c(n) > c(n-1)$. 此时, 考虑误差变化:

$$e(n+1) - e(n) = \frac{c_0}{c(n)} V_d - \frac{c_0}{c(n-1)} V_d \quad (25)$$

计算得:

$$e(n+1) - e(n) = \frac{c(n-1) - c(n)}{c(n)c(n-1)} c_0 V_d \quad (26)$$

因为 $c(n) > c(n-1)$, 且式 (26) 右边其他变量和常量都为正, 故有 $e(n+1) - e(n) < 0$, 即 $e(n+1) < e(n)$. 这说明误差单调递减, 且当 $c(n) = c_0$ 时, $V(n) = V_d$, 此时, 有下式成立:

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} e(n) = 0 \quad (27)$$

当 $V(1) < V_d$ 时, 误差为负. 由式 (19) 可知, $c(1) < c(0)$, $c(n)$ 单调递减, 即 $c(n) < c(n-1)$. 同上类推, 说明误差单调递增, 亦可得到式 (27). \square

从控制过程来说, 式 (15)、式 (16) 和式 (17) 组成系统是一类自校正控制系统. 但是, 由于分区离线辨识数据库的引入, 且参数的辨识采用了一阶迭代学习机制, 使得运行过程具有数据驱动控制的特点, 类似于迭代学习控制系统或重复学习控制系统. 不过, 根据文献 [20-21], 它不完全符合迭代学习控制的现有定义, 因为系统是在无限区间运行; 也不完全符合重复学习控制的现有定义, 因为被学习量 $c(n)$ 不满足周期性要求.

4 实验

速度匹配方程可以用来驱动机器海豚, 而速度匹配系数的取值则直接决定了输入波速或输入摆动频率的值. 实验分为三个步骤进行: 1) 通过离线辨识进行分区, 得到 10 个区间点的速度匹配系数值、输入摆动频率、波速和输出平均速度, 建立数据库; 2) 针对给定的目标速度, 通过区间线性化函数来确

定对应的速度匹配系数值, 进行基于速度匹配系数的开环控制; 3) 把区间线性化函数获得的速度匹配系数值作为初始值, 采用自校正控制方法, 以获得更好精确性和自适应性. 并把开环控制和自校正控制推进实验效果进行对比.

4.1 区间速度匹配系数辨识

针对图 3 给出的分区情形, 一条机器海豚被用来执行离线辨识实验. 机器海豚物理参数和实验参数如表 1 所示.

表 1 机器海豚物理参数及实验参数

Table 1 Physical and experimental parameters of robotic dolphin

| 实验参数 | 设置 |
|--------------|-----------------------|
| 长 × 宽 × 高 | 80 cm × 36 cm × 24 cm |
| 海豚质量 | 9.2 kg |
| 关节数量 | 3 |
| 关节长度 | 0.1 m |
| 通信方式 | Wireless |
| 速度测量 | Ultrasonic |
| 相位差 ϕ_1 | $\pi/12$ |
| 相位差 ϕ_2 | $\pi/12$ |
| 测试距离 | 5 m |

在 5 米的距离内重复游动测试 3 次, 获取平均游动时间. 图 6 给出了机器海豚原型机及离线辨识实验场景.

测量获得游动时间后, 依据式 (8) 和式 (10), 计算得到分区结果, 如表 2 所示.

表 2 辨识结果

Table 2 Identification results

| 区间点 i | f_i | v_i | V_i | c_i |
|---------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 0.28 | 0.672 | 0.02 | 0.03 |
| 2 | 0.56 | 1.344 | 0.05 | 0.037 |
| 3 | 0.84 | 2.016 | 0.1 | 0.05 |
| 4 | 1.12 | 2.688 | 0.16 | 0.06 |
| 5 | 1.4 | 3.36 | 0.22 | 0.065 |
| 6 | 1.68 | 4.032 | 0.28 | 0.07 |
| 7 | 1.96 | 4.704 | 0.34 | 0.072 |
| 8 | 2.24 | 5.376 | 0.4 | 0.074 |
| 9 | 2.52 | 6.048 | 0.36 | 0.06 |
| 10 | 2.8 | 6.72 | 0.28 | 0.04 |



(a) 机器海豚原型机
(a) Dolphin phototype



(b) 离线辨识场景
(b) Offline identification scene
图 6 机器海豚离线辨识实验

Fig. 6 Offline identification experiment of robotic dolphin

表 2 中, 摆动频率 f_i 为任意给定的输入, 并给出了在该频率下对应的波速 v_i . 测量在 5 米距离游动所需的时间后, 计算出平均速度 V_i ; 并根据式 (9) 计算出 c_i , 表 2 把海豚游动速度划分为 10 个不同的区间. 在控制应用中, 只需要给定目标速度, 便可找到相应的区间点下界和上界, 把各信号和参数限制在该范围运行. 这使得机器海豚在高复杂性和随机性的水环境中可以顺利游动.

4.2 速度控制实验

1) 开环控制

给定目标速度为 0.3 m/s, 它在表 2 中位于区间点 6 和 7 之间. 因此, c_i 为 0.07, c_{i+1} 为 0.072, V_i 为 0.28, V_{i+1} 为 0.34. 依据表 1 中的相位差和关节长度, 结合速度匹配系数区间线性化函数 (11), 计算得到:

$$c_d = 0.0707 \quad (28)$$

根据式 (12) 和式 (8), 计算相应的波速和摆动频率:

$$v = 4.2433 \quad (29)$$

$$f = 1.768 \quad (30)$$

采用速度匹配系数 0.0707 重复测试 10 次, 测试场景同图 6 所示. 采用人工方法测量平均速度, 测量结果如图 7 所示.

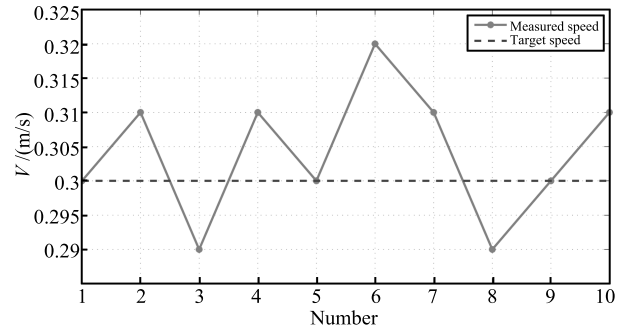


图 7 目标速度 0.3 m/s 测试结果
Fig. 7 The measured results for the speed target of 0.3 m/s

开环控制实验表明, 速度匹配系数可以被用来驱动机器海豚推进运动. 而且, 从图 7 可以看到, 输出速度多次偏大于目标速度 0.3 m/s, 这表明速度匹配系数估计略微偏小.

2) 自校正控制

开环控制存在少量误差, 其原因在于速度匹配系数估值有误差. 而且, 开环控制方法不能适应水环境变化造成的速度匹配系数真值偏移. 依据表 2 所示分区结果, 同样以 0.3 m/s 平均速度为目标, 设计机器海豚推进运动闭环控制系统如下.

依据表 1 中的相位差和关节长度, 速度匹配方程 (10) 和式 (8) 可写为

$$V(n) = c(n)v(n) \quad (31)$$

$$v(n) = 2.4f(n) \quad (32)$$

区间选择器:

$$c(0) = 0.0707 \quad (33)$$

输出误差方程:

$$e(n) = V(n) - 0.3 \quad (34)$$

参数迭代辨识律:

$$c(n) = c(n-1) + \frac{\rho}{30}e(n) \quad (35)$$

其中, 设定 $\rho = 0.9$. 自校正律:

$$v(n+1) = \frac{0.3}{c(n)} \quad (36)$$

数据过滤器:

$$V(n) = \begin{cases} 0.3, & V(n) < 0.28 \text{ 且 } V(n) > 0.34 \\ V(n), & 0.28 \leq V(n) \leq 0.34 \end{cases} \quad (37)$$

一个长约 20 米的小型水池被用来执行游动实验, 图 8 给出了实验场景. 速度测量采用对射式超声波测距仪. 一发一收, 发射周期 0.443 秒, 每接受一次测距信息即计算一次速度.

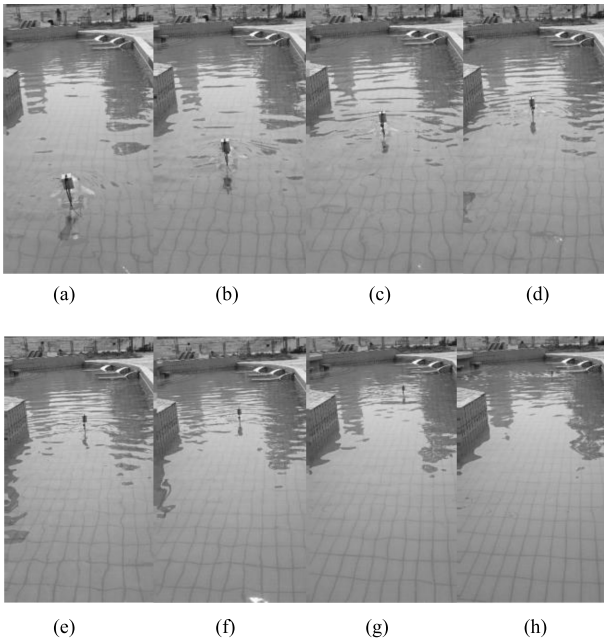


图 8 实验场景

Fig. 8 The experimental scene

设置速度反馈周期为 2 秒, 取前面 4 个速度信息平均值作为速度测量值. 测量速度区间限制在 0.28 m/s 与 0.34 m/s 之间, 超出区间的反馈值自动丢失. 机器海豚游动过程中, 输出平均速度和速度匹配系数取值变化如图 9 所示.

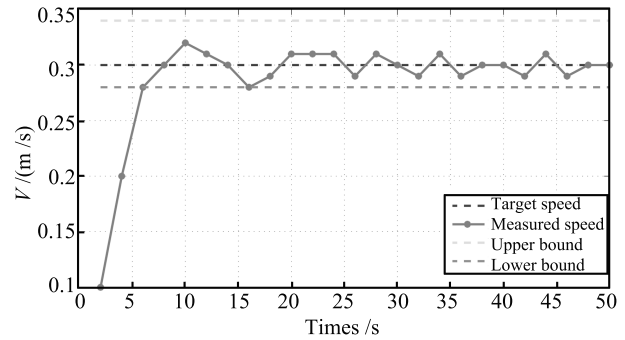
在图 9(a) 中, 区间选择器把速度匹配系数初值定位于 0.0707, 这期间所测量的速度反馈由于超出区间范围都自动丢失, 不形成反馈, 故机器海豚直接加速到目标速度附近.

一旦测量平均速度进入区间 [0.28, 0.34], 海豚进入反馈控制状态. 在反馈控制中, 数据过滤器对超出范围的测量速度进行限制, 测量到的速度值只有处于 [0.28, 0.34] 之间, 才视为有效数据. 可以看到第 20 秒到 24 秒之间, 状态没有调整, 表明测量平均速度超出了区间范围, 即超出图 9(a) 和图 9(b) 中的 upper bound 和 lower bound, 数据无效, 被自动过滤.

在全部的 50 秒游动过程中, 机器海豚基本围绕目标速度上下波动, 而这种波动主要是由测量装置和测量手段造成, 准确的反馈将会把波动降低到最小, 到达目标平均速度.

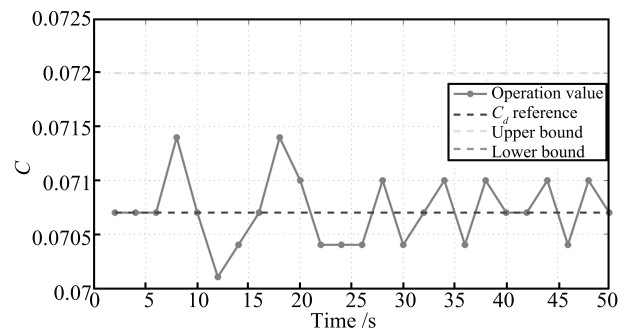
与图 9(a) 对应, 图 9(b) 给出了速度匹配系数根据测量速度自动更新过程. 速度匹配系数依据式

(15) 进行逐次修正, 更新值将被用来产生新的摆动频率, 实现推进速度调整.



(a) 平均速度测量值

(a) The measured average speed



(b) 速度匹配系数驱动值

(b) The SVMC value

图 9 平均速度测量值变化及相应速度匹配系数

Fig. 9 The average speed value and the corresponding SVMC

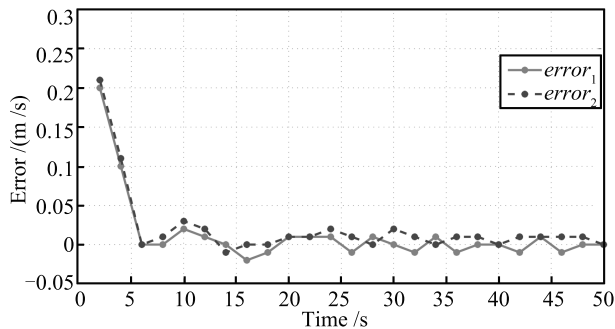
3) 实验对比

开环控制与自校正控制在平均速度调节效果上不完全一致, 图 10 给出了两种驱动方式下控制效果的差异.

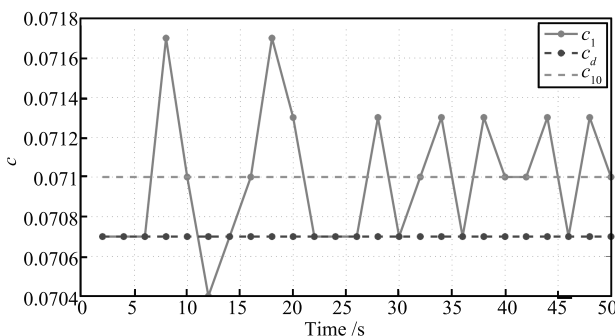
图 10(a) 给出了测量速度误差对比. 其中, $error_1$ 是自校正控制速度误差情形, $error_2$ 是开环控制速度误差情形. 从图中可看出, 自校正控制速度误差整体围绕零上下波动, 在 50 秒内整体平均误差基本为零, 且波动主要是测量精度不足造成. 而开环控制速度误差在大多数测量反馈中为正值, 在 50 秒内整体平均误差为正, 表明速度偏大于目标速度. 在测量装置精确无误的情况下, 自校正控制速度误差为零, 不会波动; 而开环控制误差为一个较小的正数.

图 10(b) 给出了速度匹配系数运行取值情形. 其中, c_1 是自校正运行时系数取值, c_{10} 是 50 秒运行期间整体平均值, c_d 是开环控制系数值, 是基于线性化处理函数 (11) 估计得到的常量. 对比可看出, 自校正运行值略大于开环控制运行值. 结合图 10(a)

速度控制结果, 可以看到, 开环控制值偏小与目标速度 0.3 m/s 所对应的真实速度匹配系数值。



(a) 开环控制与自校正控制速度误差对比
(a) The contrast of errors between open control and self-tuning control



(b) 速度匹配系数对比
(b) The contrast of SVMC

图 10 开环控制与自校正控制运行结果对比

Fig. 10 The contrast between the open-loop driven and the self-tuning control

对比结果说明, 自校正控制能更准确地实现目标速度控制, 并能通过求取整体平均值来获得更精确的速度匹配系数值。

5 结论

本文采取特征提取方法, 探讨了生物海豚游动时所呈现出来的豚体波推进特点, 定义了速度匹配系数, 并分析获得速度匹配方程。然后, 以三关节推进机器海豚为例, 详细研究了以速度匹配系数驱动海豚推进的方法和途径, 分别采用开环控制和自校正控制方法获得机器海豚目标平均推进速度。具体实现中, 一方面采取分区线性化方法, 快速定位速度匹配系数值, 通过区间选择器把机器海豚限制在某有限区间运行; 另一方面, 设计数据过滤器把机器海豚运行过程的数据信息进行过滤, 对测量速度反馈值进行区间限制, 确保自校正控制系统的有效运行。实验表明, 速度匹配系数可以用来驱动机器海豚运动, 在平均速度这一性能指标上获得预期效果。

本文有两个主要贡献: 1) 提出了速度匹配系数 (SVMC) 和速度匹配方程 (SVME), 描述了海豚游动的重要特征, 为推进速度控制提供了理论和数据基础; 2) 设计了基于速度匹配系数的驱动控制系统, 并实现了开环控制和基于分区线性化的自校正控制, 把推进速度控制转化为一类纯控制问题, 为机器海豚的平均速度控制提供了一条途径。未来的研究可包括如下: 对机器的豚体波波长与推进效率的关系进行深入研究, 以便获得不同物理特征的机器海豚最佳关节相位差; 采用新的数据控制方法, 运用速度匹配系数驱动机器海豚前进, 在稳定性和快速调节上取得更好的性能等。

References

- Magnuson J J. Locomotion by scombroid fishes: hydromechanics, morphology and behavior. *Fish Physiology*. New York: Academic Press, 1978, 7: 239–313
- Lighthill M J. Aquatic animal propulsion of high hydromechanical efficiency. *Journal of Fluid Mechanics*, 1970, 44(2): 265–301
- Fish F E. Influence of hydrodynamic — design and propulsive mode on mammalian swimming energetics. *Australian Journal of Zoology*, 1993, 42(1): 79–101
- Fish F E. Comparative kinematics and hydrodynamics of odontocete cetaceans: morphological and ecological correlates with swimming performance. *Journal of Experimental Biology*, 1998, 201: 2867–2877
- Semyonov B N, Babenko V V, Kayan V P. Experimental study of some peculiarities of dolphins' swimming hydrodynamic. *Bionika*, 1974, 8: 23–31
- Romanenko E V. *Fish and Dolphin Swimming*. Moscow: Pensoft, 2002.
- Shen Fei, Cao Zhi-Qiang, Xu De, Zhou Chao. A dynamic model of robotic dolphin based on Kane method and its speed optimization method. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(8): 1247–1256
(沈飞, 曹志强, 徐德, 周超. 基于 Kane 方法的机器海豚动力学建模及速度优化方法. *自动化学报*, 2012, 38(8): 1247–1256)
- Nakashima M, Ono K. A simple calculation method to analyze the dynamics of carangiform propulsion. In: Proceedings of the 11th International Symposium on UUS Technology. AUSI, 1999. 320–329
- Weihls D. The hydrodynamics of dolphin drafting. *Journal of Biology*, 2004, 3(2): 8–8
- Niiler P P, White H J. Note on the swimming deceleration of a dolphin. *Journal of Fluid Mechanics*, 1969, 38(3): 613–617
- Zhou C, Cao Z Q, Wang S, Tan M. The design, modelling and implementation of a miniature biomimetic robotic fish. *International Journal of Robotics and Automation*, 2010, 25(3): 210–216
- Yu J Z, Liu L Z, Tan M. Three-dimensional dynamic modelling of robotic fish: simulations and experiments. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2008, 30(3–4): 239–258

- 13 Wang Ming, Yu Jun-Zhi, Tan Min, Wang Hui-Dong, Li Cheng-Dong. CPG-based multi-modal swimming control for robotic dolphin. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(9): 1933–1941
(汪明, 喻俊志, 谭民, 王会东, 李成栋. 机器海豚多模态游动 CPG 控制. 自动化学报, 2014, **40**(9): 1933–1941)
- 14 Nakashima M, Tsubaki T, Ono K. Three-dimensional movement in water of the dolphin robot-control between two positions by roll and pitch combination. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2006, **18**(3): 347–355
- 15 Yu J Z, Hu Y H, Fan R F, Wang L, Huo J Y. Construction and control of biomimetic robotic dolphin. In: Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Orlando, Florida: IEEE, 2006. 2311–2316
- 16 Yu J Z, Su Z S, Wang M, Tan M, Zhang J W. Control of yaw and pitch maneuvers of a multilink dolphin robot. *IEEE Transactions on Robotics*, 2012, **28**(2): 318–329
- 17 Wang M, Yu J Z, Tan M, Zhang J W. Design and implementation of a novel CPG-based locomotion controller for robotic dolphin. In: Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation. Jinan, China: IEEE, 2010. 1611–1616
- 18 Shen F, Cao Z Q, Zhou C, Xu D, Gu N. Depth control for robotic dolphin based on fuzzy PID control. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2013, **23**(3): 166–171
- 19 Yu J Z, Hu Y H, Fan R F, Wang L, Huo J Y. Mechanical design and motion control of a biomimetic robotic dolphin. *Advanced Robotics*, 2007, **21**(3–4): 499–513
- 20 Hou Zhong-Sheng, Xu Jian-Xin. On data-driven control theory: the state of the art and perspective. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(6): 650–667
(侯忠生, 许建新. 数据驱动控制理论及方法的回顾和展望. 自动化学报, 2009, **35**(6): 650–667)
- 21 Sun Ming-Xuan, Wang Dan-Wei, Chen Peng-Nian. The repetitive learning control of nonlinear system for limited interval. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, **38**(1): 1–10
(孙明轩, 王郸维, 陈彭年. 有限区间非线性系统的重复学习控制. 中国科学 E 辑: 信息科学, 2009, **38**(1): 1–10)



任光 北京理工大学自动化学院博士研究生. 主要研究方向为机器人运动学建模与运动控制. 本文通信作者.

E-mail: renguan1979@sina.com

(REN Guang Ph.D. candidate at the School of Automation, Beijing Institute of Technology. His research interest covers dynamic model and motion control of robot. Corresponding author of this paper.)



戴亚平 北京理工大学自动化学院教授. 主要研究方向为机动目标跟踪, 基于网络的远程控制, 多传感器数据融合.

E-mail: daiyaping@bit.edu.cn

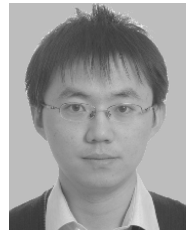
(DAI Ya-Ping Professor at the School of Automation, Beijing Institute of Technology. Her research interest covers motion target tracking, network-based remote control, and multi-sensor data fusion.)



曹志强 中国科学院自动化研究所副研究员. 主要研究方向为多机器人系统和仿生机器人.

E-mail: zhiqiang.cao@ia.ac.cn

(CAO Zhi-Qiang Associate professor at the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers multi-robot system and biomimetic robot.)



沈飞 中国科学院自动化研究所助理研究员. 主要研究方向为机器人动力学建模与运动控制.

E-mail: fei.shen@ia.ac.cn

(SHEN Fei Assistant professor at the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers dynamic model and motion control of robot.)