

基于 PVDF 传感器的仿生机器鱼测控系统^①

叶秀芬^② 朱 玲^③ 刘世超 郭书祥

(哈尔滨工程大学自动化学院 哈尔滨 150001)

摘 要 选择离子聚合物金属复合材料(IPMC)作为驱动器,设计了一种厘米级仿生机器鱼;针对驱动器自身存在的易疲劳、易电解等缺陷及实际工程中的不确定因素给系统带来的不稳定问题,建立了基于性能稳定的聚偏二氟乙烯(PVDF)传感器的闭环测控系统,解决了开环控制存在的调节时间长、误差大的问题;提出了一种新颖的传感器并行安装方式,有效地避开了应用环境中的不利因素,实现了对驱动器状态的实时检测;在 LabVIEW 软件环境下进行了测控实验。实验表明,该系统能够保证仿生机器鱼长期稳定地工作。

关键词 测控系统,离子聚合物金属复合材料(IPMC),聚偏二氟乙烯(PVDF),虚拟仪器,仿生机器鱼

0 引 言

利用鱼类的推进机理实现水下潜器和水下机器人推进的想法伴随着仿生学、机器人、材料学、控制理论等学科的发展逐渐成为现实。近年来,压电陶瓷、形状记忆合金、高分子离子聚合物等新型智能材料的出现,为水下机器人驱动器的研究开辟了新的领域,其中具有“人工肌肉”之称的离子聚合物金属复合材料(ionic polymer-metal composites, IPMC)引起了人们的广泛关注^[1,2]。

IPMC 是一种典型的电活性高分子膜材料,在低电压驱动下能产生较大的形变。作为水下机器鱼体的驱动器,此种材料具有体积小、无噪音、隐蔽性好、机动性能高等独特优点,有效地解决了采用电机驱动的水下机器人存在的诸多问题^[3-10]。然而,此种材料也有其自身的缺陷,例如:对湿度特别敏感;驱动电压超过一定幅值时会发生电解作用,相应地会出现产生热量、释放气体等激活反应;长期连续工作材料会出现疲劳,等等^[9]。这些缺陷对材料的驱动性能带来了不同程度的影响,致使已有的基于开环控制的 IPMC 应用研究存在着响应时间长、误差大等不稳定问题^[5-8]。国内对 IPMC 的研究大都集中在材料制作、建模与特性分析上^[9-14],但仍未见有对上述缺陷的明显改善。已有的对 IPMC 应用的研究也都采用开环控制方案^[15-18]。随着对 IPMC 研究的

不断深入,国外已有结合 IPMC 自身的传感特性构建闭环控制的方案,但由于 IPMC 自身传感特性非常微弱,且材料硬度大,对 IPMC 自身的驱动性能影响较大等,这种方案没有在实际中得到推广^[19,20]。美国的 Chen 等建立的集 IPMC 与聚偏二氟乙烯(polyvinylidene fluoride, PVDF)于一体的结构用于果蝇晶胚细胞的探测,但由于采用的是尺寸相同的两种材料的表面粘贴方式,检测信号受到 IPMC 的干扰大,且粘贴后 IPMC 的摆动幅值受到极大的限制,无法用作仿生机器鱼尾^[21,22]。为了克服 IPMC 驱动器存在的上述问题,本研究选择并优化了一种适合的传感器应用于仿生机器鱼驱动器上,并结合控制算法实现了对驱动器的闭环控制,提高了整个系统的精度和鲁棒性。为了避免驱动器电解水时对传感器带来的不利影响,本研究设计了一种新颖的并行安装方式,保证了传感器检测的准确性,检测与控制效果在虚拟仪器软件设计中得到了实时显示。闭环测控系统的实现对 IPMC 驱动器的应用研究具有重要意义。

1 仿生机器鱼结构设计

利用 IPMC 驱动器加电后发生弯曲形变而产生推进力的特性来模仿真实鱼尾的横向摆动,实现了鱼体运动过程的仿生。机器鱼形体的仿生结构主要由三部分组成:头部、躯干部和尾部。头部内侧与躯

① 863 计划(2006AA04Z248)资助项目。

② 女,1966 年生,博士,教授;研究方向:微型仿生机器人,智能材料,图像处理;E-mail: yexiufen@hotmail.com

③ 通讯作者, E-mail: zhuling20062006@hotmail.com

(收稿日期:2009-06-10)

干部选用相同浮材;鱼头外侧选用薄铝片,主要起到保持鱼体前后平衡的配重作用;鱼尾由驱动材料 IPMC 构成,配上能够提高推进力的轻质、柔软的塑料薄片作为尾鳍构成完整的尾部结构。鱼体结构设计的难点是鱼体的平衡配重。鱼尾设计过程的一个关键问题就是传感器的选择与安装,检测信号的准确性直接影响控制精度,是组成测控系统的重要环节。为此,在这里重点研究应用于仿生机器鱼驱动器上的传感器。

1.1 PVDF 传感器

发展合适的能够用于水下微型机器人的传感器并非易事,原因如下:水下的应用环境使这些传感器的封装难以满足实际需要;其空间限制,许多商业化的传感器难以派上用场;在传感器与机器人运动结构紧密结合上,对传感器的鲁棒性提出了更高要求;对敏感元件的柔韧性要求也是一重大的挑战^[23]。

聚偏二氟乙烯(PVDF)具有合成高分子材料中最强的压电效应,其传感机理是:如存在一个外力施加在薄膜上,使薄膜产生变形,该变形将打乱偶极子原来的电中性排列状况,在薄膜的表面就会出现暂时性的剩余电荷,即在垂直薄膜表面出现与所受力相对应的电信号,此微弱的电荷信号经电荷放大器放大后经由数据采集卡输入计算机进行后续处理。该材料柔软、极薄、质轻、韧度高、响应快、测压范围大、频率范围宽、灵敏度高、线性度好、重复性好,使其成为广泛推广的一种新型智能传感器,也是柔性传感器的一种重要材料^[24]。正因为 PVDF 压电薄膜具有诸多优越的特性,使其成为用于 IPMC 驱动器上的首选传感器。

1.2 传感器标定

由于 IPMC 驱动器的形状似悬臂梁结构,所以设计的 PVDF 传感器的形状都为长条形。首先建立传感器的数学模型,图 1 给出了 PVDF 薄膜传感器受末端集中力的示意图及坐标系,薄膜长、宽、高分别为 l 、 w 、 h 。PVDF 传感器理论建模分为三步:

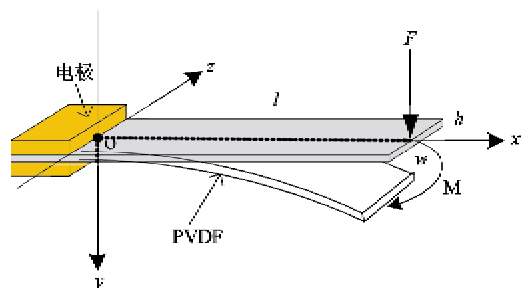


图 1 PVDF 传感器受末端集中力示意图及坐标表示

(1)根据 PVDF 传感器的传感机理建立外力到电的转换模型,仅考虑沿 x 轴拉伸方向的压电效应,于是得到 PVDF 传感器表面电荷计算公式为

$$Q = \int d_{31} \sigma dA \quad (1)$$

式中 Q 为表面电荷, d_{31} 为压电常数, σ 为单位面积上的作用力 (N/m^2)。根据应力定义与梁的曲率公式可得 PVDF 传感器所受外力 F 与表面产生电荷 Q 的关系公式为^[25]

$$Q = \frac{3d_{31}}{wh^2} \int_0^l F(l-x) \cdot w dx = \frac{3d_{31}l^2 F}{2h^2} \quad (2)$$

(2)然后基于该传感器的悬臂梁结构,建立外力到传感器末端位移的力学关系模型:设 PVDF 传感器只受垂直于薄膜表面末端集中力的作用,传感器的力学模型就是用力学中梁的小变形理论建立 PVDF 传感器末端最大位移 v 与外力 F 之间的转换关系,计算得到挠曲线方程为

$$v = \frac{2F(3lx^2 - x^3)}{Ewh^3} \quad (3)$$

式中 E 为材料弹性模量,将边界条件 $l = L$ 带入上式,得到悬臂梁受末端集中力 F 与末端最大挠度值 v 的关系方程如下所示:

$$v = \frac{4l^3}{Ewh^3} \cdot F \quad (4)$$

(3)最后根据 PVDF 传感器后级调理电路得到 PVDF 传感器输出微弱电荷信号 Q 与电荷放大器输出电压 U_{out} 的关系:

$$U_{out} = K \cdot \frac{Q}{C_f} \quad (5)$$

其中 C_f 、 K 分别为放大器的反馈电容及后级放大倍数。

结合公式 (2)、(4) 及 (5) 得到 PVDF 传感器受集中力作用时末端位移 v 与输出电压 U_{out} 的关系:

$$U_{out} = \frac{3d_{31}EwhK}{8lC_f} \cdot v \quad (6)$$

取 4 个不同尺寸的 $30\mu m$ 厚 PVDF 传感器对理论模型 (6) 进行实验验证,实测结果是激光位移传感器测得的每个周期内 PVDF 传感器末端最大位移值与数据采集卡采集到的 PVDF 传感器每周输出电压峰值的拟合 (PVDF 粘贴在悬臂梁上,悬臂梁在激励器的带动下做正弦振动使传感器输出相应的正弦电荷信号,经电荷放大器放大后输入采集卡)。

PVDF 传感器的尺寸参数如表 1 所示: $E = 2500MPa$; $K = 1$; $d_{31} = 23PC/N$; $C_f = 1000pF$ 。表 1 也给出了理论计算结果与激光位移传感器实际测得数据的拟合结果。

表 1 理论结果与实测结果的对比

长 × 宽 (mm)	理论结果	实测结果	比例系数
14.0 × 2.5	$U = 0.116v$	$U = 0.865v$	7.492
14.4 × 3.3	$U = 0.148v$	$U = 1.109v$	7.487
19.2 × 2.5	$U = 0.084v$	$U = 0.643v$	7.631
27.0 × 8.2	$U = 0.198v$	$U = 1.549v$	7.837

表 1 中的比例系数为实测结果与理论结果之比,此比值大小是相近的。于是对理论模型进行参数修正,取比例系数的平均值作为方程(6)的修正值。得到修正后的 PVDF 位移传感器数学模型为

$$U_{out} = \frac{15}{2} \cdot \frac{3d_{31}EwhK}{8IC_f} \cdot v \quad (7)$$

从式(7)可以得出传感器的灵敏度与长度成反比、与宽度和厚度成正比。此数学关系为最后确定最优的 PVDF 传感器尺寸提供了重要依据。

1.3 传感器的安装与尺寸优化

传感器的安装是鱼尾设计过程中的关键问题。为保证鱼尾摆动的最佳推进效果,PVDF 传感器的安装不能给驱动器增加任何负担;同时,驱动器使用中可能出现的电解水等现象也不能对传感器的敏感性能带来不利影响或对传感器产生破坏作用,为此进行了大量的实验研究。

以往 PVDF 传感器的安装大都采用嵌入被测结构中或粘贴在被测结构上的方式^[21,22,26]。由于 PVDF 无法嵌入到被测对象 IPMC 中,且 IPMC 材料特殊的吸湿性质无法实现稳固粘贴,直接粘贴的方式使 IPMC 材料在粘贴一侧无法充分吸水,影响驱动器的致动效果;加之,IPMC 在高于一定幅值的电压驱动下电解水产生的气泡和热量对紧密粘贴的传感器也带来了极大的破坏,所以上述两种安装方式不能满足实验要求。我们曾设计用一层薄膜将两种材料包裹在一起,但是包裹的方式使 IPMC 电解水时产生的气泡和热量无法释放,气泡影响了驱动器致动效果、不断积累的热量对传感器也产生了损坏,此方案仍不可取。

为此我们设计了新颖的并行安装方式,初次实验时将相同长度的两种材料并行平放(PVDF 长、宽、高分别为 15.0mm、2.5mm、30 μ m,IPMC 长、宽、高分别为 15.0mm、8mm、200 μ m),材料末端选用强力胶带相连,将 IPMC 的摆动幅度通过相连接的胶带传递给 PVDF 传感器。为了保证传感器在水中长期稳定地使用,采用了粘贴极薄的聚氟乙烯膜的方式对传感器进行了封装。此封装技术保证了防水性、绝缘性及传感器本身的柔韧性。但两种材料等长度的并

行安装方案在 IPMC 末端摆动幅值超过 4mm 时,经实验验证基于小变形理论建立的模型与实际测量值的偏差较大,给检测效果带来较大误差,最大误差达到 0.325V,占总量程的 4.06%。

为了解决上述问题,我们依据 PVDF 传感器的数学模型对实际应用中的 PVDF 传感器尺寸进行了优化,最后选定 PVDF 传感器的尺寸为 10mm × 4mm × 30 μ m,缩短的长度和加大的宽度能够提高 PVDF 传感器的灵敏度。最后的安装方式如图 2 所示。通过检测距离 IPMC 驱动器末端 5mm 处的位置状态来反映 IPMC 末端实际摆动的状态。当 PVDF 检测到最大摆动幅值为 4mm 时,IPMC 驱动器的末端实际摆动位移是 6mm,扩大了传感器数学模型的适用范围,实验误差稳定在 $\pm 0.15V$ 以内,占总量程的 2.11%。

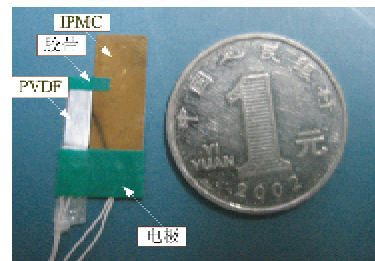


图 2 新颖的安装方式

我们对图 2 中的并行结构在水中进行了测试,测试结果如图 3 所示,传感器的安装并没有影响到驱动器的摆动效果,此种安装方式是可行的。鱼体结构如图 4 所示,总长度为 5.5cm,鱼体能够平稳地浮在水中。

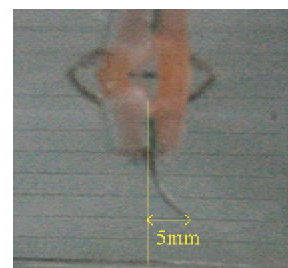


图 3 水中摆动效果

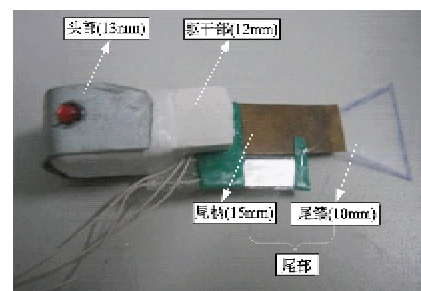


图 4 仿生机器鱼体结构

2 测控系统设计思想

2.1 系统设计思想与控制方法

IPMC 初次使用前需要对其进行标定,对 15mm 长、8mm 宽的 IPMC 驱动器施加 3V 电压,其末端摆动最大位移为 3.6mm,我们将此关系设定为初始稳定状态。测控系统是对 IPMC 驱动器长期使用时或受到外界不确定因素导致的驱动能力的变化进行检测和控制。驱动器末端摆动幅值的变化是驱动能力变化的直接体现,即 IPMC 驱动器长期工作会出现性能下降(在相同电压驱动下摆动幅值变小的现象),需要增加驱动电压来增加驱动器末端摆动幅值,从而达到初始稳定状态。通过自制的 PVDF 传感器实时检测 IPMC 驱动器的末端最大摆动位移,与初始使用时稳定的末端最大摆动位移进行比较,如有偏差则将偏差输入给控制器进行电压调节,输出适合大小的驱动电压(在工作电压范围内,加大电压可使 IPMC 驱动器的末端摆动位移相应增加,反之亦然),调节 IPMC 驱动器始终稳定在初始状态时的最大位置,完成整个闭环测控过程,系统设计流程如图 5 所示。

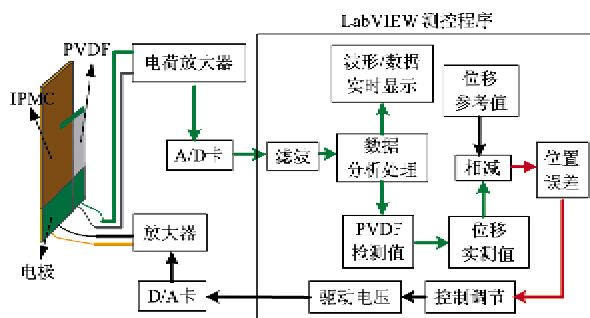


图 5 系统设计流程示意图

鉴于对被控对象进行精确建模存在困难,所以本文选用可以不依赖数学模型的比例积分微分(proportional integral differential, PID)控制。系统控制部分是由计算机软件编程实现,首先将 PID 控制算法离散化,即设计数字 PID 算法。将连续时间 t 离散化为一系列时刻点 kT (k 为采样序号, T 为采样周期),然后求和取代积分,向后差分取代微分,于是离散化的 PID 控制算法为

$$u(k) =$$

$$K_p \left\{ e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_D}{T} [e(k) - e(k-1)] \right\}$$

上式为基本的数字 PID 算法,不难看出,基本的数字 PID 控制包含三个部分:比例部分 $K_p e(k)$ 、积分部分 $\frac{K_p T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j)$ 和微分部分 $\frac{K_p T_D}{T} [e(k) - e(k-1)]$ 。控制系统框图如图 6 所示。

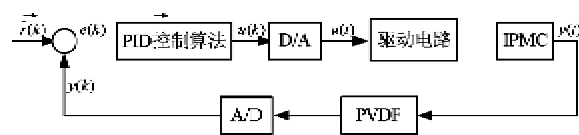


图 6 控制系统框图

2.2 测控系统软件实现

基于实验室虚拟仪器集成环境(laboratory virtual instrument engineering workbench, LabVIEW)实现了控制系统的软件设计,该软件功能强大,图形化编程环境无需编写任何文本格式的代码,丰富的库函数和工具包提高了编程效率,给程序的设计带来了极大的方便,主要包括七大模块:

(1) 双通道数据采集:一路用来采集 PVDF 传感器的检测信号,另一路用来采集激光测位仪的输出信号。激光测位仪的检测对 PVDF 传感器进行不定期的校验,以保证检测精度。

(2) 滤波部分选用的是反切比雪夫带通滤波器,由于驱动器摆动频率单一,高、低截止频率的设置有效地去除了干扰。

(3) 数据的分析处理主要对采集到的 PVDF 传感器数据进行处理和转换,提取出每个周期的峰-峰值的平均值作为被控对象的输出反馈值。

(4) PID 参数的调整采用实验试凑的方法,通过实验的闭环运行,观察系统的响应曲线,并根据各调节参数对系统响应的大致影响,反复试凑参数,以达到满意的响应,从而确定 PID 控制器的参数调节。通过试凑法整定 PID 控制器的参数是按先比例、后积分、再微分的步骤进行的。最后得到的整定参数为: $K_p = 1$, $T_i = 0.01$, $T_D = 0$ 。

(5) 显示部分包括初始化显示、检测值的实时显示及各种波形显示,包括检测波形、输出波形、PID 调节过程波形及其误差显示。

(6) 存储部分包括采集数据存储、PID 调整过程中误差值输出存储及 PVDF 末端处 IPMC 的理想参考位置与 PID 调整过程的实际摆动位置相比较的结果数据存储。存储的数据为实验结果的分析提供了重要依据。

(7) 控制信号的模拟量输出。

3 实验与结果分析

测控系统的实验平台如图 7 所示,整个鱼体能在无人干预的情况下平稳前进。

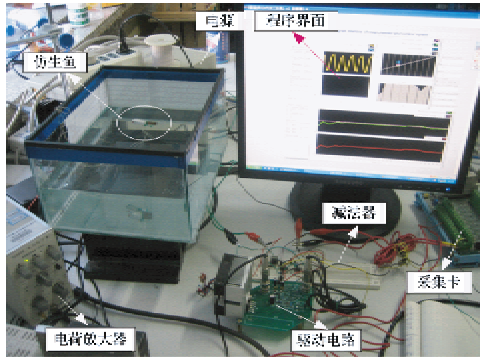


图 7 测控系统实验台

在机器鱼游动过程中,通过检测距离 IPMC 驱动器末端 5mm 处的位置状态来间接反应 IPMC 的末端实际摆动状态,克服了基于小变形理论建立的传感器数学模型在大变形时误差大的问题。图 8 是系统开始运行到调节稳定过程的实验结果,在系统运行到 25s 时人为对鱼尾施加了扰动,鱼体仍可迅速调节达到稳定。

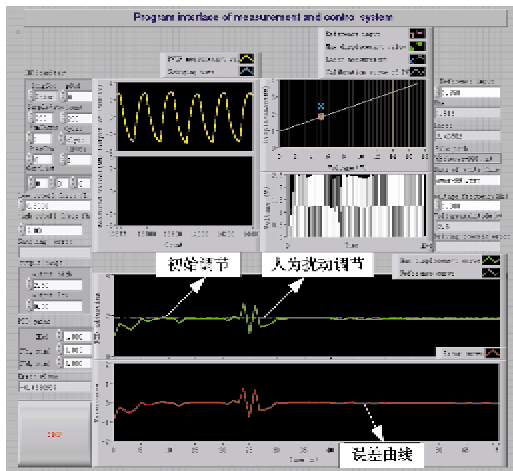
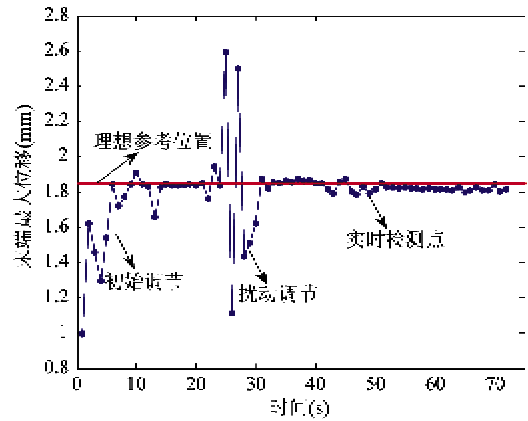


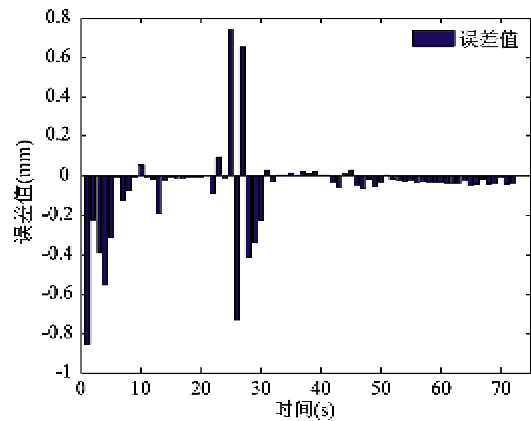
图 8 闭环控制实验结果

为了数据分析精确,我们将比例积分(proportional integral, PI)调节过程及误差的变化用 MATLAB 软件显示,如图 9 所示。整个调节过程可通过曲线变化过程直观展示出来。初始调节稳定时间在 7s 左右,相对于驱动器长时间使用中出现的性能变化这一慢变过程,此调节时间是非常理想的。稳定时的误差范围能控制在 $\pm 0.05\text{mm}$ 以内,占总量程的

2.70%,能够实现稳定调控的目的。受到扰动后系统仍能够在 7s 左右达到稳定,余差能够控制在 $\pm 0.05\text{mm}$ 以内,检测与调节效果良好,实现了自检测、自诊断、自调整的智能控制。



(a) PI 调节过程曲线显示



(b) 调节过程误差值显示

图 9 调节过程的 MATLAB 显示结果

4 结论

本文充分利用了 PVDF 压电薄膜的优越特性,针对 IPMC 驱动器的自身缺陷及偶尔的外界扰动对驱动器带来的影响,设计了新颖的传感器安装方式,为传感器的应用开辟了新的思路;以功能强大的 LabVIEW 为软件平台,研究了具有自检测、自诊断、自调整的仿生机器鱼智能测控系统,提高了基于 IPMC 驱动器的控制系统的精度和鲁棒性。

在闭环控制中,传感器反馈的仅是驱动器摆动周期内的最大位移值,进一步的工作应考虑对驱动器的各个时刻的位移值进行反馈控制并建立驱动器的数学模型,结合更加优化的控制算法,实现对 IPMC 驱动器在复杂情况下、变化快的干扰进行迅速

调节。

参考文献

- [1] 应申舜,秦现生,任振国等.基于人工肌肉的机器人驱动关节设计与研究.机器人,2008,30(3):142-146
- [2] Feng G H, Chen R H. Fabrication and characterization of arbitrary shaped μ IPMC transducers for accurately controlled biomedical applications. *Sensors and Actuators*, 2008, 143: 34-40
- [3] 于凯,黄胜,胡健等.仿生双尾推进的试验研究.哈尔滨工程大学学报,2008,29(3):205-208
- [4] 成巍,李喜斌,孙俊岭等.仿生水下机器人运动控制方法研究.哈尔滨工程大学学报,2004,25(5):553-557
- [5] 曾妮,杭观荣,曹国辉等.仿生水下机器人研究现状及其发展趋势.机械工程师,2006,4:17-21
- [6] Kim B, Kim D H, Jung J. A biomimetic undulatory tadpole robot using ionic polymer-metal composite actuators. *Smart Materials and Structures*, 2005, 14: 1579-1585
- [7] Guo S X, Shi L W, Asaka K. IPMC actuator-sensor based a biomimetic underwater microrobot with 8 Legs. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics, Qingdao, China, 2008. 2495-2500
- [8] Zhang W, Guo S X, Asaka K. Development and analysis of an underwater biomimetic microrobot. In: Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Information Acquisition, Weihai, China, 2006. 212-217
- [9] 谭湘强,钟映春,杨宜民.IPMC 人工肌肉的特性及其应用.高技术通讯,2002,12(1):50-52
- [10] 沈辉,于敏,季宏丽等.IPMC 的力输出特性.功能材料,2007,38(9):1516-1518
- [11] 唐运军,唐华平,殷陈锋.一种离子交换树脂金属复合材料(IPMC)的力学参数整定.高技术通讯,2007,17(5):508-511
- [12] 唐华平,姜永正,唐运军等.人工肌肉 IPMC 电致动响应特性及其模型.中南大学学报(自然科学版),2009,40(1):153-158
- [13] 安逸,熊克,顾娜.一种离子聚合物金属复合材料拉伸试验研究.航空学报,2009,30(5):966-971
- [14] 陈骐,熊克,卞侃.一种新型柔性驱动器的制备和性能研究.兵器材料科学与工程,2009,32(2):8-11
- [15] 郝丽娜,徐凤,刘斌.基于 IPMC 驱动器的小型遥控机器鱼的研制.东北大学学报(自然科学版),2009,30(6):773-776
- [16] 彭瀚,杨淋,李华峰等.离子聚合物-金属复合物发展综述.微特电机,2008,2:57-61
- [17] 李德胜,聂林,郭书祥.ICPF 驱动的柔性微型机器龟腿的动力学分析.传感技术学报,2008,21(11):1840-1843
- [18] Nie L, Cnhe W, Li D S, et al. Image analysis on ICPF actuated micro robot. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(6): 1316-1321
- [19] Kamamichi N, Yamakita M, Asaka K, et al. A snake-like swimming robot using IPMC actuator/sensor. In: Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Orlando, Florida, 2006. 1812-1817
- [20] Bonomo C, Fortuna L, Giannone P, et al. A sensor-actuator integrated system based on IPMCs. *Sensors, IEEE*, 2004, 4:489-492
- [21] Chen Z, Kwon K Y, Tan X B. Integrated IPMC/PVDF sensory actuator and its validation in feedback. *Control, Sensors and Actuators*, 2008, 144(2): 231-241
- [22] Chen Z, Shen Y T, Xi N, et al. Integrated sensing for ionic polymer-metal composite actuator using PVDF thin films. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16(2):262-271
- [23] Liu W T, Menciassi A, Scapellato S, et al. A biomimetic sensor for a crawling minirobot. *Robotics and Autonomous Systems*, 2006, 54: 513-528
- [24] 樊尚春,刘广玉.新型传感技术及应用.北京:中国电力出版社,2005.10-11
- [25] Liu Y Y, Yu P, Wang Y C, et al. The modeling and experiments of a PVDF micro-force sensor. In: Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, Sanya, China, 2008. 60-64
- [26] Hosoda K, Tada Y, Asada M. Anthropomorphic robotic soft fingertip with randomly distributed receptors. *Robotics and Autonomous Systems*, 2006, 54(2): 104-109

A PVDF sensor-based system for measurement and control of bionic robot fish

Ye Xiufen, Zhu Ling, Liu Shichao, Guo Shuxiang
(Automation College, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract

By using ionic polymer-metal composites (IPMC) as an actuator, a centimeter-level bionic robot fish was designed. Aiming at the uncertainties existing in the actual engineering system and the instability of IPMC, such as easy to become fatigue caused by the long time use, electrolysis, etc., an intelligent measurement and control system was set up based on the stable polyvinylidene fluoride (PVDF) sensor. The problems of long settling time and big error in the open-loop system were both overcome. In particular, a novel parallel installation method for sensor was proposed to handle the unfavorable factors in real applications, which achieved the monitoring of the IPMC actuator in real time. Intelligent measurement and control experiments were carried out in the LabVIEW software environment. The results show that the stable operation of the bionic robot fish can be ensured.

Key words: measurement and control system, ionic polymer-metal composites (IPMC), polyvinylidene fluoride (PVDF), virtual instrument, bionic robot fish