

doi: 10.7690/bgzdh.2013.12.024

机器鱼高精度实时反馈控制系统

宋玉龙¹, 史豪斌², 潘炜², 赵净波³

(1. 西北工业大学电子信息学院, 西安 710129; 2. 西北工业大学计算机学院, 西安 710129;

3. 西北工业大学明德学院, 西安 710124)

摘要: 为实现高速和精确的速度控制, 设计一种机器鱼高精度实时反馈控制系统。研究仿生机器鱼的推进速度与鱼尾的摆动频率、幅度的关系, 以 FPGA 为主控芯片, 完成机器鱼 3 自由度舵机的控制和实时状态反馈, 并与 PC 决策系统交换数据; 将视觉系统采集处理得到的机器鱼实际前进速度作为反馈, 与目标速度作差构成闭环, 利用 PID 算法通过控制 3 自由度舵机的摆动频率和幅度精确控制机器鱼速度, 并通过实验得出速度控制曲线和误差曲线。实验结果表明, 该系统能完成机器鱼高精度、高稳定度的速度控制。

关键词: 机器鱼; FPGA; PID; 速度控制

中图分类号: TP242.6 **文献标志码:** A

High Precision Real-Time Feedback Control System for Robotic Fish

Song Yulong¹, Shi Haobin², Pan Wei², Zhao Jingbo³

(1. School of Electronic & Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;

2. School of Computer, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;

3. Mingde College, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710124, China)

Abstract: To achieve high speed and precise control, the article proposes a real-time feedback control system with high precision for robotic fishes. After researching the relationship between the advancing speed and tail beat frequency and amplitude, we utilize FPGA as the master chip to complete the control of 3-DOF servos and the real-time feedback, together with the data exchange with PC decision making system. Specifically, the actual forward speed of robotic fish got by vision system is used as feedback to constitute a closed loop with target speed, followed by precise speed control by controlling the swing frequency and amplitude of the 3-DOF servos on the basis of PID algorithm. Velocity control curve and speed error curve are obtained by experiments, and the results show that the system can control robotic fish with high precision and high stability.

Key words: robotic fish; FPGA; PID; velocity control

0 引言

鱼类凭借其身体、鳍、尾巴的协调运动, 实现了良好的机动性能和极高的推进效率, 相比于传统的由螺旋桨驱动的航行器具有极大的优势^[1-2]。为此, 人们着手研究鱼类的游动机理和运动模型, 并用于指导开发仿生机器鱼来改善水下航行器 (autonomous underwater vehicles, AUV) 的性能^[3-7]。

机器鱼具有鱼类的波动外形和由电机驱动的尾巴或鳍, 一般由微处理器对电机进行控制从而完成各种运动。然而, 微处理器 (如单片机、ARM 等) 由于其串行的程序执行流程以及时序逻辑的不足, 在控制多个电机的时候难以做到高速和精确。尤其是在需要实时读取伺服电机 (舵机) 状态来做闭环控制的情况下, 微处理器更是难以完成任务; 因此, 笔者选择使用 FPGA 作为控制器, 凭借其并行高速的工作特点以及对时序的精确控制, 完成机器鱼多个舵机的控制和状态反馈, 实时获取鱼尾摆动频率

和幅度。

根据文献[8-10]的速度模型可以得到机器鱼的推进速度与鱼尾摆动频率和幅度的关系, 据此得到机器鱼前进速度对应的舵机运动轨迹, 从而将目标速度转化为舵机的角度和速度指令, 并利用舵机的状态反馈进行实时更正。另外, 用视觉系统测量机器鱼当前的速度, 并与目标速度相比较, 利用比例积分微分 (proportional integral derivative, PID) 算法完成对机器鱼的高精度、高稳定度的速度控制。

1 系统结构

笔者研究的是图 1 所示的基于全局视觉的机器鱼系统。PC 向视觉系统获取机器鱼的位置信息, 同时通过无线收发模块接收从控制系统传回的舵机状态, 综合这些信息进行决策, 生成新的命令下发给控制系统。控制系统的主控芯片为 Altera 公司的 Cyclone II 系列 FPGA EP2C8Q208C8, 完成控制舵机和其他外设, 以及通过无线模块与上位机交换数

收稿日期: 2013-06-30; 修回日期: 2013-07-17

基金项目: 国家自然科学基金(61003129); 国家大学生创新项目; 西北工业大学研究生创新实验中心水中智能鱼项目资助

作者简介: 宋玉龙(1989—), 男, 安徽人, 博士在读, 从事 GNSS 接收机设计、软件无线电、嵌入式系统研究。

据的功能。

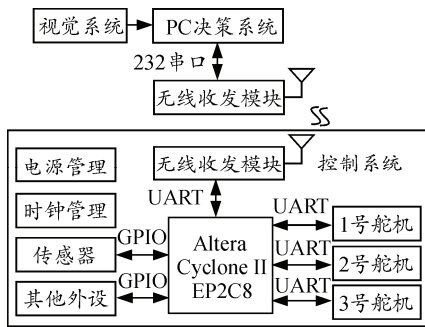


图 1 系统总体结构

2 机器鱼速度模型

文献[3]中, David Barrett 等人根据 Lighthill^[1]的研究提出式 (1) 所示的鱼类游动时身体波的方程:

$$y_{\text{body}}(x, t) = [c_1x + c_2x^2][\sin(kx + \omega t)] \quad (1)$$

其中: y_{body} 是鱼体的横向位移; x 是鱼体沿着主轴方向的位移(横向位移和主轴方向位移如图 2); λ 是鱼体波波长, $k(k=2\pi/\lambda)$ 是鱼体波数量; c_1 是鱼体波波幅包络的一次项系数; c_2 是鱼体波波幅包络的二次项系数; $\omega(\omega=2\pi f=2\pi/T)$ 是鱼体波频率。

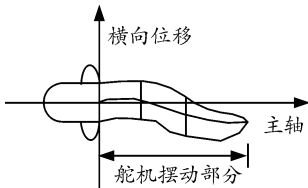


图 2 机器鱼游动模型

式 (1) 的离散形式为

$$y_{\text{body}}(x, i) = [c_1x + c_2x^2][\sin(kx \pm \frac{2\pi}{M}i)] \quad (2)$$

其中, $2\pi/M$ 是鱼体波频率分辨率, 即把一个 2π 周期离散成 M 个相位点, i 表示第 i 个相位点。

根据式 (2) 所示的鱼体波方程, 机器鱼对游动波动方式的控制主要取决于 2 个因素:

1) 摆动频率。即鱼体波频率, 取决于驱动电机的转动速度, 其最大频率与电机的最大转速和控制方式有关。

2) 产生漩涡的大小和强度。取决于尾鳍的形状和摆动线速度, 可以通过改变鱼体波振幅实现^[11]。

文献[7-9]研究了机器鱼推进速度与摆动频率和摆动幅度的关系, 笔者也采用调整摆动频率和摆动幅度的方法实现速度控制。

3 PID 反馈控制算法

PID 控制器以其结构简单、稳定性好、工作可靠、调整方便而成为工业控制的主要技术之一^[12]。

笔者使用如图 3 所示的闭环 PID 控制器完成机器鱼的速度控制。

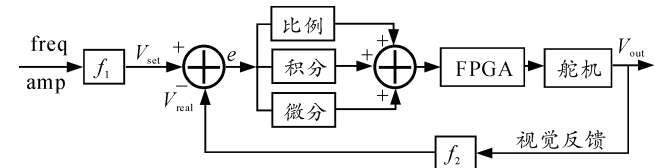


图 3 机器鱼 PID 反馈控制框图

图 3 中, 将设定的机器鱼摆动频率 freq 和振幅 amp 通过函数 f_1 转换成目标速度 V_{set} , 将视觉系统采集到的机器鱼的位置序列和间隔时间通过函数 f_2 转换成当前真实速度 V_{real} , 二者的误差信号经过比例、积分、微分模块再转化为舵机的角度速度调整量, 送给 FPGA 控制板, 修正舵机的状态。

数字 PID 控制器的输出表达式^[12]为

$$u_k = K_p \left[e_k + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e_j + T_d \frac{e_k - e_{k-1}}{T} \right] \quad (3)$$

其中: K_p 为比例系数; T_i 为积分系数; T_d 为微分系数; T 为采样周期; k 为采样点序号。

比例项 (Proportional) 的大小反映了系统对偏差处理的灵敏程度, 过小, 灵敏度差, 过大, 容易引起振荡, 当仅有比例控制时, 系统输出存在稳态误差; 积分项 (Integral) 能够随着时间推移围绕偏差不断加大控制力度, 最终可以消除稳态误差; 微分项 (Derivative) 能预测误差变化的趋势, 避免被控量的严重超调。笔者采用经验法对 3 个参数进行整定。

4 控制系统实现

4.1 舵机控制原理

笔者研究的机器鱼尾部摆动环节由 3 个韩国 ROBOTIS 公司的 AX-12A 数字舵机组成。AX-12A 是一款基于半双工异步串行通信接口的数字舵机, 每个舵机有 2 个通信接口, 每个接口有地、电源和信号 3 个引脚, 多个舵机可以串联。为了控制舵机, 主控制器需要转换 UART 的 TXD 和 RXD 信号为一路半双工信号, 推荐电路如图 4^[13]所示。

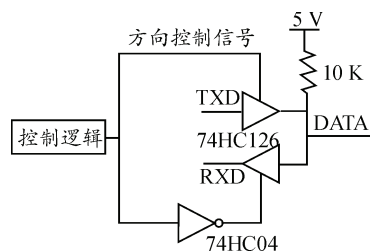


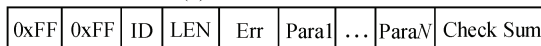
图 4 双向三态门电路结构

图 5 为舵机的数据包格式, 每个方格是一个字

节。其中图 5(a)为写指令数据包，2 个 8 位十六进制数 0xFF 为包头，ID(0~253)用于区分串联的多个舵机，LEN 为数据长度(LEN 字节之后的数据长度)，CMD 为控制指令类型，Para1~ParaN 为控制参数，Check Sum 为校验和；图 5(b)为舵机状态反馈数据包，当舵机收到读取状态类写指令后，返回相应的状态以及错误信息 Err(无错误时为 0)。AX-12A 可以通过一条“同步写”指令^[13]同时指定多个舵机的角度和速度，但是读状态必须使用多个指令。



(a) 指令数据包



(b) 状态数据包

图 5 舵机的数据包格式

4.2 舵机驱动逻辑

本系统主控芯片为 Altera 公司的 Cyclone II 系列芯片 EP2C8Q208C8^[14]，以 Quartus II 9.0 为开发平台，采用“原理图+Verilog 代码”的方式完成 FPGA 逻辑。驱动舵机的逻辑首先是串口收发，FPGA 通过最底层的采样引脚电平的方式接收如图 6 所示的串口帧数据，通过在波特率时钟上升沿写引脚电平的方式发送串口数据。

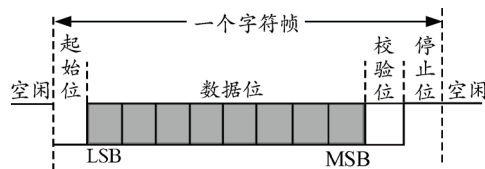


图 6 串口帧格式

图 7 为 FPGA 逻辑电路工作的时钟和复位电路。输入时钟来自 10 MHz 晶振，分频出 2 MHz 的 clk_2m 信号作为主时钟；复位信号 rst 为先高后低的高有效信号。

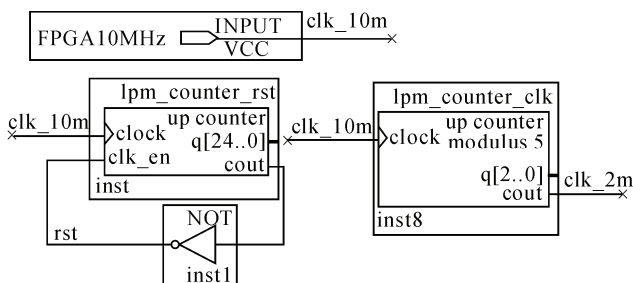
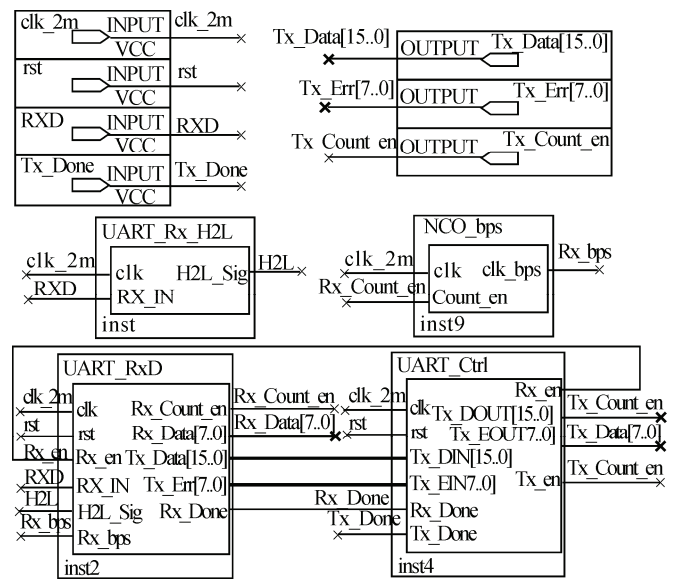


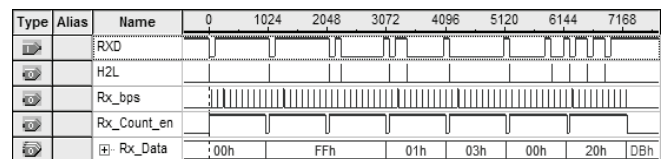
图 7 时钟和复位逻辑

图 8(a)为串口的接收和控制逻辑。由图 6 可知，空闲时串口信号为高电平，起始位为低电平，因此下降沿标志着数据的到来。模块 UART_Rx_H2L 以 2 MHz 时钟高速检测下降沿信号，当检测到下降沿

后，产生一个时钟的高电平脉冲 H2L 送给模块 UART_RxD；模块 UART_RxD 收到 H2L 后送高电平信号 Rx_Count_en 给模块 NCO_bps，利用 DDS 原理产生 19 200 Hz 的时钟信号 Rx_bps，用于采样检测串口信号电平，依次得到 8 位数据位；当接收完来自舵机如图 5(b)所示的状态数据包后，产生 Rx_Done 信号和有用数据送给 UART_Ctrl 控制模块，同时 UART_Ctrl 模块将接收使能信号 Rx_en 拉低，将发送使能信号 Tx_Count_en 拉高，直到发送完数据以后再翻转过来。图 8(b)为图 8(a)中主要信号的 Signal Tap 仿真波形，可以看到接收到的十六进制数据为“FF FF 01 03 00 20 DB”。



(a) 串口的接收和控制逻辑



(b) 串口接收和控制仿真图

图 8 串口接收和控制

图 9 所示为机器鱼的顶层控制逻辑。图 9(a)中，TriStated_Gate 模块为图 4 所示的双向三态门结构，Motor_S1、Motor_S2、Motor_S3 为 3 个舵机的信号线，RXD1、RXD2、RXD3 为 FPGA 分别从 3 个舵机读取的串口信号，Host_TXD 为 PC 通过无线模块和直接送给多个舵机的“同步写”指令信号。

图 9(b)中，Motor_To_FPGA_Uart 模块即图 8(a)所示的串口接收和控制逻辑，3 个舵机对应 3 个该模块；Host_RXD 为 FPGA 反馈给 PC 的舵机状态信号。UART_TxD 模块将 3 个 Motor_To_FPGA_Uart 模块接收到的有用数据(错误信息和角度速度等状

态信息)整合起来,按照图 10 所示的数据包格式发送串口信号给 PC 决策系统。

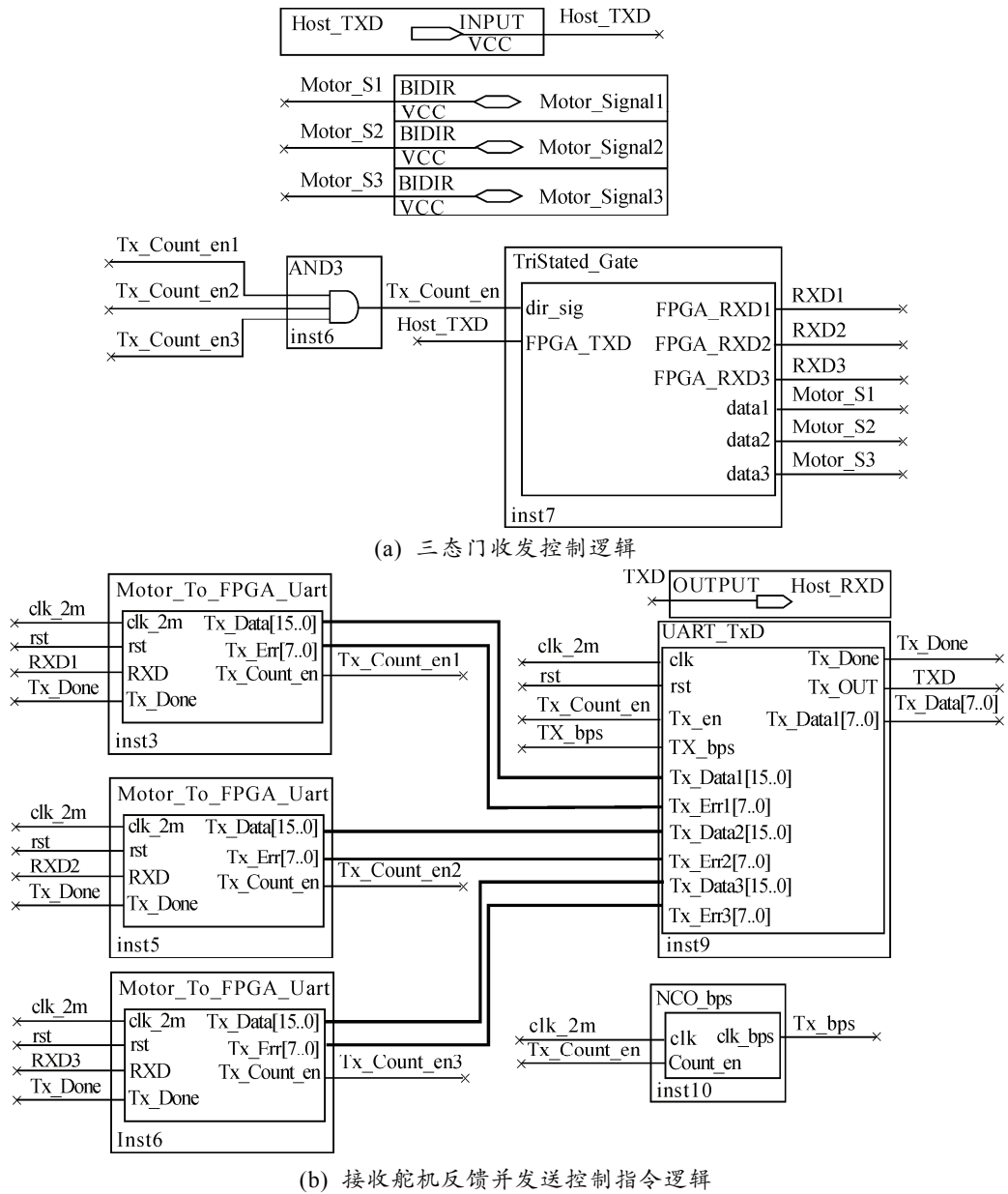


图 9 机器鱼控制逻辑

0xAA	Data1	Err1	Data2	Err2	Data3	Err3	0x55
------	-------	------	-------	------	-------	------	------

图 10 FPGA 向 PC 反馈舵机状态数据包格式

4.3 PID 速度控制

采用 SONY 公司的 SSC-DC338P 型号摄像头,由 PC 决策系统完成图 3 所示的 PID 闭环控制,导出摄像头采集的位置信息,得到如图 11 所示机器鱼的速度曲线和误差曲线。图 11(a)中不含噪声波动的为设定的速度曲线,含有噪声波动的为由视觉信息得到的机器鱼实际速度曲线;图 11(b)为机器鱼实际速度与目标速度的误差曲线。由图 11 可以看到,本系统完成了机器鱼速度的高精度、高稳定度控制。

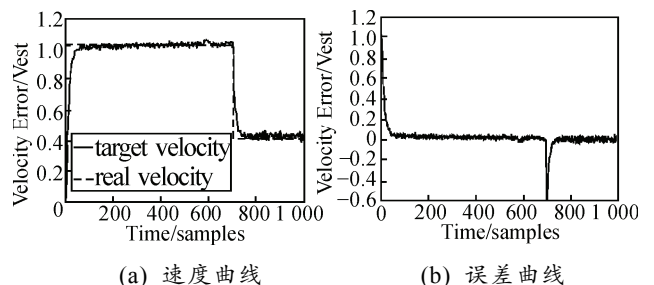


图 11 机器鱼的速度曲线和误差曲线

5 结论

实验结果表明,该系统可以完成机器鱼高精度、高稳定度的速度控制。

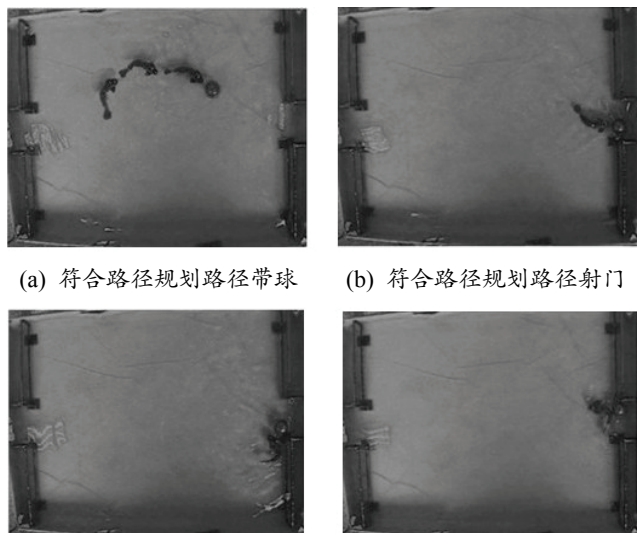
参考文献:

- [1] Lighthill M. J. Note on the swimming of slender fish[J]. *J. Fluid Mech.*, 1960, 9(2): 305-317.
- [2] Sfakiotakis M., Lane D., Davies J. Review of fish swimming modes for aquatic locomotion[J]. *IEEE Journal of oceanic engineering*, 1999, 24(2): 237-252.
- [3] Barrett D., Grosenbaugh M., Triantafyllou M. The optimal control of a flexible hull robotic undersea vehicle propelled by an oscillating foil[C]. Monterey USA: In Proc. IEEE AUV Symp., 1996: 1-9.
- [4] Tong B. Propulsive mechanism of fish's undulatory motion[J]. *Mechanics In Engineering*, 2000, 22(1): 69-74.
- [5] Yu Junzhi, Wang Shuo, Tan Min. Design of a free-swimming biomimetic robot fish[C]. USA: International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings of the 2003 IEEE/ASME, 2003: 95-100.
- [6] Yu Junzhi, Chen Er-kui, Wang Shuo, et al. Research evolution and analysis of biomimetic robot fish[J]. *Control Theory & Applications*, 2003, 20(4): 485-491.
- [7] Yu Junzhi, Tan Min, Wang Shuo, et al. Development of a Biomimetic Robotic Fish and Its Control Algorithm[J]. *IEEE Transaction on systems*, 2004, 34(4): 1798-1810.
- [8] Wang Shuo, Zhang Zhigang, Sang Haiquan. Analysis of Velocity Control Algorithms for Biomimetic Robot Fish[C]. ShenYang China: Proc. IEEE on Robotics and Biomimetics, 2004: 972-976.
- [9] Mbemmo Ernest, Chen Zheng, Shatará Stephan, et al. Modeling of Biomimetic Robotic Fish Propelled by an Ionic Polymer-Metal Composite Actuator[C]. Pasadena USA: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008: 689-694.
- [10] Chen Zheng, Shatará Stephan, Tan Xiaobo. Modeling of Biomimetic Robotic Fish Propelled by An Ionic Polymer-Metal Composite Caudal Fin[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2010, 15(3): 448-459.
- [11] 刘傲, 蔡勇, 谢广明. 一种机器鱼的位姿镇定控制算法[J]. *兵工自动化*, 2012, 31(11): 46-50.
- [12] Astrom K., Hafflund T. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning[M]. 2nd Edition. USA: Instrument Society of America, 1998: 59-119.
- [13] Robotis cop. Dynamixel AX-12 User's Manual[EB/OL]. [2006.6]. [http://www.electronickits.com/robot/BioloidAX-12\(english\).pdf](http://www.electronickits.com/robot/BioloidAX-12(english).pdf).
- [14] Altera cop. Cyclone II Device Handbook[EB/OL]. [2007.2]. http://www.altera.com.cn/literature/hb/cyc2/cyc2_cii5v1.pdf.

(上接第 74 页)

4 实验与分析

采用该算法在机器鱼协作控制平台下进行单鱼向右顶球, 在符合路径规划条件和不符合路径规划条件下进行测试。该实验要求机器鱼把皮球顶入到右边的球门内, 水池长 3 000 mm, 宽 2 000 mm, 球门宽 400 mm。实验情况如图 5 所示。



(a) 符合路径规划路径带球 (b) 符合路径规划路径射门
(c) 不符合路径规划头部甩球射门 (d) 不符合路径规划尾甩球射门

图 5 实验示意图

图 5(a)表示机器鱼在满足路径规划条件下通过合理的路径规划达到最佳击球点。图 5(b)表示机

器鱼满足路径规划条件在最佳击球点顶球射门。图 5(c)表示机器鱼不满足路径规划条件, 执行动作决策策略大幅摆动用头部甩击球进门得分。图 5(d)表示机器鱼不符合路径规划条件, 执行动作决策策略用尾部甩击球进门得分。

5 结语

该策略较好地结合了传统路径规划算法和基于动作决策的算法的优点, 在环境允许的情况下优先考虑路径规划策略, 使机器推进球的方向较为准确; 在路径规划不成功的情况下, 则积极执行动作决策策略, 使得单鱼的应变能力得到显著提升。但该算法未考虑多条机器鱼协作下的机器鱼路径规划问题, 还需要在今后的研究中做深入探讨。

参考文献:

- [1] 北京大学. 机器人水球比赛项目推荐书[M]. 北京: 北京大学工学院, 2009: 14-23.
- [2] 刘宏志. 一种改进的射门算法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2004, 36(7): 975-977.
- [3] 苏琦, 李卫京. 基于弦端点法的机器鱼寻迹策略[J]. *兵工自动化*, 2012, 31(11): 91-92.
- [4] 陶金, 孔峰, 谢广明. 基于动作决策的机器鱼顶球算法[J]. *兵工自动化*, 2010, 29(11): 70-73.
- [5] 川蒋新松. 未来机器人技术发展方向的探讨迈向新世纪的中国机器人——国家 863 计划智能机器人主题回顾与展望[C]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2001: 199-206.