

一种面向机器鱼的高精度位姿控制算法设计与实现

刘安全¹, 李亮², 罗文广^{1,3}, 谢广明²

(1. 广西科技大学电气与信息工程学院, 广西 柳州 545006; 2. 北京大学工学院, 北京 100871;
3. 广西汽车零部件与整车技术重点实验室, 广西 柳州 545006)

摘要: 首先应用一种简单的线性 CPG (中枢模式发生器) 模型, 实现了机器鱼游动模态的连续变化. 随后通过实验分析得到 CPG 控制器控制参数与机器鱼速度和转弯角速度的转换层函数. 进一步提出一种改进的比例导引位姿控制算法, 以一种新的方式定义机器鱼的位姿误差, 再将机器鱼的角度误差作为偏置项加入位置误差的比例控制律中. 最后通过实验验证了算法的可行性与有效性.

关键词: 机器鱼; 中枢模式发生器; 运动控制; 比例导引; 位姿控制算法

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2016)-02-0000-07

Design and Implementation of a High Precision Posture Control Algorithm for Robotic Fish

LIU Anquan¹, LI Liang², LUO Wenguang^{1,3}, XIE Guangming²

(1. College of Electrical & Information Engineering, Guangxi University of Science & Technology, Liuzhou 545006, China;

2. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China;

3. Guangxi Key Laboratory of Automobile Components and Vehicle Technology, Liuzhou 545006, China)

Abstract: Firstly, a simple linear CPG (central pattern generator) model is adopted to implement smooth transformations between various swimming gaits. Then, a function of the transition layer between CPG control parameters and the speed as well as the turning velocity of the robotic fish can be obtained through experiments. Further, an improved posture controller based on the proportional guidance controller is proposed, in which the posture error of robotic fish is redefined and its angle error is added to the proportional controller of the position error as a bias compensation. The feasibility and effectiveness of the proposed controller is verified by various experiments.

Keywords: robotic fish; CPG (central pattern generator); motion control; proportional guidance; posture control algorithm

1 引言 (Introduction)

随着国家海洋战略的不断推进, 水下机器人技术的发展成为海洋战略的关键因素. 仿生机器鱼作为水下机器人的一种, 相比于传统的水下航行器, 具有推进效率高、游速快、灵活性高、低噪声等特点, 因而受到广泛研究^[1]. 自麻省理工学院研制成功世界上第一条机器鱼以来, 人们致力于研究如何提高推进效率、提高游速、提高运动的灵活性等, 而对于机器鱼精确的位姿控制研究甚少.

现阶段, 受限于无法准确预估外界复杂的水环境给机器鱼带来的干扰、无法获得精确的机器鱼动力学模型, 对于多关节仿鳐科推进模式的机器鱼位姿控制的研究还很初步. Hirata 对多关节机器鱼的转弯姿态做了详细的研究, 实现了转弯的精确控

制^[2]. 喻俊志等人提出了基于模糊控制的点到点控制算法, 并成功在仿生机器鱼上应用^[3]. Zou 等利用复杂的模糊神经网络控制器实现了机器鱼的轨迹跟踪控制^[4].

比例导引控制^[5]是一种常用的点到点控制算法, 该控制律的核心思想是让运动体的转向角速度和视线角 (运动体与目标点连线在参考坐标系中的角度) 成正比, 最终使得运动体沿着视线方向准确到达目标点. 但是, 比例导引控制律只能实现位置的控制, 并不能控制运动体到达目标点的方向.

本文将一种线性的 CPG 模型应用到仿鳐科三关节机器鱼^[6]的运动控制中, 使得机器鱼的速度和转向角速度连续可控, 并能实时在线修改 CPG 参数. 另外, 通过实验获得了实验用的机器鱼的运动特性与 CPG 控制参数的转换层关系, 为机器鱼位

姿控制提供基础. 随后以一种新的方式定义机器鱼的位姿误差. 常规的位姿误差定义方法是以机器鱼当前位姿为基础建立鱼体坐标系, 机器鱼鱼头的位置为坐标原点, 机器鱼当前的方向为鱼体坐标系 x 轴正方向, 机器鱼的位姿误差在鱼体坐标系里面计算. 本文中以机器鱼期望的位姿建立坐标系, 机器鱼期望的方向为 x 轴正方向. 接着提出了一种改进的比例导引控制律, 将机器鱼的角度误差作为位置误差比例导引控制律的补偿项, 实现机器鱼位置和角度的同时控制, 即精确的位姿控制, 最后用实验验证了该算法的有效性.

2 机器鱼简介 (Brief introduction of the robotic fish)

机器鱼是北京大学智能控制实验室研制的仿鳗科三关节机器鱼. 机器鱼主要由3部分组成, 分别是鱼头、鱼体、鱼尾, 见图1.

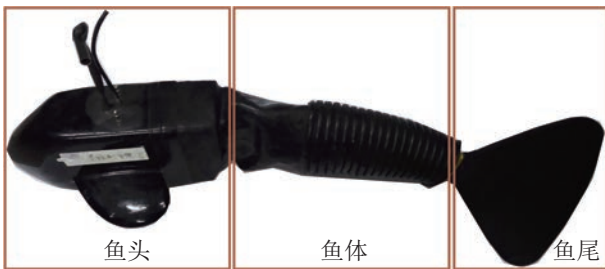


图1 机器鱼
Fig.1 Robotic fish

鱼头是流线型设计, 以便减小阻力, 在鱼头中装有电池、控制模块、无线通讯模块; 鱼体由3个关节组成, 每个关节依靠舵机驱动, 为了防水, 在鱼体外面套上一层软橡胶; 鱼尾的设计也是高度仿生的, 其硬度从前到后不断降低. 机器鱼的推进方式和自然界中鳗科鱼一样, 都是依靠身体的波动产生推进力.

3 机器鱼运动控制的改进 (The improvement of robotic fish motion control)

3.1 基于CPG的运动控制

基于查表法的机器鱼运动控制方式, 是将机器鱼连续的运动模式离散化, 因此机器鱼的游动状态只能在有限模式下切换, 弱化了机器鱼的运动能力, 不利于精确的位姿控制. CPG是一种仿生控制方法, 它是脊椎动物和非脊椎动物的运动神经回路的基本组成部分, CPG的主要特点就是能够在缺乏高层命令和外部反馈的情况下自动产生稳定的节律信号^[7-9].

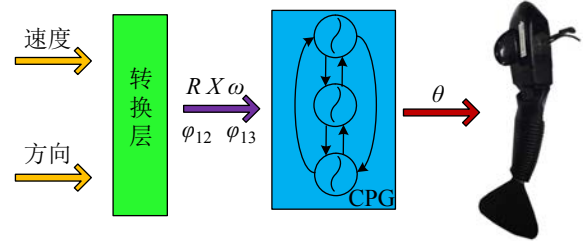


图2 机器鱼 CPG 运动控制框图
Fig.2 CPG motion control of the robotic fish

目前基于 CPG 的方法已经被用来控制各种类型的机器人, 在机器鱼控制方面的应用也有很多的研究^[10-11]. 本文采取的是一种线性的 CPG 控制器^[9,12-13], 这种控制器具有理论可分析性, 计算量小, 适合在低性能的单片机上实现. 基于线性 CPG 的机器鱼运动控制框图见图2. 图2中 CPG 模块由3个互相耦合的振荡器构成, 一个振荡器代表机器鱼的一个关节, 第 i 个振荡器可由式(1)所示的方程组来描述.

$$\begin{cases} \dot{r}_i(t) = \alpha_i(R_i - r_i(t)) \\ \dot{x}_i(t) = \beta_i(X_i - x_i(t)) \\ \ddot{\phi}_i(t) = \sum_{j=1}^3 \mu_{ij}[\mu_{ij}(\phi_j(t) - \phi_i(t) - \phi_{ij}) - 2(\dot{\phi}_i(t) - 2\pi f)] \\ \theta_i = x_i(t) + r_i \cos(\phi_i(t)) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, 状态变量 $r_i(t)$ 、 $x_i(t)$ 、 $\phi_i(t)$ 分别表示振荡器 i 在时间 t 的振幅、偏移和相位. 变量 $\theta_i(t)$ 是振荡器在时间 t 的输出 (也就是机器鱼对应关节的转角). 变量 f 、 R_i 、 X_i 分别表示振荡器 i 的期望频率、期望振幅和期望偏移. 变量 ϕ_{ij} 是振荡器 i 和振荡器 j 之间的期望相位偏移. α_i 、 β_i 、 u_{ij} 是结构参数.

经过转换层处理, 可由机器鱼的速度和方向得到 CPG 模型的具体控制输入参数, 本文中的 CPG 控制有9个参数, 表示为 $[R_1, R_2, R_3, X_1, X_2, X_3, \phi_{12}, \phi_{13}, f]$. 其中 R_1 、 R_2 、 R_3 分别为机器鱼3个关节的期望摆幅, X_1 、 X_2 、 X_3 分别是机器鱼3个关节的期望偏置角. ϕ_{12} 、 ϕ_{13} 分别是机器鱼第1关节和第2关节摆动的相位差以及机器鱼第1关节和第3关节摆动的相位差, f 为机器鱼关节的摆动频率. CPG 模型的输出是周期性的角度值, 再经过机器鱼的控制芯片直接解析为控制伺服舵机的 PWM (脉宽调制) 波信号.

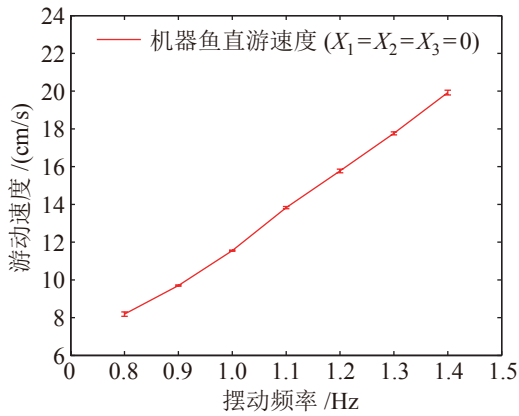
3.2 机器鱼 CPG 控制模型的转换层研究

对动物的中脑运动区域 (MLR)^[14] 进行简单

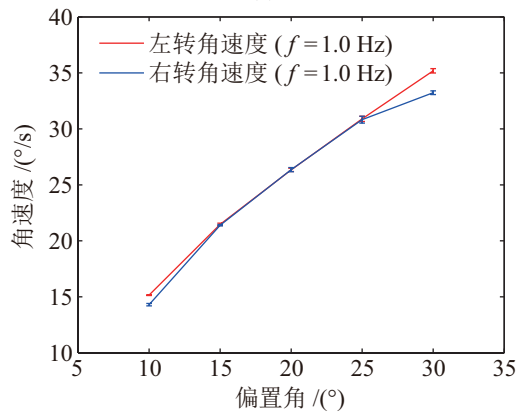
的电信号刺激, 就能使动物产生节律性的运动. 在机器鱼 CPG 控制模型中也有类似于 MLR 的模块, 我们称之为转换层.

机器鱼 CPG 控制模型中转换层的作用是将机器鱼的速度和方向解析为 9 个 CPG 参数. 研究转化层可以明确机器鱼的速度和转向角速度与 CPG 参数的对应关系. 采用反向推理的方法, 研究改变 CPG 参数对机器鱼的速度和转向角速度的影响, 从而了解 CPG 转换层的特性.

机器鱼 CPG 控制模型中输入参数较多, 在研究转换层特性时, 如果改变所有的参数, 会使研究的过程冗长而复杂. 为了研究方便, 本文改变一个参数而固定其他的参数. 对机器鱼游动速度影响最大的是 3 个关节的摆动频率^[15-16], 因此保持 CPG 其他参数不变, 改变 3 个关节的摆动频率, CPG 参数设置为 $[5, 10, 15, 0, 0, 0, 1.396, 2.094, f]$, f 从 0.8 Hz 变化到 1.4 Hz, 增幅为 0.1 Hz. 机器鱼游动速度随摆动频率变化的关系如图 3(a) 所示.



(a)



(b)

图 3 机器鱼速度和转向角速度与 CPG 参数的关系

Fig.3 Relationship between velocity and steering angular velocity of the robotic fish vs the CPG parameters

机器鱼 3 个关节的偏置角对机器鱼转向角速

度影响较大, 因此保持其他 CPG 参数不变, 仅改变 3 个关节的偏置角, 这里 3 个关节的偏置角设置为相同值. CPG 参数设为 $[5, 10, 15, X_1, X_2, X_3, 1.396, 2.094, 1.0]$, 其中 $X_1 = X_2 = X_3 = X$, 其绝对值从 5 变化到 30, 增幅为 5. 本文定义使得机器鱼左转的偏置角为负, 对应的角速度也为负; 反之, 使得机器鱼右转的偏置角为正, 对应的角速度也为正. 机器鱼转向角速度绝对值与偏置角绝对值的关系如图 3(b) 所示.

从图 3(a) 可以看出, 机器鱼尾鳍摆动频率从 0.8 Hz 变化到 1.4 Hz 时, 机器鱼的游动速度是呈线性增长的. 用一次线性拟合的方法可以得出机器鱼速度与关节摆动频率之间的关系, 如式 (2) 所示. 拟合方程的确定系数为 0.9979.

$$v = 19.84f - 8.01 \quad (2)$$

其中 v 是机器鱼游动速度, f 是关节摆动频率.

从图 3(b) 可以看出, 机器鱼转向角速度基本与偏置角成正比. 同样采用一次线性拟合的方法可以得出机器鱼转向角速度与关节偏置角之间的关系如式 (3). 机器鱼左转拟合方程的确定系数为 0.9938, 右转拟合方程的确定系数为 0.9692.

$$\begin{cases} \omega_l = 0.9898X + 6.012 \\ \omega_r = 0.9463X + 6.302 \end{cases} \quad (3)$$

其中 ω_l 为机器鱼左转角速度, ω_r 为机器鱼右转角速度. 由于机器鱼安装等各种原因, 相同数值的偏置角对应左转和右转的角速度会有一些差别.

4 机器鱼位姿控制算法的实现 (The realization of the robotic fish posture control algorithm)

4.1 机器鱼位姿控制问题

在 2D 空间内机器鱼的位姿信息包括位置和角度, 那么机器鱼的位姿信息可以用一个 3 维向量来描述, $\mathbf{p} = [x, y, \theta]^T$, 其中 (x, y) 是机器鱼在笛卡尔坐标系下的坐标, $\theta \in [-\pi, \pi]$ 是机器鱼的方向. 机器鱼的位姿控制可以描述为机器鱼从初始位姿 $\mathbf{p}_0 = [x_0, y_0, \theta_0]^T$ 出发, 最终机器鱼能到达期望位姿 $\mathbf{p}_r = [x_r, y_r, \theta_r]^T$. 机器鱼位姿控制过程如图 4.

4.2 机器鱼位姿误差的定义

机器鱼的期望位姿是 $\mathbf{p}_r = [x_r, y_r, \theta_r]^T$, 当前位姿是 $\mathbf{p}_c = [x_c, y_c, \theta_c]^T$. 本文中以机器鱼期望位姿的方向为 x' 轴正方向, 建立坐标系 $x'o'y'$, 如图 5 所示. 此时机器鱼的位姿误差 $\mathbf{p}_e = [x'_e, y'_e, \theta'_e]^T$ 可以用式 (4)

来表示:

$$\mathbf{p}_e = \begin{bmatrix} x'_e \\ y'_e \\ \theta'_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \theta_r & -\sin \theta_r & 0 \\ \sin \theta_r & -\cos \theta_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x_c \\ y_r - y_c \\ \theta_r - \theta_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

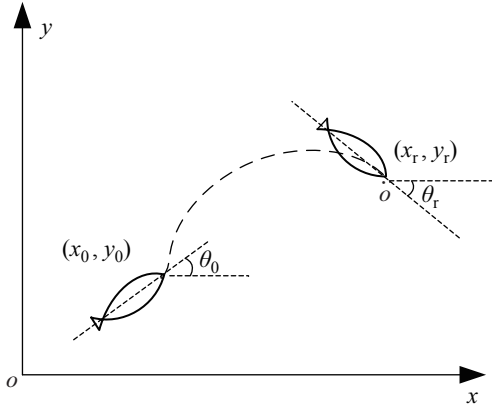


图4 机器鱼位姿控制过程示意图

Fig.4 The posture control process of the robotic fish

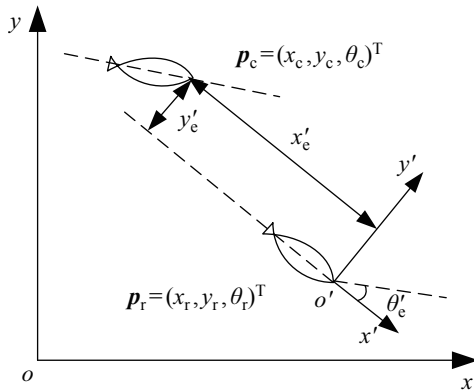


图5 机器鱼位姿误差定义示意图

Fig.5 The posture error definition of the robotic fish

4.3 改进的比例导引机器鱼位姿控制算法

由于没有准确的机器鱼运动学方程, 因此将机器鱼的运动学模型简化为独轮车模型, 模型方程见式(5).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(5)中 x, y, θ 分别是机器鱼的位置坐标和方向角. v, ω 分别是机器鱼的速度和角速度. 设计改进的比例导引控制律设计如下:

$$\begin{cases} v = k_v \sqrt{x'_e{}^2 + y'_e{}^2} \\ \omega = k_p y'_e + k_s \theta'_e \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中 x'_e, y'_e, θ'_e 是机器鱼的位姿误差, k_p, k_s, k_v 是可调的正参数. 在实际控制时, 考虑到机器鱼的运

动性能, 需要对 v 和 ω 进行限制, 最大的速度输入 v_{\max} 为 20 cm/s, 最大角速度输入 $|\omega_{\max}|$ 为 $\pi/2$ rad/s. 设 L_{fish} 为机器鱼鱼体长度, $L_{\text{fish}} \approx 45$ cm. 考虑到鱼体自身的长度和运动控制能力, 加上水中的扰动较多, 机器鱼的位姿可调整范围会有一定的限制, 需要根据机器鱼初始的位置误差的不同选取不同的控制律. 设机器鱼初始位置误差为 $x'_{e\text{init}}$, 当初始位置误差 $x'_{e\text{init}} < -1.5L_{\text{fish}}$ 时直接利用改进的比例导引控制律. 当初始位置误差 $x'_{e\text{init}} > -1.5L_{\text{fish}}$ 时采用切换控制的方式, 第1段的控制律利用比例导引控制^[9]使得机器鱼从初始位置 A 到达一个临时目标点 B , 目标点 B 选取在机器鱼期望方向的反向延长线上, 距离期望目标点 $1.5L_{\text{fish}}$ 的位置, 然后再调用改进的比例导引控制律实现机器鱼以期望的位姿到达 C 点. 机器鱼采用切换控制的位姿控制过程如图6所示.

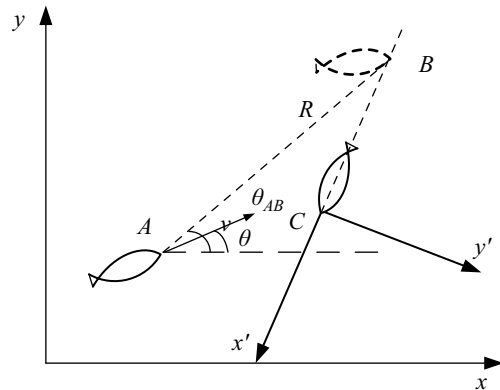


图6 切换控制下机器鱼位姿控制过程

Fig.6 The robotic fish posture control process under switch control

图6中机器鱼的速度为 v , A, B 两点之间的距离为 R , AB 连线与 x 轴夹角 θ_{AB} 被称为视线角, 机器鱼的方向角是 θ , 比例导引控制律见式(7), 其中 v 是机器鱼当前的速度, 设置为正常数. ω 为期望的机器鱼角速度. k 为可调正参数.

$$\begin{cases} \dot{R} = -v \cos(\theta_{AB} - \theta) \\ \omega = k \frac{\sin(\theta_{AB} - \theta)}{R} \end{cases} \quad (7)$$

值得注意的是, 比例导引控制并没有控制机器鱼到达临时目标点 B 时的方向, 机器鱼到达 B 点的方向和机器鱼的初始位姿以及比例导引控制参数有关. 为了使机器鱼能相对精确地调整到期望位姿, 在调用改进的比例导引控制时, 需要根据机器鱼到达临时目标点 B 时的位姿情况来选择不同的参数. 机器鱼到达临时目标点 B 时, 其方向与期望方向之间的角度差 $|\theta'_e| \in [0, 180]$, 因此可以通过实验的方

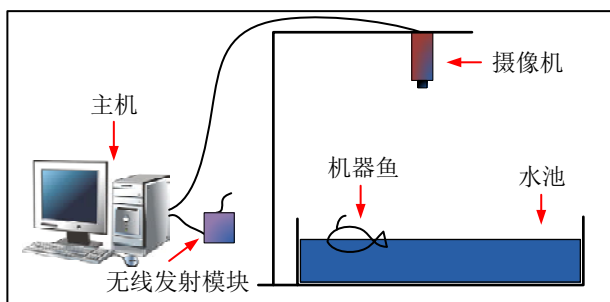
式获得 $\theta'_e = 0$ 和 $\theta'_e = 180$ 时改进的比例导引控制律的参数分别是 k_{p1} 、 k_{s1} 和 k_{p2} 、 k_{s2} , 则机器鱼到达临时目标点 B 时的控制律参数可根据式 (8) 来确定.

$$\begin{cases} k_p = k_{p1} + (k_{p2} - k_{p1}) \frac{|\theta'_e|}{180} \\ k_s = k_{s1} + (k_{s2} - k_{s1}) \frac{|\theta'_e|}{180} \end{cases} \quad (8)$$

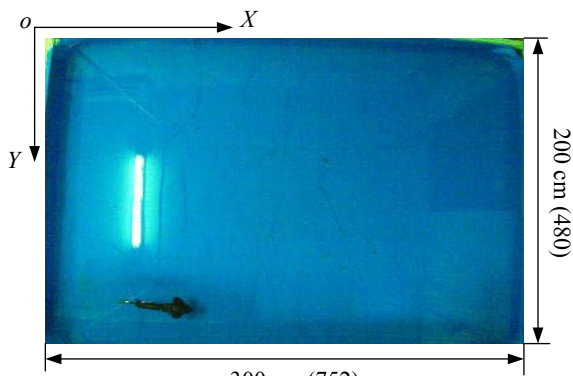
5 实验研究 (Experimental study)

5.1 实验平台

实验平台是由北京大学智能控制实验室自主开发的, 如图 7(a) 所示, 主要是由一个 $2\text{ m} \times 3\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ 的水池、全局摄像机、计算机和无线发射模块等组成. 全局摄像机获得机器鱼在水池中的实时图像并传给上位机, 上位机通过图像处理获得机器鱼在水池中的位置和方向角. 机器鱼的控制指令通过无线发射模块传输.



(a)



(b)

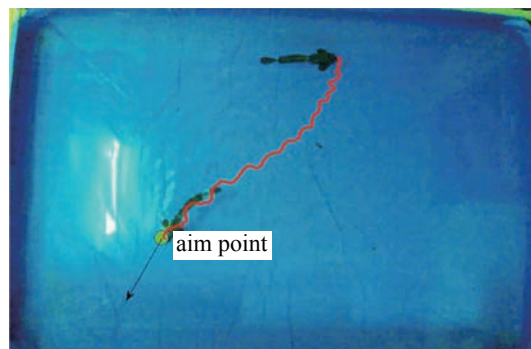
图 7 实验平台

Fig.7 The experiment platform

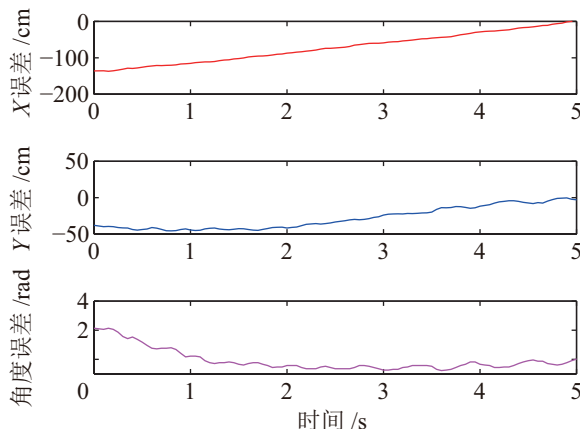
机器鱼在水池中的位姿信息都是相对于水池坐标系而言的, 以 3 m 的水池边为 X 轴, 2 m 的水池边为 Y 轴, 建立坐标系, 如图 7(b) 所示, 机器鱼的位置信息是通过图像处理获得的, 因此机器鱼的位置信息用像素点来表示. X 坐标范围为 0 到 752 个像素, Y 坐标范围为 0 到 480 个像素.

5.2 实验结果

机器鱼在水池中的初始位姿为 $(466, 70, -2)$, 期望位姿为 $(216, 320, 120)$, 此时 $x_{e\text{init}} < -1.5L_{\text{fish}}$, 直接采用改进的比例导引控制律, 机器鱼位姿控制的实验结果如图 8 所示.



(a)



(b)

图 8 机器鱼位姿控制实验结果 1

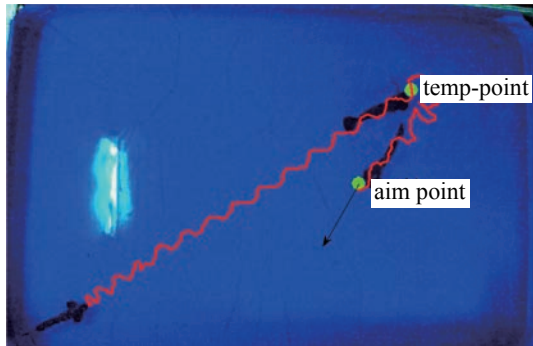
Fig.8 The result of robotic fish posture control experiment 1

图 8(a) 中圆点为机器鱼期望到达的目标点, 箭头所指方向是机器鱼到达目标点时期望的方向角, 曲线代表机器鱼在位姿调整过程中鱼头的轨迹, 轨迹的振荡是由于机器鱼游动时头部晃动所引起的, 是机器鱼的固有特性. 图 8(b) 是机器鱼位姿误差在位姿调整过程中的变化情况, 可以看出最终位置误差和角度误差都能收敛到 0 附近.

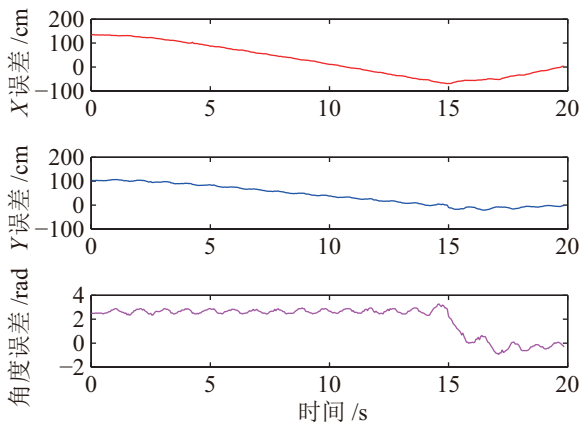
机器鱼在水池中的初始位姿为 $(177, 419, -22)$, 期望位姿为 $(500, 250, 120)$, 此时 $x_{e\text{init}} > -1.5L_{\text{fish}}$, 要采用切换控制的方式, 第 1 段的控制律是比例导引控制, 第 2 段的控制律是改进的比例导引控制. 机器鱼位姿控制的最终实验结果如图 9 所示.

机器鱼的运动实质上就是位姿到位姿的变化, 接下来为了进一步验证算法的有效性, 通过设置一系列目标点的方法, 使机器鱼跟踪一条由 2 个圆组成的“8”字型轨迹, 并与点到点模糊算法跟踪

“8”字型轨迹的实验结果进行对比。运用改进的比例导引控制算法，机器鱼在各目标点的位姿如图10所示，机器鱼在左边圆运动方向为顺时针，在右边圆运动方向为逆时针。



(a)



(b)

图9 机器鱼位姿控制实验结果2

Fig.9 The result of robotic fish posture control experiment 2

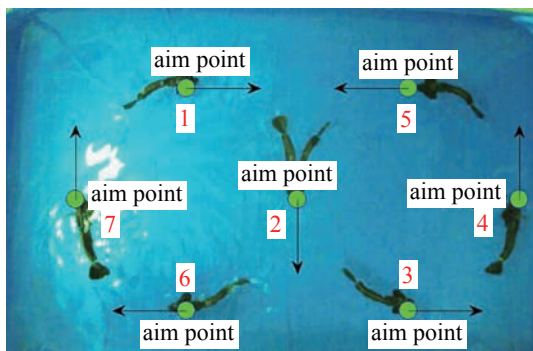


图10 机器鱼在各目标点的位姿

Fig.10 The posture information of the robotic fish at each aim point

图10中的圆点为各个期望的目标点，各点箭头所指的方向为机器鱼到达该点时的期望方向。定义机器鱼游一个完整的“8”字为一个运动周期，实验中机器鱼连续游动了3个周期，机器鱼游动一个周期会经过2次编号为2的目标点，所以编号为2的点会有6次角度的测量值，其他的点分别会有

3次角度测量值。机器鱼在不同目标点的期望角度值和的测量角度值见表1。

表1 机器鱼在不同目标点的期望角度值和测量角度值对比
Tab.1 Comparison of desired angle and measured angle of the robotic fish at different aim points

点的编号	1	2	3	4	5	6	7
期望角度值	0	90	0	-90	180	180	-90
实际角度值 1	4	81(92)	11	-83	178	163	-98
实际角度值 2	-4	83(87)	17	-87	180	169	-107
实际角度值 3	0	72(87)	11	-83	171	162	-96

机器鱼在轨迹跟踪过程中的位姿误差变化情况以及机器鱼偏置角随时间的变化情况见图11，由于“8”字型轨迹跟踪过程的对称性，因此图11给出了从临时目标点4逆时针运动到临时目标点2的过程中各个变量的变化情况。

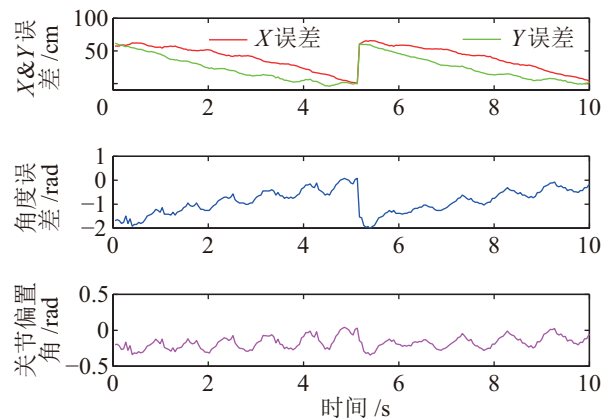


图11 轨迹跟踪过程中位姿误差和机器鱼偏置角变化情况
Fig.11 The changes of posture error and offset angle of the robotic fish in the process of trajectory tracking

— 改进的比例导引控制
— 点到点模糊控制 — 期望轨迹

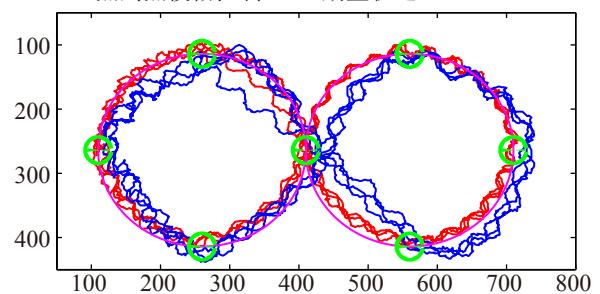


图12 不同算法下机器鱼的轨迹图

Fig.12 Trajectories of the robotic fish under different algorithms

机器鱼在两种不同算法下的运动轨迹如图12所示，图12中的圆点为设置的一系列目标点，红线为改进的比例导引位姿控制算法下的机器鱼运动轨迹图，蓝线为点到点模糊算法下的机器鱼运动轨

迹图, 粉线为期望的轨迹. 期望的“8”字轨迹由 2 个圆组成, 根据实验数据可以用圆的方程来拟合出在两种不同控制算法下机器鱼的轨迹方程. 运用改进的比例导引控制算法时机器鱼轨迹拟合的圆心 x 坐标、圆心 y 坐标以及半径值与期望值的误差平均值分别是 0.3%、1.3% 和 2.7%; 运用点到点模糊控制算法时机器鱼轨迹拟合的圆心 x 坐标、圆心 y 坐标以及半径值与期望值的误差平均值分别是 5.6%、1.5% 和 6.7%. 另外, 比较在两种不同算法下, 机器鱼游动轨迹和期望轨迹上各点之间欧氏距离的平均值, 改进的比例导引位姿控制算法是 10.1 个像素点, 而点到点模糊算法是 21.2 个像素点.

6 结论 (Conclusion)

针对机器鱼的位姿控制问题, 将一种线性的 CPG 模型应用于机器鱼的运动控制, 实现机器鱼游动模态的连续切换, 增强了机器鱼的姿态控制能力. 随后通过实验分析了机器鱼的运动速度和转向角速度与 CPG 参数的关系. 最后提出了改进的比例导引位姿控制算法, 并根据机器鱼初始位姿和终止位姿的相对关系, 采用了分段切换控制的方式. 通过实验验证了算法的有效性.

在现有工作的基础上, 将来还有很多工作需要继续开展, 例如在有限的水池中进行实验时在选取临时目标点时的边界问题、机器鱼以最佳路径实现位姿到位姿控制的问题、机器鱼利用位姿控制跟踪任意轨迹的问题等.

参考文献 (References)

- [1] 喻俊志, 陈尔奎, 王硕, 等. 仿生机器鱼研究的进展与分析 [J]. 控制理论与应用, 2003, 20(4): 485-491.
Yu J Z, Chen E K, Wang S, et al. Research evolution and analysis of biomimetic robot fish[J]. Control Theory And Applications, 2003, 20(4): 485-491.
- [2] Hirata K, Takimoto T, Tamura K. Study on turning performance of a fish robot[C]//First International Symposium on Aqua Bio-Mechanisms. 2000: 287-292.
- [3] Yu J Z, Tan M, Wang S, et al. Development of a biomimetic robotic fish and its control algorithm[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2004, 34(4): 1798-1810.
- [4] Zou K X, Wang C, Xie G M, et al. Cooperative control for trajectory tracking of robotic fish[C]//American Control Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2009: 5504-5509.
- [5] 王亚飞, 方洋旺, 周晓滨. 比例导引律研究现状及其发展 [J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(10): 8-12.
Wang Y F, Fang Y W, Zhou X B. The status quo of proportional navigation guidance law and its development[J]. Fire Control and Command Control, 2007, 32(10): 8-12.
- [6] Shao J Y, Wang L, Yu J Z. Development of multiple robotic fish cooperation platform[J]. International Journal of Systems Science, 2007, 38(3): 257-268.
- [7] Li L, Wang C, Xie G M. Modeling of a carangiform-like robotic fish for both forward and backward swimming: Based on the fixed point[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2014: 800-805.
- [8] Delcomyn F. Neural basis of rhythmic behavior in animals[J]. Science, 1980, 210(4469): 492-498.
- [9] Wang C, Xie G M, Wang L, et al. CPG-based locomotion control of a robotic fish: Using linear oscillators and reducing control parameters via PSO[J]. International Journal of Innovative Computing, Information and Control, 2011, 7(7B): 4237-4249.
- [10] Yu J Z, Wang M, Su Z S, et al. Dynamic modeling of a CPG-governed multijoint robotic fish[J]. Advanced Robotics, 2013, 27(4): 275-285.
- [11] Wu Z X, Yu J Z, Tan M. CPG parameter search for a biomimetic robotic fish based on particle swarm optimization[C]//International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, USA: IEEE, 2012: 563-568.
- [12] Li L, Wang C, Xie G M. A general CPG network and its implementation on the microcontroller[J]. Neurocomputing, 2015, 167: 299-305.
- [13] Li L, Wang C, Xie G M, et al. Digital implementation of CPG controller in AVR system[C]//33rd Chinese Control Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2014: 8293-8298.
- [14] Ijspeert A J, Crespi A, Ryczko D, et al. From swimming to walking with a salamander robot driven by a spinal cord model [J]. Science, 2007, 315(5817): 1416-1420.
- [15] Wang W, Guo J J, Wang Z J, et al. Neural controller for swimming modes and gait transition on an ostraciiform fish robot[C]//IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 1564-1569.
- [16] Hu Y H, Zhao W, Xie G M, et al. Development and target following of vision-based autonomous robotic fish[J]. Robotica, 2009, 27(7): 1075-1089.

作者简介:

- 刘安全 (1991 -), 男, 硕士生. 研究领域: 水下机器人, 智能控制.
- 李亮 (1989 -), 男, 博士生. 研究领域: 仿生机器人, 鱼群的流体力学和动物集群行为.
- 罗文广 (1967 -), 男, 硕士, 教授. 研究领域: 智能控制及智能自动化, 智能检测技术, 汽车电子控制技术.