

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.11.013

一种机器鱼的位姿镇定控制算法

刘傲¹, 蔡勇², 谢广明¹

(1. 北京大学工学院, 北京 100871; 2. 北京航空航天大学宇航学院, 北京 100191)

摘要: 通过研究机器鱼的位姿镇定问题, 提出一个两阶段的控制律。2 个阶段分为: 快速游向目标点和精确的位姿调整。在第一阶段, 通过使用一种改进后的比例导引控制律, 使机器鱼快速游向目标点; 在第二阶段, 采用一种时变反馈控制律来精确调整其位置和方向。最后, 在全局视觉实验平台上进行了机器鱼的推球实验, 实验结果验证了该算法的有效性。

关键词: 机器鱼; 位姿镇定; 比例导引控制律; 时变反馈控制律; 实验研究

中图分类号: TP301.6 **文献标志码:** A

A Control Algorithm for Posture Stabilization of Robot Fish

Liu Ao¹, Cai Yong², Xie Guangming¹

(1. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China;

2. School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In this paper, a two-stage control law is proposed for posture stabilization problem of robot fish. The two stages includes: fast position approaching and accurate posture adjusting. In the first stage, a modified proportional navigation guidance law is used such that the robot fish swims fast toward the target point. In the second stage, a time-varying feedback control law is used to adjust its position and direction accurately. Finally, the control law is applied in a robot fish pushing ball experiment on the global vision experimental platform. The results show that the control law can be used conveniently and effectively.

Key words: robot fish; posture stabilization; proportional navigation guidance law; time-varying feedback control law; experimental research

0 引言

为了使水下机器人完成海洋环境监测、海底救援及水下作业等复杂任务, 对其进行运动控制非常重要^[1]。由于机器鱼所处的环境是动态变化、非线性的, 无法建立精确的水动力学模型^[2], 所以当前大多数的机器鱼研究是以行为机制作理论基础的^[3]。为了更好地研究机器鱼的行为, 就需要对机器鱼的运动进行更精确的控制。

在现有的水中机器人全局视觉组比赛中^[4], 有一个点到点的运动控制函数可以控制机器鱼的基本运动^[5]。系统可以得到目前机器鱼所处的位置, 如果再给定一个预期的位置, 那么通过调用点到点函数, 机器鱼就能以一种最短的路径游到目标点^[6]。但是这种路径规划方法只考虑了位置, 没考虑方向。文献[7]提出了一种机器鱼位姿镇定控制算法, 将机器鱼的线速度和角速度作为控制输入, 很好地实现了从任意初始位姿到任意终止位姿的镇定。笔者通过多水下机器人协作控制平台^[8]进行实验研究, 以验证该位姿控制镇定算法的有效性。

1 机器鱼位姿控制的问题描述

1.1 机器鱼简介

机器鱼由控制单元、通讯单元、驱动单元、支撑单元和附件等组成^[9], 如图 1。

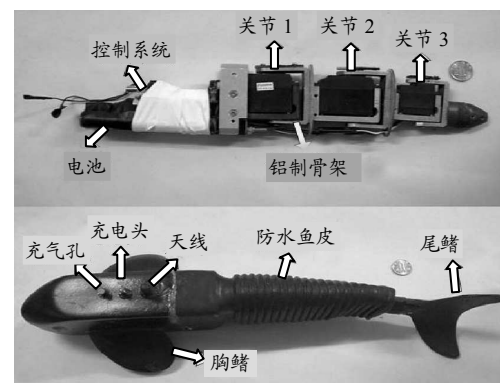


图 1 机器鱼的机械结构

在现有的水中机器人全局视觉组的比赛当中, 可以针对具体的比赛项目, 编写相应的比赛策略。在编写策略时, 通过直接给机器鱼运动的速度和方向进行相应档位的赋值, 使其能够按照预期的速度

收稿日期: 2012-05-29; 修回日期: 2012-06-30

基金项目: 国家自然科学基金(60774089, 61005082, 61020106005)和教育部博士点基金(20100001120005); 机器人技术与系统国家重点实验室开放研究项目资助

作者简介: 刘傲(1985—), 男, 湖北人, 硕士研究生, 从事多机器鱼协作研究。

和方向前进。

1.2 机器鱼的运动模型

在水中机器人全局视觉组比赛中, 机器鱼在一个有限的平面里运动, 笔者采用一个三维向量 $p = [x, y, \theta]^T$ 来描述其位姿信息。其中 (x, y) 是其在标准笛卡尔坐标系下的坐标, $\theta \in [-\pi, \pi)$ 则是其方向。因为没有精确的水动力学模型, 所以建立如下的机器鱼运动学模型:

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

其中, 控制输入 θ 和 ω 是机器鱼的线速度和角速度。

考虑到受机器鱼本身硬件的限制, 加之其不能实现倒游, 以及线速度和角速度都是有上限的, 所以存在 $\theta_{\max}, \omega_{\max} < +\infty$, 并且对所有的时间 t , 都有 $0 \leq \theta(t) \leq \theta_{\max}, |\omega(t)| \leq \omega_{\max}$ 。再者, 机器鱼有最小转弯半径 $R_{\min} > 0$, 而转弯半径又满足公式 $R(t) = \theta(t)/\omega(t)$, 因此可以得到 $\theta_{\max} \leq R_{\min} \omega_{\max}$ 。

1.3 位姿镇定的问题描述

如图 2 所示, 任意给定机器鱼一个初始的位姿 $P_0 = [x_0, y_0, \theta_0]^T$, 确定一个适当的控制输入 $\theta(t)$ 和 $\omega(t)$, 使得机器鱼能够沿着一条合理的运动路径镇定在终止位姿 $P_f = [x_f, y_f, \theta_f]^T$ 。

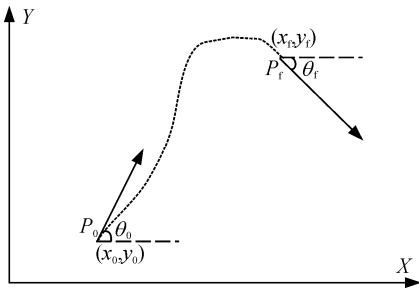


图 2 位姿镇定的问题描述

2 任意初始位姿到任意终止位姿的镇定

在文献[7]中, 设计了针对一类机器鱼的两阶段的控制律, 以实现其从任意初始位姿到任意终止位姿的镇定。2 个阶段是: 1) 快速游向目标点; 2) 精确的位姿调整。在第一阶段, 通过调用一种改进的比例导引控制律使得机器鱼迅速地游向临时目标点; 在第二阶段, 通过使用一种时变的反馈控制律来实现机器鱼方向和位置的精确调整。

如图 3 所示, 机器鱼从起始点 (x_0, y_0) 以与 x 轴成

θ_0 的角度出发, 在第一阶段控制律的作用下, 沿着虚线到达临时目标点 (x_{tg}, y_{tg}) ; 再调用第二阶段控制律, 使机器鱼继续沿着虚线镇定在最终目标点 (x_f, y_f) , 并将方向调整到最终目标方向 θ_f 。

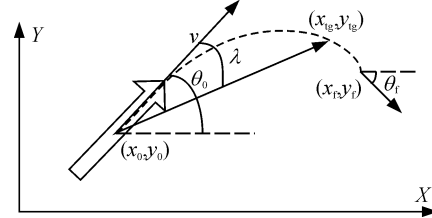


图 3 从初始位姿镇定到终止位姿的运动轨迹

2.1 第一阶段的控制律

先由系统信息得知机器鱼的初始位姿, 包括初始点坐标 (x_0, y_0) 和初始方向 θ_0 , 再设定机器鱼的终止位姿, 包括终止点坐标 (x_f, y_f) 和终止方向 θ_f 。

由机器鱼的终止点坐标 (x_f, y_f) , 可以先设定出临时目标点的坐标 (x_{tg}, y_{tg}) 。再根据起始点的坐标和临时目标点的坐标, 得到机器鱼起始方向和机器鱼起始点坐标到临时目标点坐标的连线方向的夹角 λ 。

为防止初始控制量过大, 需要先判断夹角 λ 的大小。如果 λ 过大, 则先让机器鱼在低速状态下做一个 U-turn 运动, 当 λ 控制到一定范围内时, 则调用第一阶段控制律。

比例导引控制律^[7]为

$$\begin{cases} \theta(t) = \theta_{\max} \\ \omega(t) = (1 - \sigma(t))k\lambda(1 + \tau_w(\frac{(k-2)\dot{r}}{r})) + \\ \sigma(t)(\text{sgn}(\theta(t) - \lambda(t))\frac{\theta_{\max}}{R_{\min}} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\theta(t)$ 为线速度的控制输入; $\omega(t)$ 为角速度的控制输入; k 为正常数。

式 (2) 中的 σ 如式 (3)

$$\sigma = \begin{cases} 1, & \text{if } y \geq y_{tg} \text{ and } \theta_s \leq \theta - \lambda \leq \pi \\ 1, & \text{if } y < y_{tg} \text{ and } \theta_s \leq \theta - \lambda \leq \pi \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

式 (2) 中的 \dot{r} 如式 (4)

$$\dot{r} = -\theta \frac{A+B}{\sqrt{(x_{tg}-x)^2 + (y_{tg}-y)^2}} \quad (4)$$

式中: $A = (x_{tg} - x) \cos(\theta(t)); B = (y_{tg} - y) \sin(\theta(t))$ 。

$$\lambda(t) = a \tan 2(r(t) \cdot j(t), r(t) \cdot i(t))$$

$$\dot{\lambda}(t) = \frac{r(t)}{|r(t)|} [(v(t) \cdot j(t))i(t) + (v(t) \cdot i(t))j(t)]$$

式中 i, j 是 x 轴和 y 轴的单位向量。

2.2 第二阶段的控制律

当机器鱼游到临时目标点时，第一阶段结束，进入第二阶段。这一阶段调用的控制律要实现机器鱼精确的方向调整和位置调整，最终能够镇定在终止位姿。

先进行坐标变换，如图 4 所示。

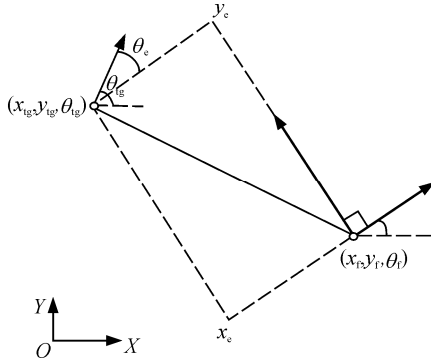


图 4 坐标变换

其中： $(x_{ig}, y_{ig}, \theta_{ig})$ 为机器鱼在临时目标点的位姿；

(x_f, y_f, θ_f) 为机器鱼的终止位姿。

以终止点为原点建立参考坐标系 $F_f = \{(x_f, y_f), i_f, j_f\}$ ，则有

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_f & \sin \theta_f & 0 \\ -\sin \theta_f & \cos \theta_f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{ig} - x_f \\ y_{ig} - y_f \\ \theta_{ig} - \theta_f \end{bmatrix} \quad (5)$$

对时间求导，得

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & 0 \\ \sin \theta_e & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \end{bmatrix} \quad (6)$$

令

$$\begin{cases} a_1 = x_e \\ a_2 = y_e \\ a_3 = \tan \theta_e \\ u_1 = \theta \cos \theta_e \\ u_2 = \omega \cos^{-2} \theta_e \end{cases}$$

得到

$$\begin{cases} \dot{a}_1 = u_1 \\ \dot{a}_2 = u_1 a_3 \\ \dot{a}_3 = u_2 \end{cases} \quad (7)$$

第二阶段控制律^[7]为

$$\begin{cases} u_1(t) = -k_1 \sin^2(t) a_1(t) \\ u_2(t) = -u_1(t)(k_2 a_2(t) + k_3 a_3(t)) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \theta = -k_1 \sin^2 t \frac{(x-x_f) \cos \theta_f + (y-y_f) \sin \theta_f}{\cos(\theta-\theta_f)} \\ \omega = k_1 \sin^2 t ((x-x_f) \cos \theta_f + (y-y_f) \sin \theta_f) + \\ (k_2(y-y_f) \cos \theta_f - k_2(x-x_f) \sin \theta_f + \\ k_3 \tan(\theta-\theta_f)) \cos^2(\theta-\theta_f) \end{cases} \quad (8)$$

2.3 详细的流程图

以上两阶段的控制律如图 5 所示。

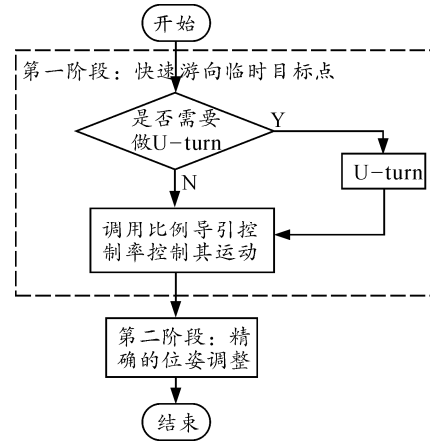


图 5 两阶段控制律流程

在第一阶段，先判断是否需要做一个 U-turn 运动。如果不需要，则直接调用改进后的比例导引控制律；否则，在调用比例导引控制律之前先做 U-turn 运动。当机器鱼的坐标与临时目标点的坐标之间的位置误差 $\sqrt{(x(t)-x_{ig})^2 + (y(t)-y_{ig})^2}$ 足够小的时候，第一阶段结束，进入第二阶段。

当机器鱼的位姿与最终位姿间误差 $\sqrt{(x(t)-x_f)^2 + (y(t)-y_f)^2 + (\theta(t)-\theta_f)^2}$ 足够小的时候，整个位姿镇定阶段结束。

2.4 参数的选择

在第一阶段，笔者选择 l 为 2 倍的鱼体长度， $\theta = 1.4 \text{ rad}$ 。在经过一系列的实验后，笔者得到的延时时间 $T_\omega \approx 0.8 \text{ s}$ 。

在第二个阶段的实验后，笔者发现当参数设为 $k_1=0.6, k_2=12, k_3=18$ 时，控制律执行的效果最好。

3 实验研究

在多机器鱼协作控制平台下^[10]对位姿控制镇定算法进行验证。全局视觉中场地信息如图 6 所示，水池长 300 cm，宽 200 cm，球门宽 40 cm。

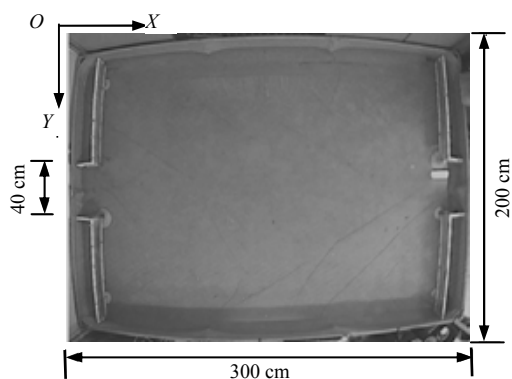


图 6 水池信息

3.1 机器鱼线速度和角速度的档位设置

现有的机器鱼已在底层中固化了 16 个速度档位和 15 个方向档位。速度档位从 0 档到 15 档依次增加, 其中 0 档时, 机器鱼停止运动; 15 档时, 机器鱼运动速度最大。而方向档位则从 0 档到 14 档, 其中 7 档为中间档位, 此时机器鱼的运动方向为正前方, 即实现不发生向左或向右偏转的直游; 从 6 档到 0 档, 机器鱼向左转弯的角度逐渐增大, 其中 0 档为最大左转弯档位; 而从 8 档到 14 档, 机器鱼向右转弯的角度逐渐增大, 其中 14 档为最大右转弯档位。

3.2 机器鱼线速度和角速度的离散化

在位姿镇定的算法中, 给定的输入为连续的速度值和角速度值。而在实际的实验中, 机器鱼的底层已固化成了有限的速度档位和方向档位, 将实际的线速度和角速度输入到实验研究中时, 就需要对其进行离散化处理, 将某一个范围内的线速度值归纳到某个速度档位下, 将某一个范围内的角速度值归纳到某个方向档位下。

3.2.1 针对线速度值范围的离散化处理程序

1) 测出机器鱼每个速度档位对应的最大速度值;

2) 将测出的机器鱼的速度值制成相应的表格;

3) 将表格中的速度值进行离散化。即将所有的速度值进行区间化处理, 这样可以将每个速度档位对应到某个固定的速度区间内;

4) 将利用位姿镇定算法算出需要适时控制的速度值和已经过离散化处理的速度区间值进行对比;

5) 如果实际需要控制的速度值在某个速度区间内, 则将此区间值又对应到相应的速度档位上,

即可实现对机器鱼的线速度的控制。

3.2.2 针对角速度值范围的离散化处理程序

1) 测出机器鱼每个转弯档位对应的角速度值;

2) 将测出的机器鱼的角速度值制成相应的表格;

3) 将表格中的角速度值进行离散化。即将所有的角速度值进行区间化处理, 这样可以将每个方向档位对应到某个固定的角速度区间内;

4) 将利用位姿镇定算法算出的需要适时控制的角速度值和已经过离散化处理的角速度区间值进行对比;

5) 如果实际需要控制的角速度值在某个角速度区间内, 则将此区间值又对应到相应的转弯档位上, 即可实现对机器鱼的角速度的控制。

4 实验结果与分析

4.1 实验结果

4.1.1 第一阶段控制算法的实验结果

机器鱼的初始位姿如图 7 所示。



图 7 机器鱼的初始位姿

当机器鱼的初始朝向与机器鱼起始点到临时目标点的连线方向角度差过大时, 机器鱼会先实现一个 U-turn 运动, 如图 8 所示。



图 8 U-turn 运动

当实现 U-turn 运动后,调用改进后的比例导引控制律,使机器鱼迅速地游向临时目标点,如图 9 所示。



图 9 迅速游向临时目标点

当机器鱼游到临时目标点之后,第一阶段结束,如图 10 所示。

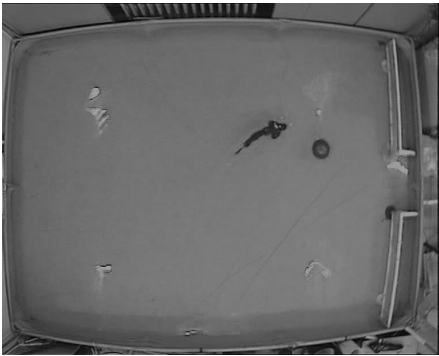


图 10 游到临时目标点

4.1.2 第二阶段控制算法的实验结果

当机器鱼到达临时目标点后,开始调用第二阶段控制算法,主要是进行精确的位姿调整,包括精确的位置和方向的调整。图 11 所示为精确的位置和方向调整。



图 11 精确的位置和方向调整

在第二阶段控制律的作用下,机器鱼最终将镇定在终止位姿,如图 12 所示。

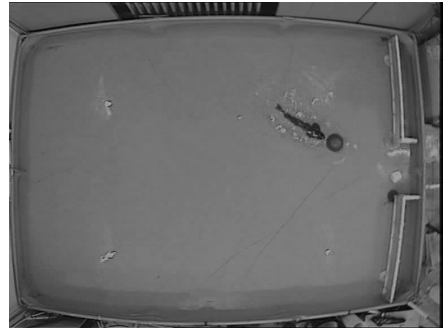


图 12 机器鱼镇定在最终位姿

4.2 实验分析

由图 7~12 可见,将控制机器鱼运动的输入进行离散化处理之后,两阶段的控制律可以较好地实现机器鱼从任意初始位姿到任意终止位姿的镇定。

5 结束语

实验结果证明:在现有的多水下机器人协作控制平台下,利用位姿控制镇定算法^[7],将线速度和角速度先分别进行离散化处理,再各自对应到机器鱼底层程序中的速度档位和方向档位上,能使机器鱼从任意初始位姿镇定到任意的终止位姿。但由于该算法并未考虑边界和障碍物的影响,还有一定的局限性。在接下来的研究中,应考虑更多的因素,比如在有限的场地内,存在障碍物等情况。

参考文献:

- [1] 李庆春,高君伟,谢广明,等.基于模糊控制的仿生机器鱼避障算法[J].兵工自动化,2011,30(12):65-69.
- [2] 赵盛昌,纪志坚,谢广明,等.基于虚拟切线圆的机器鱼比赛进攻策略[J].兵工自动化,2010,29(11):89-91.
- [3] 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.
- [4] 朱远航,陈鹏慧,蔡琼,等.一种机器鱼水球仿真比赛裁判自动控制系[J].兵工自动化,2010,29(11):79-81.
- [5] 刘舒,禹梅,谢广明.基于位置反馈的多机器鱼编队控制[J].兵工自动化,2011,30(12):75-78.
- [6] 柴仲明,禹梅,刘舒.基于遗传算法的机器鱼路径规划[J].兵工自动化,2010,29(11):92-96.
- [7] 北京大学智能控制实验室.机器鱼的控制与优化[R].北京大学技术报告,2011.
- [8] 王晨,谢广明,王龙.基于全局视觉的机器人水球比赛[C].2009年中国智能自动化会议论文集.北京:中国自动化学会智能自动化专业委员会,2009:726-732.
- [9] 张君华,石红,王若鹏,等.机器人水球比赛中的目标跟踪[J].兵工自动化,2011,30(12):60-64.
- [10] Shao Jinyan, Yu Junzhi, Fang Yimin, et al. A hierarchical framework for cooperative control of multiple bio-mimetic robotic fish[C]. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Edmonton, Alta., Canada, IEEE, 2005: 777-783.