

文章编号: 1001-0920(2004)04-0452-03

一种基于视觉的仿生机器鱼实时避障综合方法

陈尔奎¹, 喻俊志², 王 硕², 谭 民²

(1. 江南大学 信控学院, 江苏 无锡 214036; 2. 中国科学院自动化研究所 复杂系统与智能科学重点实验室, 北京 100080)

摘 要: 提出了一种基于视觉的仿生机器鱼实时避障综合方法. 该方法基于 HIS 颜色模型, 利用 MMX 指令和 SSE 指令, 采用并行处理算法实现图像的快速处理; 然后, 基于栅格法建立环境模型, 利用势场法获得优化路径规划策略. 在此基础上, 采用模糊方法对机器鱼的运动方向进行控制, 利用速度分布函数对机器鱼的运动速度进行控制. 实验结果表明了所提方法的有效性和可达性.

关键词: 仿生机器鱼; 视觉信息; 实时避障; 综合方法

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Real-time obstacle-avoidance synthesized method for bionic robot fish based on visual information

CHEN Er-kui¹, YU Jun-zhi², WANG Shuo², TAN Min²

(1. College of Information and Electrics, Southern Yangtze University, Wuxi 214036, China; 2. Lab of Complex Systems and Intelligence Science, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China.

Correspondent: CHEN Er-kui, E-mail: cek-chen@sohu.com)

Abstract: A real-time obstacle-avoidance synthesized method based on visual information for a bionic robot fish is presented. In this method, based on HIS color model, quick image processing is achieved by using of MMX and SSE instructions as well as parallel processing algorithm. An accurate environment model is established based on the grids method. And some optimal strategies of the path-planning are obtained utilizing the potential field method. The motion orientation and speed of the fish are controlled by the fuzzy method and the speed distribution function respectively. Experimental results show that this method is efficient and attainable.

Key words: bionic robot fish; visual information; real-time obstacle avoidance; synthesized method

1 引 言

目前, 仿生机器鱼的研究重点主要集中在仿生推进模式的水动力学模型和开发高效、高机动性的机器鱼等方面^[1~6], 而对机器鱼的导航与避障方法研究较少. 机器鱼导航与实时避障的研究涉及到机器鱼本体和障碍物的识别与定位, 以及机器鱼的运动方向和速度控制. 视觉系统是用于机器鱼识别与定位的传感器, 但受图像处理技术和计算机运算速

度的限制, 实时性是制约机器鱼导航与实时避障的关键问题. 由于流体力学和运动学的复杂性, 试图通过建立数学模型控制机器鱼的运动方向是极其困难的. 此外, 受水动力学惯性的影响, 虽然实验用机器鱼的速度已降为零, 但机器鱼仍会在水中漂移一段距离. 因此, 如何在速度和应力之间找到一种平衡是机器鱼平稳运动至关重要的一环.

基于此背景, 本文提出了一种基于视觉信息的

收稿日期: 2003-03-27; 修回日期: 2003-07-14.

基金项目: 国家 863 计划项目(2001AA422370).

作者简介: 陈尔奎(1970—), 男, 山东成武人, 高工, 博士, 从事机器人、智能控制等研究; 喻俊志(1975—), 男, 湖南长沙人, 博士生, 从事多机器人系统、机器鱼控制等研究.

仿生机器鱼实时避障方法. 利用 MMX 和 SSE 技术的数据处理并行性来提高机器鱼图像处理的实时性; 采用模糊方法对机器鱼的运动方向进行控制; 运用分段速度控制策略在速度和应力之间寻求平稳性, 以此对机器鱼的运动速度实施控制. 最后, 在研制的机器鱼上实现了上述算法.

2 环境描述

研制的机器鱼长 43 cm, 宽 4.8 cm, 高 7.5 cm, 在有障碍物的水池中运动. 研究重点在于验证算法的可行性, 障碍物的形状并不重要, 因此在水池中放置了若干个半径不同的圆形障碍物. 利用悬挂在水池正上方的 CCD 像机作为传感器采集水池环境信息, 并用正方形栅格(选鱼长的一半, 约 22 cm 作为栅格的边长) 将此信息映射到像平面内. 每一个栅格有一个累积值(CV), 规定 CV 值的范围为 0~5, 用来表示此栅格中存在障碍物的可信度. 在机器鱼运动过程中, 环境不断被 CCD 像机检测, 存在障碍物的栅格若被重复检测, 则其 CV 值会增加; 否则, 维持原值不变. 整个过程如图 1 所示.

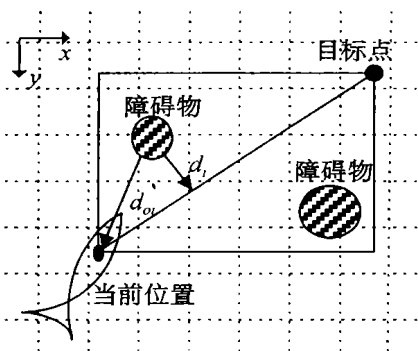


图 1 检测的矩形区域

3 机器鱼和障碍物的图像识别算法

视觉导航中图像处理的速度是关键. 在图像识别算法中, 颜色信息是主要的识别依据. 考虑到场地背景和机器鱼本体的特征, 识别采用色标法. 给机器鱼和障碍物都贴上一定的颜色标志.

对同一颜色属性物体, 在光源种类、照度、物体反射特性等不同条件下, 经 CCD 摄像机采集的视频信号的 RGB 颜色值分布很散且 3 个分量关联变化, 很难确定颜色分割时的 RGB 阈值. 因此, 本文采用 HIS 表色系统, 即采用色调 H, 饱和度 S 和亮度 I 来量化颜色信息^[7~9]. 由于不同的物体很少具有相同的色度和饱和度, 同时, 强度分量受环境光照影响大且对颜色分割的影响不大, 故在对机器鱼、障碍物等实体的颜色分割时, 可只选取色调 H 和饱和度 S 作

为判别依据^[10]. 在检测待检像素时, 满足约束条件

$$\begin{cases} H_{\min} < H < H_{\max}, \\ S_{\min} < S < S_{\max}, \end{cases} \quad (1)$$

即可认为是要检测的点. 式中: H_{\min} 和 H_{\max} 分别为色调的最小阈值和最大阈值; S_{\min} 和 S_{\max} 分别为饱和度的最小阈值和最大阈值. H_{\min} , H_{\max} , S_{\min} 和 S_{\max} 均在初始人机交互模块中设定并优化.

为了消除图像在量化和传输过程中产生的寄生效应, 应对颜色分割后形成的二值化图像进行平滑化处理. 在平滑过程中, 采用 8 点邻域平均法^[8]. 平滑处理后, 对于大于某一阈值的实体目标点集合 R ($R \subseteq W$, 且 $g(x, y) = 1$), 分别计算其 x 坐标的质心 $x_c(R)$ 和 y 坐标的质心 $y_c(R)$, 则目标域的质心坐标为 $C(R) = (x_c(R), y_c(R))$, 其中

$$x_c(R) = \frac{\sum_{(x,y) \in R} x}{A(R)}, y_c(R) = \frac{\sum_{(x,y) \in R} y}{A(R)}. \quad (2)$$

这里 $A(R)$ 为目标区域 R 内的像素点数. 通过目标区域 R 质心坐标的计算, 可识别机器鱼、障碍物等实体的中心位置.

在图像识别过程中, 像素点和像素点之间在时间、空间上相互独立且运算结果互不相关, 因此为了充分利用机器的字长优势, 采用 MMX 技术和 SSE 技术的数据处理并行性, 采用汇编语言编写图像处理程序^[11, 12], 在程序中实现一次对多个像素点的并行操作, 即在一次操作中, 把多个像素组合成像素组作为输入. 经过处理后, 识别机器鱼、障碍物等实体的时间约为 20 ms 左右, 能够满足实时性要求.

4 路径规划和避障策略

以机器鱼不碰到障碍物而游到目标点的距离和 d_{sum} 为代价函数, 希望在机器鱼运动空间内快速找到一条无碰撞的最小 d_{sum} . 另外考虑到机器鱼将来的应用环境主要是全局未知环境, 因此把以机器鱼与目标点之间连线为对角线的矩形区域内环境当作感知信息. 随着机器鱼的移动, 矩形的大小也在变化. 矩形变化一次, 若障碍物仍在其内, 则其 CV 值增加 1, 如超过 5, 则不再增加.

定义图 1 所示的矩形区域内的障碍物数目为 n . 第 i 个障碍物距机器鱼与目标点之间连线的垂直距离为 d_i ($i = 1, 2, \dots$), 距机器鱼的距离为 d_{oi} ($i = 1, 2, \dots$), 并设定门槛值为 d_0 . 导航与避障策略如下:

1) 对所有的障碍物, 如果 $d_i > d_0$, 则使机器鱼直接向目标点运动.

2) 如果只有一个障碍物, 并且其安全距离小于 d_0 , 则在该障碍物四周各一定数目的栅格内寻找最小的 d_{sum} , 然后使机器鱼按照规划的路径向目标点运动.

3) 如果有两个或两个以上的障碍物, 并且存在 $m(m \geq 1)$ 个障碍物, 其 $d_i < d_0 (i = 1, 2, \dots, m)$, 则采用局部势场法^[13].

4) 在机器鱼的运动过程中, 如果机器鱼运动到距某一障碍物较近时, 为了增加避障的可靠性, 设一安全层, 如图 2 所示. 机器鱼若进入安全层则加大斥力系数 F_α , 加大的程度与 CV 值有关. CV 值越大, 系数放大越多. 图 2 中 r_1, r_2 和 F_α 根据实验经验来选择, 且 $r_1 + r_2 < d_0$.

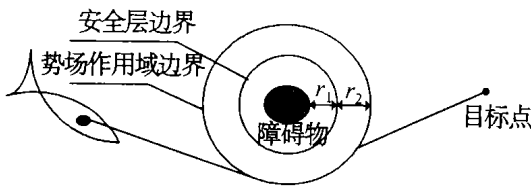


图 2 障碍物的安全层

5 方向和速度控制

机器鱼在游动过程中, 其方向控制主要是通过控制其转弯来实现的. 由于涉及到复杂的流体力学和运动学, 目前还没有合适的数学模型来描述鱼类的转弯过程, 因此不能依靠通过建立机器鱼转弯数学模型的办法来进行转弯控制. 根据鱼类转弯模式的定性说明和获得的实验数据, 采用模糊控制方法可实现机器鱼的方向控制, 达到了较高的控制精度, 具体实现参见文献[14].

速度控制旨在使机器鱼安全、平稳、快速地沿规划路径运动到目标点. 由于机器鱼速度的调节是通过改变电机的摆动频率来实现的, 一方面, 在某一特定频率下, 机器鱼与水作用产生共振造成机器鱼的运动呈现摇摆和晃动; 另一方面, 现阶段实验用的机器鱼缺少瞬时制动装置, 即使机器鱼速度降为零, 而机器鱼仍在水中漂移一段距离. 因此, 如何在速度和应力之间找到一种平衡是机器鱼平稳运动至关重要的一环. 通过限制机器鱼从静止状态运动到最佳平稳速度 V_f (在此速度下, 机器鱼的摇摆和晃动最小) 的最大加速度 A_m , 可以限制机器鱼运动的惯性力, 并在距目标点一定距离时开始减速(减速运动过程中加速度为 $-A_m$), 最后依靠惯性力漂移到目标点, 较好地解决了机器鱼运动制动和平稳性之间的矛盾. 采用 S 型速度分布函数, 机器鱼的运动大体分

为加速、匀速、减速和漂移 4 个阶段. 限于篇幅, 本文对此不再作详细介绍.

6 实验结果

基于视觉的导航控制算法在机器鱼实验平台上进行了大量的导航实验, 无论是机器鱼在障碍物环境中奔向设定目标点还是在障碍物环境中顶球, 机器鱼都能寻找到可行路径, 无碰撞地到达目标点或顶到球. 图 3 和图 4 给出了典型的机器鱼奔向设定目标的运动轨迹.

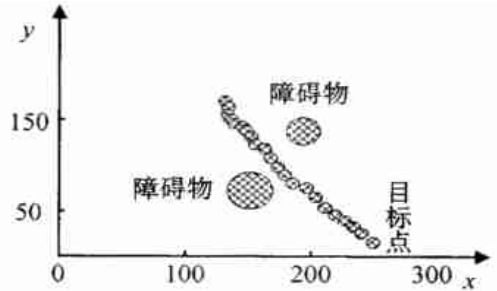


图 3 从两个障碍物之间穿过游到目标点

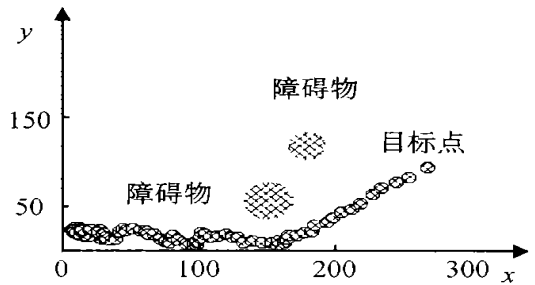


图 4 绕过障碍物游到目标点

7 结 语

本文提出了一种基于视觉信息的仿生机器鱼实时避障方法. 视觉处理采用了快速处理算法, 亦可用于其他图像处理过程. 在路径规划和避障行为策略中采用了栅格法与局部势场法相结合的方法. 实验结果表明机器鱼能够在障碍物环境中实时避障, 游到目标点. 该方法为多仿生机器鱼协调协作研究的深入开展和将来实际应用打下了良好的基础.

参考文献 (References):

[1] Sfakiotakis M, Lane DM, Davies J B C. Review of fish swimming modes for aquatic locomotion[J]. IEEE J of Oceanic Engineering, 1999, 24(2): 237-252.
 [2] Triantafyllou M S, Triantafyllou G S. An efficient swimming machine[J]. Scientific American, 1995, 272(3): 64-70.

合线性正交算法设计优化补偿控制器,大大提高了跟踪控制精度. Lorenz 混沌系统的实验结果证明了本文方法的有效性.

参考文献(References):

- [1] Ott E, Grebogi C, York J A. Controlling chaos[J]. Physics Review Letter, 1990, 64(11): 1196-1199.
- [2] Chen G, Dong X. Identification and control of chaotic systems: An artificial neural network approach[A]. Proc of the IEEE International Symposium on Circuits Systems[C]. Seattle, 1995. 1177-1182.
- [3] Nijmeijer H, Berghuis H. On Lyapunov control of the Duffing equation[J]. IEEE Trans on Circuits Systems, 1995, 42(8): 473-477.
- [4] Loria A, Panteley E, Nijmeijer H. Control of the chaotic Duffing equation with uncertainty in all parameters[J]. IEEE Trans on Circuits Systems, 1998, 45(12): 1252-1255.
- [5] Ren X M, Rad A B, Chan P T. Identification and control of nonlinear systems using dynamic neural networks [A]. Proc of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation [C]. Shanghai, 2002. 2002-2006.
- [6] Poznyak A S, Wen Yu, Sanchez E N. Identification and control unknown chaotic systems via dynamic neural networks [J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, 1999, 46(12): 1491-1495.
- [7] Poznyak A S, Wen Yu, Sanchez E N. Nonlinear adaptive trajectory tracking using dynamic neural networks[J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1999, 10(6): 1402-1411.
- [8] Poznyak A S, Yu W, Ramirez H S, et al. Robust identification by dynamic neural networks using sliding mode learning [J]. Applied Mathematics Computer Science, 1998, 8: 101-110.
- [9] Rovithakis G A, Christodoulou M A. Adaptive control of unknown plants using dynamic neural networks[J]. IEEE Trans on Systems Man Cybernetics, 1994, 24(3): 400-412.
- [10] Utkin V I. Sliding Modes in Optimization and Control [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1992.
- [11] Polyak B T. Introduction to Optimization [M]. New York: Optimization Software, 1987.
- [12] Kailath T. Linear Systems [M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1980.
- (上接第454页)
- [3] Kato N, Inaba T. Hovering performance of fish robot with apparatus of pectoral fin motion[A]. Proc 10th Int Symp on Unmanned, Untethered Submersible Technology [C]. New Hampshire, 1997. 177-188.
- [4] Kato N, Furushima M. Pectoral fin model for maneuver of underwater vehicles [A]. Proc 1996 IEEE AUV Symp [C]. New York: IEEE Press, 1996. 49-56.
- [5] Anderson J M, Kerrebrock P A. The vorticity control unmanned undersea vehicle (VCUUV) - An autonomous vehicle employing fish swimming propulsion and maneuvering [A]. Proc of 10th Int Symp on Unmanned Untethered Submersible Technology [C]. Durham, 1997. 189-195.
- [6] Hirata K. Development of experimental fish robot [A]. The 6th Int Symp on Marine Engineering [C]. ToKyo, 2000. 711-714.
- [7] Garcia R, Cufi X, Batle J, et al. Positioning an underwater vehicle through image mosaicking [A]. Proc of the 2001 IEEE Int Conf on Robotics & Automation [C]. New York: IEEE Press, 2001. 2779-2784.
- [8] 阮秋琦. 数字图像处理学 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2001. 180-203.
- [9] 朱述龙, 张占睦. 遥感图象获取与分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2000. 136-137.
- [10] Garcia-Campos R, Batlle J, Bischoff R. Architecture of an object-based tracking system using colour segmentation [EB/OL]. <http://www.unibw-muenchen.de/campus/LRT6/PDF/AColSeg.pdf>, 2003-11-28.
- [11] 钱晓捷. 汇编语言程序设计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2000. 272-298.
- [12] 黎明刚, 郭军. 基于伪 MMX 技术的并行识别算法及应用 [J]. 中文信息学报, 2000, 14(1): 27-31. (Li M G, Guo J. A parallel recognition algorithm based on fake MMX and its application [J]. J of Chinese Information Processing, 2000, 14(1): 27-31.)
- [13] Borenstein J, Koren Y. Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots [J]. IEEE Trans on System, Man and Cybernetics, 1989, 19(5): 1179-1187.
- [14] 陈尔奎, 喻俊志, 王硕. 仿生机器鱼运动方向的模糊控制研究 [J]. 高技术通讯, 2004, 14(2): 63-70. (Chen E K, Yu J Z, Wang S. The study on fuzzy control of motion orientation of bio-mimetic robot fish [J]. High Technology Letters, 2004, 14(2): 63-70.)