

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.11.018

## 水下自主导航机器人系统

刘甜甜<sup>1</sup>, 秦峰<sup>1</sup>, 朱晓勇<sup>2</sup>, 张炜轩<sup>2</sup>, 陈梦星<sup>3</sup>, 陈言俊<sup>1</sup>(1. 山东大学工程训练中心, 济南 250002; 2. 山东大学控制科学与工程学院, 济南 250061;  
3. 山东大学电气工程学院, 济南 250001)

**摘要:** 在水下机器人被广泛应用的背景下, 能够实现水下自主导航的机器人具有极高的应用价值。为了打破水下机器人运行需要人为干预的瓶颈, 更好地发挥小型机器人水下的灵活性, 设计并制作了一种可自主导航的水下机器人系统。该系统机械上采用 Pro/E 作为三维造型软件, 用快速成型设计并制造了水下机器人的主体; 硬件上使用摄像头采集数据, 并使用红外测距模块及电子罗盘模块实现定位功能; 嵌入式软件层将传感器数据进行采集后, 对数据进行相应的图像识别和处理, 最终识别障碍物并做出相应动作; 同时, 数据和视频流可通过无线模块传送到上位机, 上位机将数据接收后进行相应显示, 并可直接显示视频流, 方便调试的同时也可对水下环境进行实时监控。该系统实现了自主的水底避障、探测, 以及自行返回出发点的完整功能, 对于水下探测活动具有一定的实用价值。

**关键词:** 自主导航; 水下机器人; 图像识别**中图分类号:** TP242 **文献标志码:** A

## Underwater Autonomous Navigation Robot System

Liu Tiantian<sup>1</sup>, Qin Feng<sup>1</sup>, Zhu Xiaoyong<sup>2</sup>, Zhang Weixuan<sup>2</sup>, Chen Mengxing<sup>3</sup>, Chen Yanjun<sup>1</sup>(1. Engineering Training Center, Shandong University, Jinan 250002, China;  
2. School of Control Science & Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;  
3. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** Under the background that underwater vehicles are widely used, the application of underwater autonomous navigation robot system has great value. In order to break the bottleneck that the robot needs human's operation, and better use the flexibility of mini under robot, design and produce an underwater autonomous navigation robot system. The system mechanical structure uses Pro/E as 3 dimension software, quickly design and produce main body of underwater navigation robot, the hardware uses camera head to collect data. Use infrared distance measurement module and electronic compass module to realize orientation function. Embedded software layer collect sensor data, and carry out corresponding image recognizing and processing. At last, the system identifies obstacle and carries out corresponding movement. At the same time, data and video stream are sent to upper PC by wireless module, the upper PC receives and displays the video streams in order to debug as well as monitor the underwater environment. The system finally completes a full function of obstacle avoidance, underwater surveying and returning to start point, thus indicating a degree of practical significance and contributing to the underwater activities.

**Key words:** autonomous navigation; underwater vehicle; image recognition

### 0 引言

水下机器人也称潜水器 (underwater vehicle)。按照水下机器人的控制策略, 将其分为遥控水下机器人 (remotely operated vehicles, ROV) 和自主水下机器人 (autonomous underwater vehicle, AUV)。笔者采用 Pro/E 作为三维造型软件, 用快速成型设计并制造了水下机器人的机械主体; 硬件上采用飞思卡尔 9S12 系列单片机作为主控芯片、OV5116 摄像头采集数据、夏普 GP2Y0A 系列红外传感器以及 GY-26 系列电子罗盘实现水中距离探测及定位, 设计制作了可自主导航的水下机器人系统。

### 1 机械结构

#### 1.1 外壳设计

水下机器人的运行阻力较大, 因此在外壳设计

上采取了潜水艇外观的流线型设计, 最大限度减少其水下的运行阻力, 提高平稳性。在机器人水密性的解决方案中, 笔者采用了“整体开放, 局部密闭”的设计思路。即机器人的外壳不做任何水密性处理, 水可以进出机器人内部; 而对于必须与水隔离的电子线路部分, 在机器人内部按照功能模块分别独立密封和固定, 连接线则通过密闭的胶皮管连接各模块。这种设计方案无需考虑外壳的连接紧固性和密闭性, 大大降低了设计难度, 提高了设计的灵活性。内部独立密闭的设计在一定程度上提高了系统的水密性能, 同时使系统具有更好的可维护性。

根据设计方案, 使用 Pro/E 作为三维造型软件, 绘制外壳的三维图。外壳的制作采用快速成型的加工技术, 通过三维设计图直接完成水下机器人的主体的制作。外壳设计造型如图 1 所示。

收稿日期: 2012-06-29; 修回日期: 2012-07-26

作者简介: 刘甜甜(1981—), 男, 山东人, 硕士研究生, 工程师, 从事机器人教学与机器人竞赛研究。

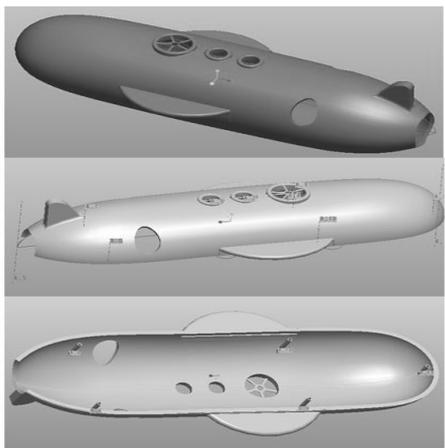


图 1 外壳设计造型

## 1.2 动力方案

在动力方案上, 笔者选择了经典的螺旋桨推进方案。考虑到机器人在水下需完成上、下、左、右、前、后 6 个自由度的运动, 系统设计 3 个直流电机分别带动横向、竖向和纵向 3 个螺旋桨, 通过螺旋桨的正反转, 为机器人提供 6 个自由度的推进动力。

## 2 硬件电路设计

### 2.1 主控芯片

系统的主控芯片采用飞思卡尔公司的 16 位单片机 MC9S12XS128, 可以完全满足系统设计的相关需求, 最小系统原理图如图 2 所示。

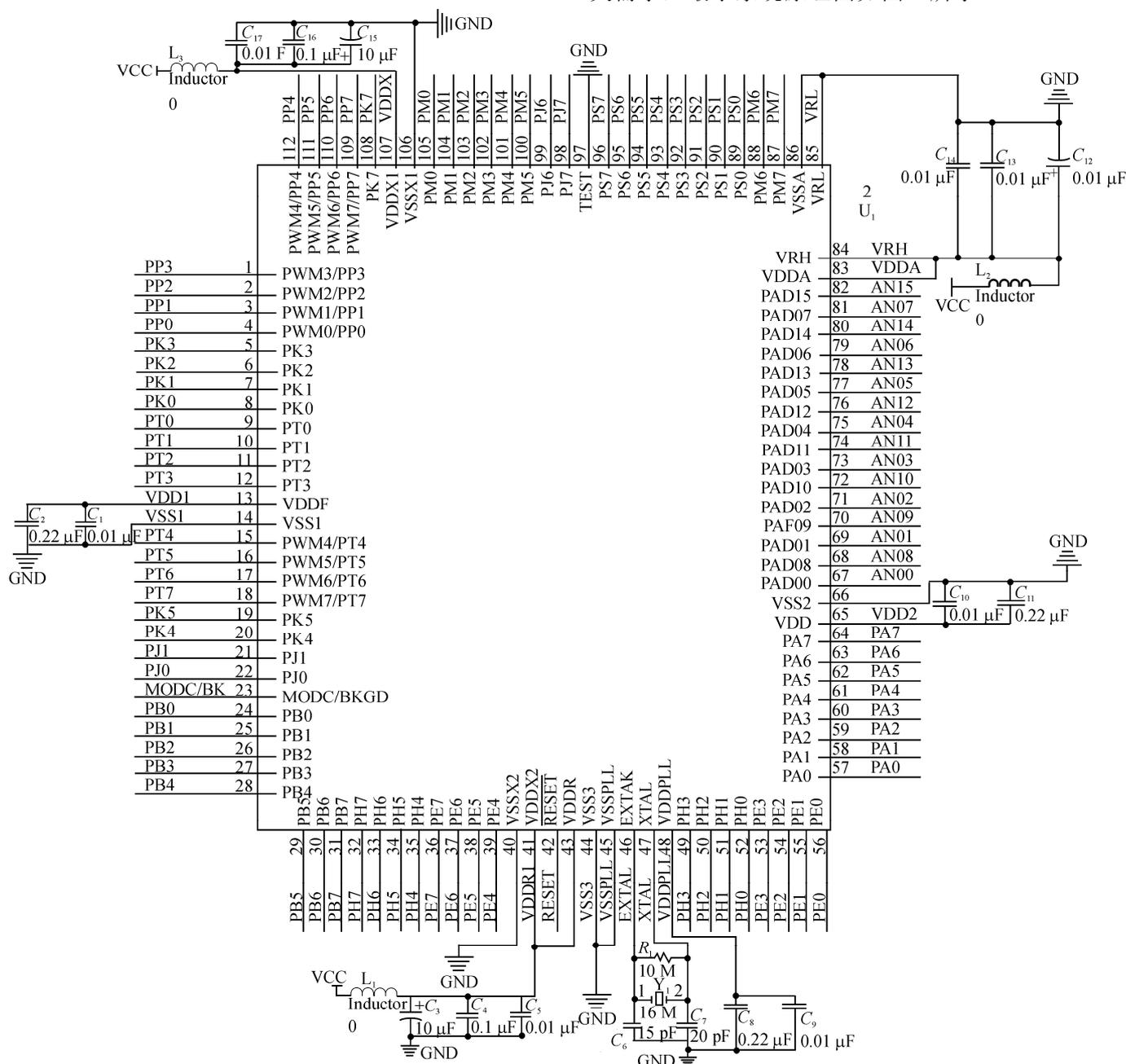


图 2 单片机及其时钟电路原理

### 2.2 电源管理模块

系统采用可充电锂电池作为供电电源，其输出电压为 8 V 左右。经过降压稳压，为系统的各个外围设备提供 3.3 V、5 V 和 8 V 等供电电源。其中，3.3 V 为 nRF2401 无线模块和无线视频模块电源，5 V 为单片机及电机驱动芯片、达林顿芯片、电子罗盘等外围设备电源，而 8 V 的电池电压则作为电机的直接供电电源。

系统电源管理模块框图如图 3 所示。

为了有效监控电池状态，电源管理模块还设计了电池电压采样电路。电压信号通过 2 个分压电阻

引入单片机进行 AD 采样，从而实现了监测电池电压的目的，可以有效的防止电池欠压，保证了系统运行的可靠性。

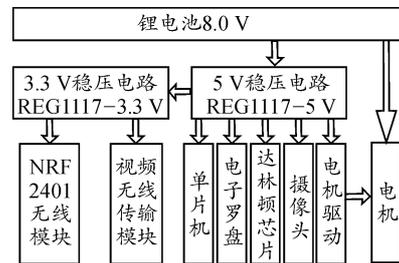


图 3 系统电源管理模块

电源管理模块电路原理图如图 4 所示。

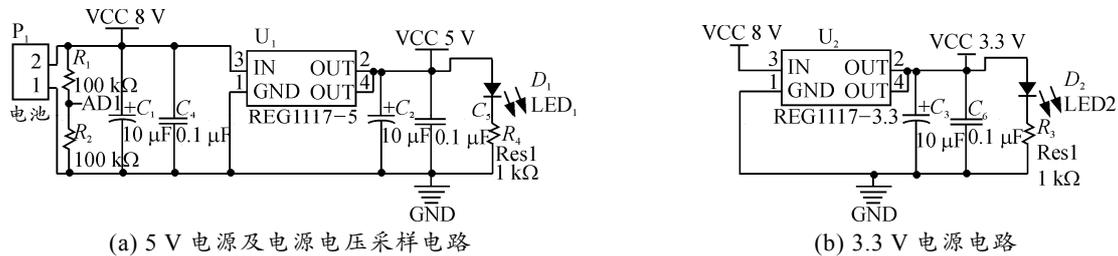


图 4 电源管理模块电路原理

### 2.3 摄像头模块

机器人要实现水下的自主寻迹，必须先通过摄像头获取并识别水下环境，然后再根据不同的环境做出相应的策略选择。在摄像头的选择上，考虑到机器人运行的水下环境色调单一，系统选择了黑白 CMOS 摄像头。

系统采用了 LM1881 视频分离芯片来辅助单片机对摄像头输出的视频信号进行采样。LM1881 可提取摄像头信号的行同步脉冲、消隐脉冲和场同步脉冲，并将它们转换成数字电平直接输送给主控芯片。摄像头的原始信号接入主控芯片的 AD<sub>0</sub> 引脚，通过 AD 采样获得图像数据。

LM1881 视频分离电路原理图如图 5 所示。

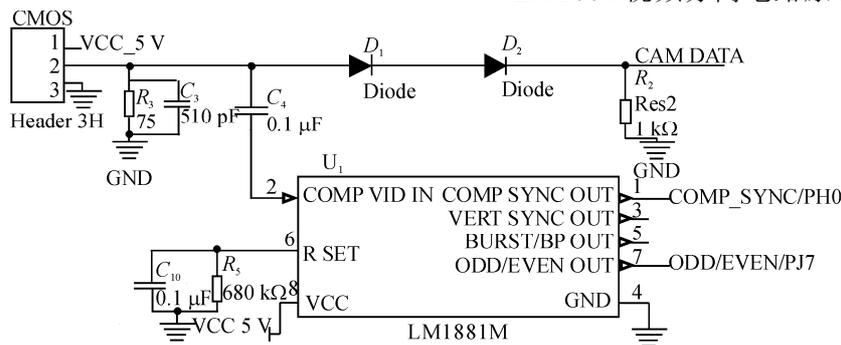


图 5 LM1881 视频分离电路原理

### 2.4 无线通信模块

根据系统设计方案，水下机器人需要将系统运行的实时数据和摄像头采集的视频图像通过无线通信模块发送到上位机并通过监控界面显示。由于摄像头原始视频信号量过大，系统设计了双无线模块，分别发送视频信号和数据信号。

nRF24L01 无线模块负责传输数据信号。笔者采用了 NewMsg 公司的 nRF24L01 模块和

NetUSB-24L01 模块。其中，nRF24L01 模块作为发送部分，通过 SPI 接口连接单片机；NetUSB-24L01 模块作为接收部分，连接 PC 的 USB 端口，接收 nRF24L01 模块的数据，并且传送到上位机。专用的视频无线传输模块负责传输视频信号，其工作频段为 1.2 GHz，与 nRF24L01 频段不同，不会产生数据传输的干扰，保证了数据传输的可靠性和稳定性。这种把视频传输和数据传输完全分离开来的模式大

大提高了数据传输效率, 降低了设计难度。

### 2.5 位置检测模块

为了实现机器人在水下的自主寻迹运行, 除了需要由摄像头采集的水下环境数据, 还需要对机器人的水下姿态、深度和位置进行精确的测量。出于定位算法的设计需要, 机器人采用电子罗盘测量角度参数, 采用红外线距离传感器测量位置参数。

电子罗盘可利用地磁场直接获得当前的方向角度。GY-26 系列电子罗盘精度可以达到  $0.1^\circ$ , 可以满足系统应用要求。电子罗盘模块可直接连接到主控芯片的 UART 接口, 进行数据传送。

红外距离传感器工作时主动发光, 根据接收到反射光线的强弱来标定障碍物的距离, 传感器的输出为模拟电压信号, 通过 AD 采样即可测量距离<sup>[1]</sup>。夏普 GP2Y0A 系列红外传感器型号较多, 通过不同型号的组合, 测量范围可达  $4\sim 500\text{ cm}$ , 完全满足系统的应用需求。

同时, 为了准确获得水下机器人坐标, 笔者在水下机器人前、后、左、右 4 个位置分别安装了红外测距模块, 并通过伺服电机控制其角度, 用来检测水下机器人的坐标。结构示意图如图 6 所示, 详细算法请参考 3.2.2 节。

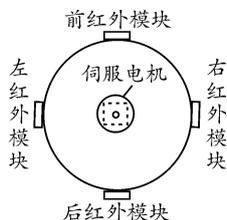


图 6 红外测距模块的硬件结构

### 2.6 电机驱动

机器人在水下采用螺旋桨推进, 由 3 个微型直流电机驱动螺旋桨, 系统整体设计要求电机转速可调并可以实现正反转。

电机驱动采用了专用的驱动芯片 LG9110。该芯片内部集成了 H 桥, 有 2 个兼容 TTL/CMOS 电平的输入, 具有较好的抗干扰性, 2 个输出端可以直接驱动电机正反转, 驱动电流可达  $700\sim 800\text{ mA}$ , 满足系统设计要求。

该芯片的输入控制信号为 PWM 信号, 通过调节 PWM 信号的占空比, 可以改变电机两端的电压大小, 从而实现电机的调速。芯片的 2 个输入引脚是否有 PWM 脉冲输入则决定了电机两端电压的极性, 从而可以改变电机的转向。电机驱动电路原理

图如图 7 所示。

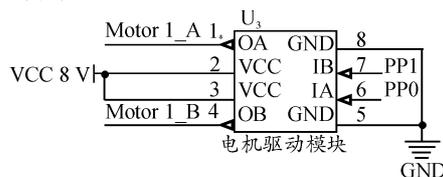


图 7 电机驱动电路原理

## 3 嵌入式软件设计

水下机器人的软件部分主要由驱动层、决策层、执行层 3 个层次组成。由于水下机器人前进速度较慢, 所以采集图像频率不需要过高; 同时, 由于摄像头信号每一场图像的周期为  $20\text{ ms}$ , 因此最后确定整体程序的执行周期为  $260\text{ ms}$ , 也即以 13 场摄像头图像为周期。

### 3.1 驱动层设计

摄像头的场中断信号作为每一个周期的起始, 首先执行驱动层程序。当场中断信号来临时, 判断该场数据是否需要采集, 是, 则开始一个执行周期。当一个执行周期开始时, 由于摄像头场消隐区的存在, 使得一开始采集摄像头数据不可行。为了充分利用这一段的时间, 笔者首先对红外传感器进行 AD 采样, 将红外传感器的采样值通过事先标定的表转化为真实距离; 同时, 通过 UART 接口将电子罗盘的数值读出; 最后, 通过 AD 模块开始采集摄像头数据, 每行采集 80 个点, 共 50 行。当采集完一场数据后, 开始将数据通过 nRF24L01 模块发送到 PC。

驱动层的流程如图 8 所示。

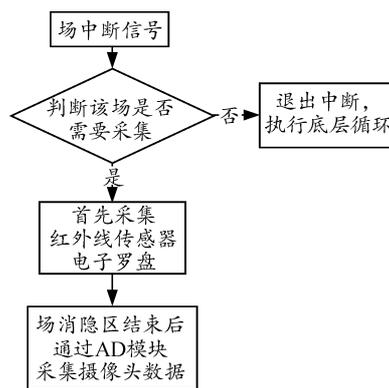


图 8 驱动层流程

值得注意的是, 根据 nRF24L01 的技术手册, 其最大通信速率为  $2\text{ Mbit/s}$ , 但是在实测中发现, 考虑到信道的不稳定因素以及重传机制, 其有效速率要小于  $1\text{ Mbit/s}$ 。同时, 由于 nRF24L01 分包机制所限, 在固定包长条件下, 其包长为  $32\text{ Byte/包}$ 。笔

者将采集到约 4 KB 的数据进行分包处理，每包长度为 32 Byte，其中第一个字节代表本包序号，后面为本包数据。

当数据采集完毕后，开始进入决策层处理流程。

### 3.2 决策层设计

决策层由 3 部分组成：1) 障碍物中心提取算法；2)  $x-y$  平面定位算法；3)  $z$  轴方向位置保持算法。

#### 3.2.1 障碍物中心提取算法

由于水下机器人在运行过程中，需要对水底可能存在的障碍物进行识别以及避障，因此如何准确地识别出物体信息是图像识别的重点。考虑到在演示过程中水下环境较为简单（浅蓝色池底），障碍物颜色、形状固定，并且障碍物和环境对比度相差较大，笔者采用边缘检测方法来实现障碍物的寻找。

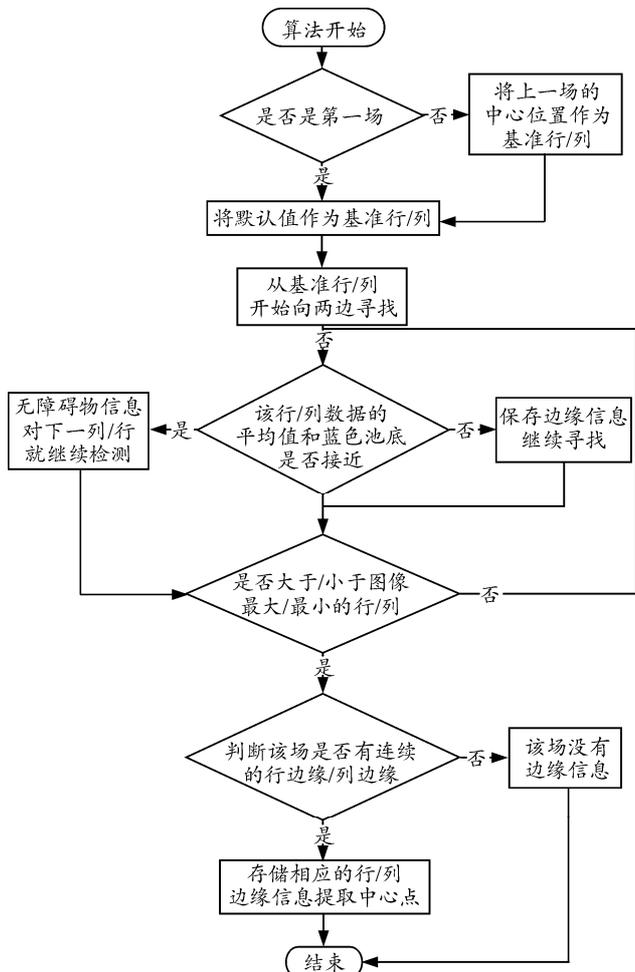


图 9 障碍物中心提取算法流程

对于开始检测的第一场图像，该算法首先寻找列边缘。首先，对第一列灰度数据求平均值。如果第一列平均值和蓝色池底的灰度平均值相近，认为

该列没有障碍物信息；如果检测到该列灰度平均值和蓝色池底的灰度平均值的差值相差较大，则认为该列可能存在障碍物边缘。如果该列有障碍物信息，则根据设定阈值对摄像头采集的该列数据按照灰度值进行二值化，即对图像做“锐化”处理，并且找到由“黑”变“白”和由“白”变“黑”的边沿，根据两个边沿的位置计算该列的“黑块”中心位置。以此方法依次对 2~80 列进行相应处理。

如果某一场图像数据中有连续的列障碍物边缘信息，则认为这些连续列存在黑色障碍物，通过计算平均值可以得到黑色障碍物的列位置坐标。

同样的计算方法，可以得到黑色障碍物的行位置坐标。

障碍物中心提取算法的流程<sup>[3]</sup>如图 9 所示。

#### 3.2.2 $x-y$ 平面定位算法

系统通过电子罗盘与伺服舵机的配合，始终保持前、后、左和右 4 个红外测距模块正对前、后、左和右池壁。具体步骤如下：

如图 10 所示，假设  $t_n$  时刻水下机器人的朝向为相对正方向顺时针偏转  $\alpha_n$  度， $t_{n+1}$  时刻的朝向为相对正方向顺时针偏转  $\alpha_{n+1}$  度，则舵机的修正方向为逆时针修正  $\alpha_n - \alpha_{n+1}$  度<sup>[4]</sup>。如果规定顺时针为正，逆时针为负，则可利用代数运算直接求解。若得出的修正方向为正，则控制舵机逆时针旋转，反之则顺时针旋转。主控芯片根据修正角度，发送相应的 PWM 信号驱动舵机，始终保持 4 个红外测距模块的朝向与池壁保持垂直。

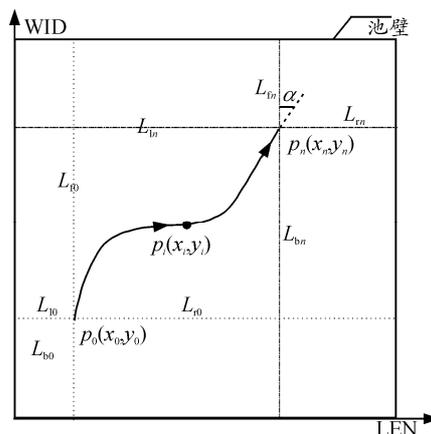


图 10  $x-y$  平面数据采集

朝向修正结束，即 4 个红外测距模块垂直正对相应池壁之后，开始进行距离测量工作。主控芯片循环使能 4 个红外测距模块，实时测量水下机器人

到池壁的前、后、左、右 4 个方位的距离, 并将距离数据传送给主控芯片。

距离测量结束后, 进行  $x$ - $y$  平面定位算法, 流程如下:

如图 10 所示, 以水池左下角作为原点, 以下端池壁作为  $X$  轴, 以左端池壁作为  $Y$  轴建立如图 10 所示的坐标系。池壁的长度为  $LEN$ , 宽度为  $WID$ 。假设水下机器人在初始时刻  $t_0$  于  $P_0$  点, 此时启动红外测距模块, 分别测得水中机器人到前、后、左、右 4 个池壁的距离为  $L_{f0}$ 、 $L_{b0}$ 、 $L_{l0}$ 、 $L_{r0}$ 。随后, 校验  $L_{f0} + L_{b0}$  是否等于水池宽度  $WID$ ,  $L_{l0} + L_{r0}$  是否等于水池长度  $LEN$ 。假设池中无障碍物, 则上述 2 式成立, 水下机器人的初始横坐标  $X_0 = L_{l0}$ , 初始纵坐标  $Y_0 = L_{b0}$ 。

在从  $t_0$  开始的离散时间内, 红外测距模块连续对前、后、左、右的方位进行测量, 设  $t_i$  时刻测量得到的前后左右 4 个数据依次为  $L_{fi}$ 、 $L_{bi}$ 、 $L_{li}$ 、 $L_{ri}$ 。同样假设前后左右无障碍物, 则  $t_i$  时刻的坐标分别为  $X_i = L_{li}$ ,  $Y_i = L_{bi}$ 。

红外测距模块与电子罗盘、伺服电机连续工作, 直到  $t_n$  时刻, 即可测量得到在一系列离散时间点  $[t_0, \dots, t_i, \dots, t_n]$  上的坐标数据, 从而形成水下机器人的运动轨迹, 并且实现定位功能<sup>[5]</sup>。

### 3.2.3 $z$ 轴方向位置保持算法

笔者在水下机器人前下方安装了红外传感器, 可以探测距离池底的距离。水下机器人  $z$  轴方向保持算法采用了基于反馈控制的 PID 算法。该算法包括测量、比较和执行 3 个部分。

首先, 系统通过采样, 将测量到距离水底的高度与期望值相比较, 然后对该误差进行运算, 用于控制电机的转速, 从而调节水下机器人高度。

实际使用中, 为了减少计算时间, 将位置式 PID 转化为增量式, 增量式 PID 算式如式 (1)

$$\Delta u(k) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (1)$$

其中:  $K_p$  为比例系数;  $K_i$  为积分时间常数;  $K_d$  为微分时间常数。电机控制主要要求提高电机的响应速度和调速准确性, 故选取较大的  $K_p$  参数; 而积分

参数  $K_i$  对电机控制有惯性, 影响反应速度, 同时, 积分参数过大会使波动增加, 所以, 实际使用中选择了非常小的积分参数。

### 3.3 执行层设计

当决策层做出决策后, 将标志位置 1, 表示决策已做完, 进入执行层。通过对决策层传递来参数的判别, 来判断当前机器人处于何种状态。

水下机器人在运行过程中, 首先需要跨越高度为 5 cm, 长、宽均为 8 cm 的障碍物。因此, 如果检测到障碍物, 则机器人升高指定高度, 跨越障碍物后再次下潜。随后, 水下机器人应检测到高度为 0.5 cm, 长、宽均为 10 cm 的目标物体。当检测到目标物体时, 水下机器人鸣笛报警, 并旋转 360° 后继续前进; 继续前进过程中如果检测到水下光标, 则停留一段时间, 并返回给定初始位置。执行层将策略对应数值传入 3 个电机及其他外围设备中, 最终完成水下作业任务。

## 4 上位机设计

系统上位机采用微软提供的 Visual Studio 2008 进行开发。上位机主要分为 3 个部分: 位于左方的无线数据显示区域、右上方的无线视频显示区域、右下方的无线数据——图像区域。其中, 无线数据显示区域在后台将收到的 32 Byte 的分包数据重新组装成 4 KB 的数据包, 并显示在这一区域; 无线数据——图像区域将无线数据显示区的数据进行解析, 并且将 AD 采样数值还原为图像; 无线视频区域则将水下机器人摄像头采集的视频流信息直接显示, 可用来进行水下环境监控。

监控界面如图 11 所示。

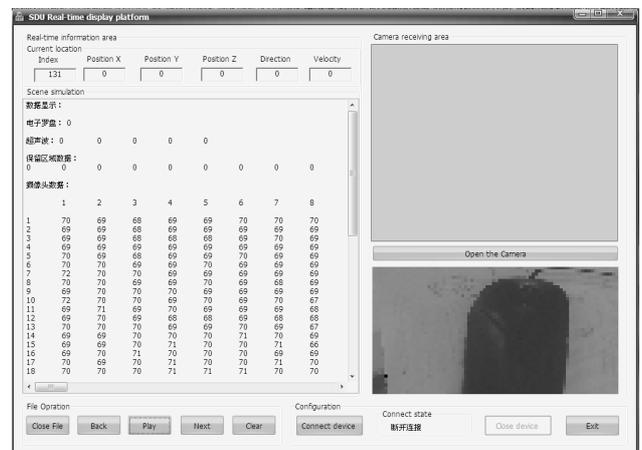


图 11 上位机界面

### 5 结束语

笔者介绍了水下机器人的机械、嵌入式软硬件、PC 机软件等部分设计,实现了自主导航水下机器人系统。该系统实现了自主的水底避障、探测,以及自行返回出发点的完整功能,对于水下探测活动具有一定的实用价值。

### 参考文献:

[1] 桑海泉,王硕,谭民,等. 基于红外传感器的仿生机器人鱼自主避障控制[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(6):

\*\*\*\*\*

(上接第 65 页)

第 3 组实验中, 博弈次数为 15, 2 条机器鱼路径长度分别为 4 088.3 mm 和 4 050.7 mm。从实验结果来看: 第 2 组和第 3 组实验采用合作博弈算法, 均可以使 2 条机器鱼尽可能同时到达目标点, 明显优于第 1 组未采用合作博弈算法的结果。用 Matlab 进行 3 组实验的路径对比见表 1。同时, 为了证明算法在水中机器人 2D 仿真平台上使用的有效性, 又进行了 3 组实验的速度对比见表 2。

表 1 用 Matlab 进行路径对比 mm

博弈模型	博弈次数	A 鱼	B 鱼
未采用合作博弈算法		5 022.3	5 009.7
采用合作博弈算法	6	4 112.2	4 067.9
	15	4 088.3	4 050.7

表 2 用水中机器人 2D 仿真平台进行速度对比 s

博弈模型	博弈次数	A 鱼	B 鱼
未采用合作博弈算法		54	52
采用合作博弈算法	6	44	44
	15	42	42

以上仿真实验结果表明: 采用合作博弈算法, 通过各博弈方之间相互协作的选择过程, 使系统运动更加协调, 系统总路径也逐渐趋于最优。各个机器鱼博弈次数一般不超过 15 次, 就可以得到收敛的博弈解, 计算效率较高。

### 5 总结

基于合作博弈的多机器鱼路径规划方法, 具有较强的适应性, 很好地避免了只考虑系统中单个机

1400-1404.

[2] 李二森, 张保明, 周晓明, 等. 自适应 Canny 边缘检测算法研究[J]. 测绘科学, 2008(6):119-120.

[3] 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.

[4] Michael Sfakiotakis, David M Lane, J. Bruce C Davies. Review of fish swimming modes for aquatic locomotion [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1999, 24(2): 237-252.

[5] 冉红格, 何波, 刘贵杰. 自主式水下机器人中数字电子罗盘的误差分析及校正[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2009(S1): 459-462.

器鱼的最优路径而使系统运动有失协调性的问题, 使多机器鱼系统协作性更强, 任务完成效率更高。实验结果表明, 合作博弈理论应用在多机器鱼运动系统的路径规划中是有效和可行的。

### 参考文献:

[1] 张亚鸣, 雷小宇, 杨胜跃, 等. 多机器人路径规划研究方法[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(9): 2566-2569.

[2] 郭佳臻. 综述纳什均衡与帕累托最优的冲突——囚徒困境 (Prison Dilemma) [J]. 现代经济信息, 2011, 24(12): 309-310.

[3] Yan Ping, Ding Mingyue, Zheng Changwen. Coordinated route planning via nash equilibrium and evolutionary computation[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2006, 19(1): 15-23.

[4] Xie Nenggang, Hao Fang, Bao Jiahan, et al. Multi-objective game design method and application of mechanism with objective predilection[J]. Journal of system simulation, 2007, 19(1): 138-140.

[5] 谢能刚, 孙林松, 包家汉, 等. 基于无私合作博弈模型的拱坝体型多目标优化设计[J]. 计算力学学报, 2007, 38(9): 1109-1114.

[6] 张良姣, 王晓刚. Nash 博弈论文集[M]. 北京: 经济学院出版社, 2000: 56-98.

[7] 李光久. 博弈论基础教程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 12-35.

[8] 陈忠, 谢能刚, 张子明. 结构多目标优化设计的合作博弈解法[J]. 工程力学, 2009, 26(4): 32-37.

[9] 陈伟, 张铭钧, 猛宪松. 基于多目标决策理论的多机器人协调方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2003, 24(3): 308-312.