

# 基于物联网的智能室内定位送水系统设计

胡琦瑶<sup>1</sup>, 周和兴<sup>1</sup>, 彭先霖<sup>2</sup>, 艾娜<sup>1</sup>, 齐锦<sup>1</sup>

(1. 西北大学 信息科学与技术学院, 西安 710127;

2. 西北大学 智能交互与信息艺术研究中心, 西安 710127)

**摘要:** 随着物联网技术的发展, 机器人已广泛应用于生产和生活之中; 自动送水机器人作为一种智能饮水系统, 可应用于办公区域、医院、家庭等多种场所, 智能化地为人类提供饮水服务; 设计了一款智能室内定位送水系统, 可以实现水杯定位、转向前行、自动添注水等功能; 系统以 UP Squared 处理器为设计平台, 扩展了 UWB 定位、Zigbee 无线传输、陀螺仪、机械臂等功能模块; 采用 MPU6050 模块进行旋转角度感知, PID 算法控制机器人旋转; 基于电流磁效应和电磁感应定律感知水杯位置; 采用超声波模块对出水口上升的高度和水杯中水位进行检测; 通过实验测试了系统的定位、方向调整、测距、功耗等多项参数以及送水全过程, 结果表明, 设计的机器人测量精度为 1 cm, 静态功率共计 5.35 W, 动态功率共计 13.6 W; 系统具有定位准确、转向快速平稳和功耗低等特点, 达到实际应用于室内智能定位送水的技术要求。

**关键词:** UWB 定位; 无线通信; PID 算法; 磁感线圈

## Design of Intelligent Indoor Positioning Water Supply System Based on Internet of Things

Hu Qiyao<sup>1</sup>, Zhou Hexing<sup>1</sup>, Peng Xianlin<sup>2</sup>, Ai Na<sup>1</sup>, Qi Jin<sup>1</sup>

(1. School of Information Science and Technology, Northwest University, Xi'an 710127, China;

2. Intelligent Interaction and Information Arts Research Center, Northwest University, Xi'an 710127, China)

**Abstract:** With the development of the Internet of Things technology, robots have been widely used in production and life. As an intelligent drinking water system, the automatic water supply robot can be applied to various places such as office areas, hospitals, homes, etc., to intelligently provide drinking water services for human beings. An intelligent indoor positioning water supply system is designed, which can realize the functions of cup positioning, steering forward, and automatic water filling. The system uses the UP Squared processor as a design platform, and expands functional modules such as UWB positioning, Zigbee wireless transmission, gyroscope, and robotic arm. The MPU6050 module is used to sense the rotation angle, and the PID algorithm controls the robot's rotation. The current cup position is detected based on the current magnetic effect and the law of electromagnetic induction. The ultrasonic module is used to detect the height of the water outlet and the water level in the cup. Several parameters such as the positioning, direction adjustment, ranging, power consumption, and water delivery process of the system were tested through experiments. The results show that the designed robot has a measurement accuracy of 1 cm, a total static power of 5.35W, and a total dynamic power of 13.6W. The system has the characteristics of accurate positioning, fast and stable steering, and low power consumption, which meets the technical requirements for practical application of indoor intelligent positioning water delivery.

**Keywords:** UWB positioning; wireless communication; PID algorithm; magnetic coil

## 0 引言

目前, 机器人已广泛应用于制造业、非制造业以及为人类服务。其中, 送水机器人针对的目标用户十分广泛, 例如办公室业务繁忙的工作人员、行动不便的老年人以及残疾人士等, 可应用于办公区域、医院、家庭等各种场所, 极大地解放了人类的双手, 用更智能化的机器代替人类服务。因此设计研究出一个智能室内定位送水的机器人就变得迫在眉睫。

目前关于送水机器人的研究大多集中在运水部分<sup>[1]</sup>或者单独倒水部分, 并未将两者有效结合在一起。文献 [2] 设计的智能接水机器人, 无需人为控制可以完全智能得为用户完成接水的工作, 弥补了当代一些遥控家具机器人的不足。但家居环境的复杂性, 系统光靠视觉识别和红外避障可能在完成效率上不够理想, 甚至于长时间发现不了目标所在。

本文研究开发一个基于物联网的智能室内定位送水系统, 实现了水杯定位、转向前行、自动添注水等功能, 可应用于办公区域、医院、家庭等多种场所的智能饮水服务。

## 1 系统总体框架

本文采用了 4 个直流电机驱动的机械模块, 倒水模块

收稿日期: 2019-12-31; 修回日期: 2020-01-04。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61903300)。

作者简介: 胡琦瑶(1993-), 女, 陕西西安人, 助理工程师, 主要从事图像处理、模式识别方向的研究。

采用机械臂送水。控制系统包括 UP Squared 处理器、电机驱动模块、STM32F103x (MCU) 模块、Zigbee 无线模块、UWB 定位模块、机械臂模块、供电与稳压系统。机械系统包括运输以及倒水系统, 通过机械系统和控制系统的密切配合保证运动的稳定性和功能的可靠性。按照如下步骤进行操作:

1) 当用户需要机器人进行服务时, 只需按下按键开关, 通过 Zigbee 模块的无线传输将命令发送至机器人的行动总控中心 UP Squared 开发板, 开发板发出行进指令, 使得机器人启动并前进, 通过 MCU 最小模块实现对机器人的辅助控制。

2) 机器人依靠 UWB 定位模块实时监测定位信息, 并识别出目标地点, 计算出到达目标所需转动的角度以及行进的距离。通过 L298N 模块驱动电机运转实现对机器人前进、倒退、位置调整等运行状态的控制。并通过 MPU6050 模块感知前进角度, 对前进方向不断进行调整。

3) 机器人到达目标地便停止行进, 利用磁耦合谐振线圈的电压随空间距离的变化特性, 实现对目标地水杯的精准定位, 使得出水口准确对准水杯并开始放水动作。通过超声波测距仪实时监测水杯水量, 保证水杯中的水不会溢出。

4) 结束任务后, 机器人能够返回原地待命。

5) 当有两个或两个以上目标同时发出信号时, 机器人应按接收到信号时间的先后分别响应, 完成倒水任务。

系统方案如图 1 所示。

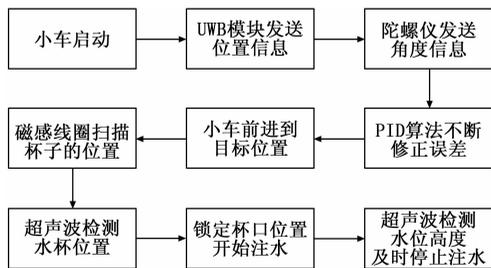


图 1 系统工作框图

## 2 系统设计

### 2.1 UWB 模块

送水系统要实现在接到送水请求后在较短的时间内将水送达的功能, 就必须快速而准确地到达水杯的位置。常见的许多定位方式都不能达到要求。

室内环境相对复杂, 红外测距定位、深度摄像机定位等方式等定位方式准确度不高; 而且必须要求水杯在机器人的视距范围内, 而事实上由于室内人员活动、桌面摆件遮挡等因素存在, 这一条件常常得不到满足<sup>[3]</sup>。

1) 室内定位对精度要求较高, GPS、WIFI、蓝牙等定位方式精度多在米级, 不能满足高精度定位的要求。

2) Zigbee 等定位方式信号传输受多径效应和移动的影响很大, 精度对硬件和环境的依赖程度很大<sup>[4]</sup>。

响很大, 精度对硬件和环境的依赖程度很大<sup>[4]</sup>。

3) 超声波定位等方式响应较慢, 会增加系统工作延迟。

UWB 定位<sup>[5]</sup>采用极窄脉冲传输数据, 数据传输速度快、定位精度可达厘米级、且抗干扰能力强, 并且具有低功耗、安全性高等优点, 可以较好的满足系统工作的要求, 因此我们在系统中采用 UWB 模块进行定位。

DWM1000 芯片<sup>[6]</sup>是一个超宽带无线收发芯片, 对于多路径衰弱有更强的抗干扰能力, 在高衰弱环境下也可以进行可靠的通信, 非常容易的集成到实时定位系统 (RTLS) 和无线传感网络 (WSN) 中。

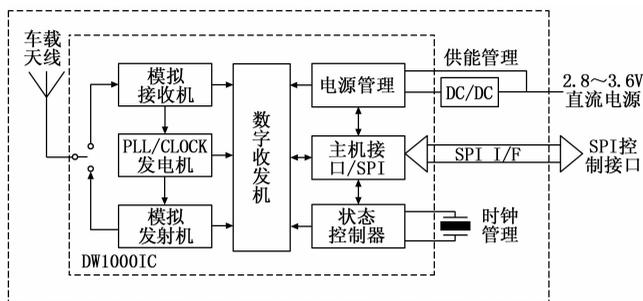


图 2 DWM1000 模块框图

本文使用双面双向测距算法的通讯方式只需要 5 次通讯, 就能测量标签分别到三个基站的距离。

### 2.2 目标方向角度的感知原理

送水系统进行移动的动作如前进、左转弯走弧线、后退等, 总体可以分解为两个正交的部分, 即直行和转向。实际上解决的就是机器人到达目标位置需要旋转的角度和方向的问题。

#### 2.2.1 角度测算

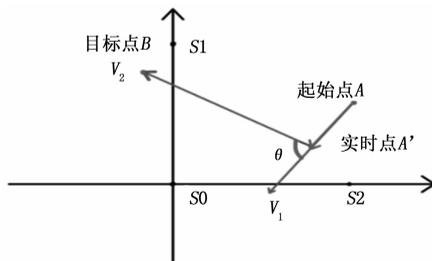


图 3 角度测算图

图 3 中, A 点为起始点的位置,  $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$  三点对应三个定位基站。通过 UWB 模块进行测距与定位, 可知起始点到三基站的距离, 当标签接收到来自目标基站  $S_0$  的信号, 主控制器控制机器人按初始方向行进一小段距离, 得到实时  $A'$  的位置信息。 $V_1$  为机器人前进方向的向量,  $V_2$  为实时位置到目标点方向的向量, 将  $V_2$  平移至  $A'$  点进行分析, 则在此时机器人需要转向目标点的角度为  $V_1$  与  $V_2$  的夹角  $\theta$ 。在  $V_1$  与  $V_2$  已知的情况下由公式 1 可计算出机器人需要转动的角度:

$$\cos \theta = \frac{|\vec{v}_1 \cdot \vec{v}_2|}{|\vec{v}_1| \cdot |\vec{v}_2|} \quad (1)$$

得出机器人需要转动的角度  $\theta$ 。

### 2.2.2 角度感知

在测算出机器人需要转动的角度后，还需要告诉机器人应该左转还是右转。实验中，给向量  $V_1$  与  $V_2$  同一起点，则有两种情况：1) 当  $\theta_1 > \theta_2$  时：(1) 判断条件  $\theta_1 - \theta_2 - \theta < 0$ ， $5^\circ$  时，我们判定此时的  $\theta_1 - \theta_2$  就是机器人需要转动的角度  $\theta$ ，此时机器人应该向右转，如图 4 (a) 所示；(2)  $\theta_1 - \theta_2 - \theta > 0$ ， $5^\circ$  时，我们判定此时的  $\theta_1 - \theta_2$  不是机器人需要转动的角度  $\theta$ ，此时机器人应该向左转，如图 4 (b) 所示。

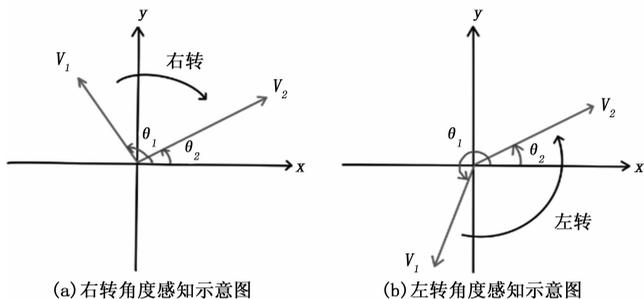


图 4 角度感知示意图

2) 当  $\theta_2 > \theta_1$  时：与  $\theta_1 > \theta_2$  时的情况刚好相反。由于标签定位存在误差，机器人旋转控制不是完全精确，因此一次计算有可能无法让机器人准确的到达目标点。让机器人返回其所转角度，当它与  $\theta$  不一致时，送水系统会不断检测机器人的实时位置  $(x_1, y_1)$  与目标点  $(x_2, y_2)$  之间的距离  $D$ ：

$$D = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (2)$$

当机器人与目标点的最小距离小于 10 cm 时，则让机器人停止，即视为到达终点；若机器人与目标点的最小距离大于 10 cm 时，在机器人停止后，需要重新进行一次角度测算与角度感知，在获得一个新的角度后前进，直到到达目的地附近。通过这样的算法，大大提高了机器人寻址的精度。

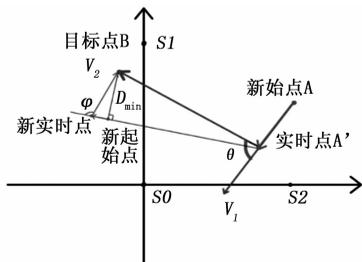


图 5 二次测算示意图

### 2.3 方向调整算法

通过目标方向角度感知的计算，得到机器人需要调整的方向，下一步采用 MPU6050 模块检测机器人旋转的角度。机器人旋转速度与电源输出的能量有关，在电源能量

下降时的情况与电量充沛时不同，只是采用简单的控制策略容易出现旋转时间长或系统震荡等问题，因而我们采用 PID 控制<sup>[7]</sup>，以提高旋转过程的抗干扰能力。

PID 控制根据偏差的比例 (Proportional)、积分 (Integral)、微分 (Differential) 进行控制<sup>[8]</sup>，控制框图如图 6 所示<sup>[9]</sup>。

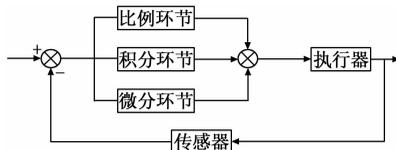


图 6 PID 控制框图

在本系统中，误差的积累作用较小，也不需要提前预测差值的到来而提前响应，故而在重点整定比例系数<sup>[10]</sup>。通过测试不同比例参数下的系统响应情况，选择出合适的参数。

### 2.4 出水口精准定位

送水系统在准确到达水杯附近后，需要精确控制出水阀门至杯口正上方。出于系统稳定性考虑，本文采用磁耦合谐振式无线传输装置进行精准定位。磁耦合谐振式无线传输装置的主要组成部分包括：

1) 磁耦合谐振部分：由谐振线圈、谐振电容串联构成谐振体，发送与接收线圈分别产生和接受磁场能量，是电路与磁场的耦合媒介<sup>[11]</sup>。发射线圈采用 1.3 mm 的漆包线，圆筒式绕法  $N=3$  匝，直径为 10 cm，接收线圈与发射线圈尺寸、绕法完全一致，以保证收发端线圈的固有频率一致。

提高谐振频率，增加两线圈之间的互感能够有效提高传输效率，但谐振频率的增加、线圈直径以及匝数的增加会带来很大的线圈损耗电阻，影响传输效率。因此要增加线圈直径、减小匝数，在线圈电感量不变的情况下，这种方法会比增加线圈匝数、减小直径能更有效的提高传输效率。最终，谐振频率确定在 1.3 MHz。

2) 磁场驱动源：包括供电和高频激磁电路，此部分功能是将直流电源的直流电转换为线圈中的高频电流，用以驱动磁耦合谐振部分产生谐振磁场并向其提供高频能量，实现无线电能传输<sup>[12]</sup>。

我们设计在水杯下方安置一个激发线圈，并给它通入脉冲信号，使之在周围空间中激发变化的磁场，在机器人出水口附近安置一个感应线圈，并在控制端检测线圈中电压的峰值。在机器人到达制定位置后，可以先控制步进电机在一个水平面内找到使感应线圈电动势峰值最大的角度，可以预见，这个方向就是激发线圈所在的方向；然后控制出水口垂直上升适当距离；控制步进电机将出水口朝激发线圈方向移动，直至感应线圈电动式峰值达到最大，此时出水口将准确到达水杯正上方。

### 2.5 HC-SR04 模块实现注水控制

除了在水平面内精确找到水杯的位置外，在垂直面内

还需要控制出水口上升适当距离, 并且完成对杯中水位的感知, 实验中采用超声波测距方法实现。超声波测距的原理是利用超声波在空气中的传播速度为已知, 测量声波在发射后遇到障碍物反射回来的时间, 根据发射和接收的时间差计算出发射点到障碍物的实际距离。

超声波测距模块 HC-SR04 具有性能稳定, 测度距离精确, 模块高精度, 盲区小等优点, 在公共安防、物体测距等领域有广泛应用<sup>[13]</sup>。测距步骤如下:

- 1) 采用 IO 口触发测距, 在控制口发出一个 10 的高电平信号;
- 2) 模块自动发送 8 个 40 kHz 的方波, 自动检测是否有信号返回<sup>[14]</sup>;
- 3) 如果有信号返回, 通过 IO 口输出一个高电平, 高电平持续的时间就是超声波从发射到返回的时间<sup>[15]</sup>。
- 4) 当有信号返回时, 通过定时器计时, 当接收口变为低电平时就可以读定时器的值, 可得此次测距的时间, 从而计算出距离。不断的测试, 即可以达到你移动测量的值<sup>[16]</sup>。

在垂直面上升合适距离的关键在于送水系统能够感知到什么位置是合适位置。经过分析发现, 在出水口所处的高度尚未超过水杯时, 出水口前方较远处就有固体介质(水杯); 等所处的高度超过杯口后, 出水口前方较远处才开始出现固体介质(墙)。因而我们可以在出水口附近放置一个超声波测距模块<sup>[17]</sup>, 通过合理设置距离阈值, 距离超过阈值后便停止上升。

在出水口到达指定位置后, 控制继电器, 使出水口开始出水, 通过超声波模块检测到杯中水位到达合适位置时, 上传一个信号给控制器, 停止出水, 完成相应工作。

### 2.6 Zigbee 通信模块数据交互

智能室内定位送水系统在按下呼叫器的按键后, 接收到倒水请求开始工作。因为并非所有的室内环境都覆盖了 WIFI 信号, 蓝牙传输受限于距离且易受干扰, 采用组网简单、传输距离较长的 Zigbee 通信模块进行无线数据传输<sup>[18]</sup>。

DL-20 无线发射接收模块是基于 Zigbee 技术的无线串口模块, 可以将两个或者多个串口在无线状态下连接起来。将 DL-20 模块配置为点对点模式, 点对点模式存在两个端口数据传输端口: A 端和 B 端。A 端串口发出的数据会被 B 端串口接收, 反之亦然, 点对点模式下同一个频道只允许两个节点相互通信。

数据在传输过程中采用的是透明传输模式。用户只需按照 Zigbee 协议的具体帧格式对数据进行封装, 然后一次进行发送, 最后在接收端对数据按照顺序进行接收<sup>[19]</sup>。在实际应用中, 选择波特率为 9600, 分别将两个 Zigbee 通信模块安置在呼叫器与机器人上。

## 3 实验结果分析

智能室内定位送水系统要求定位准确, 对复杂环境适

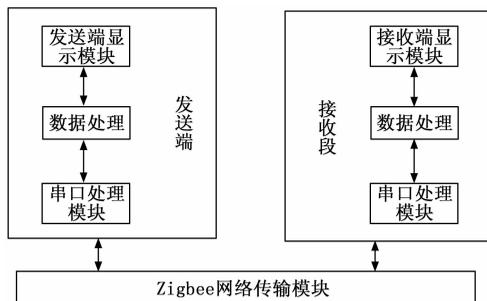


图 7 Zigbee 系统功能框图

应能力强, 角度调整迅速准确, 能较好适应感应线圈在移动中的变化。实验中分别对以下几部分进行测试。

### 3.1 UWB 定位精度测试

为测试 UWB 模块在不同复杂程度的环境中的精度, 我们分别在空旷的教室与桌椅等遮挡物较多的教室中进行精读测试, 具体方法如下:

- 1) 布置好基站之后, 室内随机选取 6 个点。
- 2) 用米尺分别测量这些点与基站 0 之间的距离, 测量三次取平均值, 将平均值近似看作点与基站 0 之间的标准距离。
- 3) 将标签 0 分别放置到这 6 个点的位置。
- 4) 在每一点处连续测 10 次标签与基站的距离。
- 5) 用测量得到的数据与标准距离的差值的平均值表征误差。

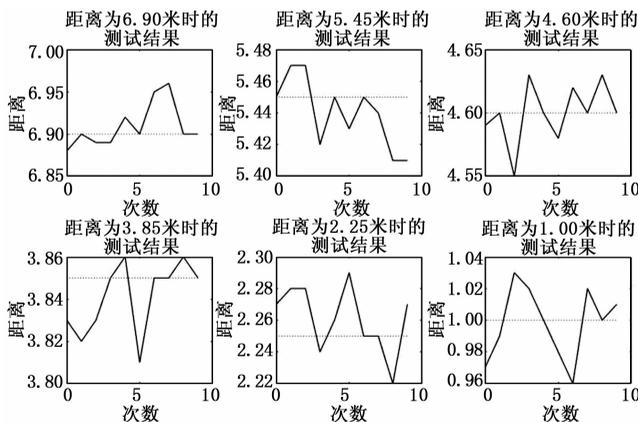


图 8 UWB 定位测试图

观察测试结果, 我们发现基站与标签之间距离的远近, 对测距精度并没有明显影响, 每次测量得到的数据误差都在 10cm 之内; 在复杂环境中测距的误差相较于空旷感环境略有上升, 但仍能保证较高的测量精度; 在测量多次求取平均值之后, 测向误差降到 1% 以下, 可以满足系统对精度的要求。

这是由 UWB 是依赖极窄脉冲传输数据的特点决定的。理论上穿越书桌等障碍物后, 窄脉冲不会产生明显的衰减。因而即使环境中障碍物较多, 对测距精度的影响也微乎其微。这与我们测试得到的结果是一致的。

### 3.2 方向调整算法测试

合理的 PID 参数的选择, 在提高机器人旋转速度的同时, 系统应该具有较好的稳定性, 即震荡程度低, 同时在电源能量变化时能有较强的适应能力, 即始终有较好的反应速度和较高的稳定性<sup>[20]</sup>。

设置机器人旋转目标为 45°, 控制机器人旋转, 通过串口实时将机器人旋转的角度上传至控制端。将不同的 PID 参数得到的角度变化情况绘制成曲线图, 多次测试后选取最佳参数。得到的曲线图如图 9、图 10、图 11 所示。

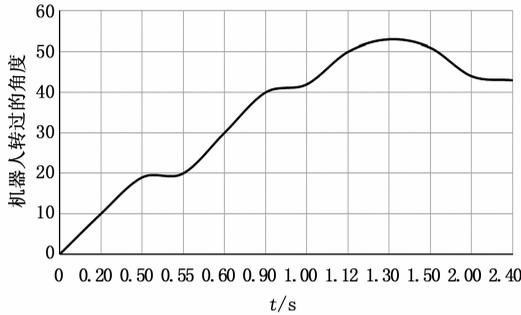


图 9 PID 参数为 1000-4 的测试数据

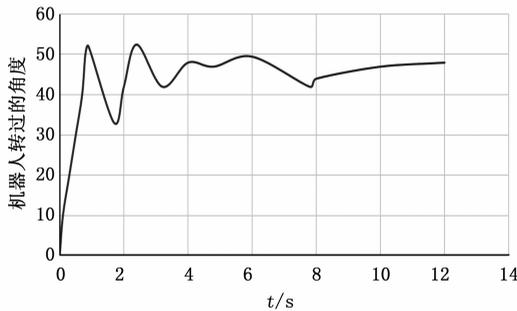


图 10 PID 参数为 1200-4 的测试数据

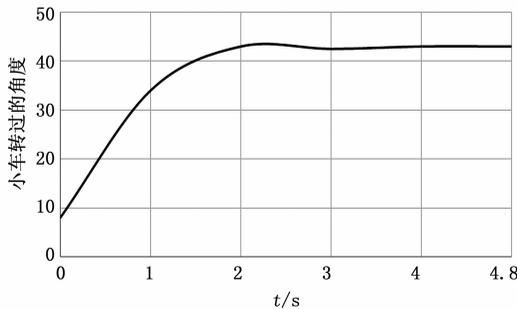


图 11 PID 参数为 1500-5 的测试数据

PID 的第一个参数表示系统的整体速度, 第二个参数表示对于指令的响应速度。经过分析, 第一次测量的整体速度高, 但响应时间长, 系统震荡严重, 到达稳定时间较长; 第二组在整体速度将下来之后, 震荡较少; 第三组在降低整体速度后, 消除了震荡, 因此第三组参数较为合理。

多次尝试后整定的 PID 参数能使机器人有较快的反映

同时保持相对稳定, 且在电源能量不同的情况下有较强的适应能力。

### 3.3 出水口精准定位测试

本文采用检测感应线圈中感应电动势的极值来确定水杯与出水口的相对位置, 这要求感应电动势的极值要明显存在, 且检测延迟要低。

分别在水平面和垂直面内对感应线圈进行移动, 并读取感应线圈中电动势的大小, 将之绘成曲线图, 观察极值情况。

由于响应存在延迟, 不易直接检测, 我们检测在系统读到的感应线圈中电动势极值时所处的位置与理论位置的差值, 以此来间接刻画系统的响应延迟<sup>[21]</sup>。感应线圈在水平面内旋转不同的角度, 得到的输出电压值如图 12 所示, 在距离发射线圈最近的位置处, 有一个电压峰值, 其感应电压值是最大的。

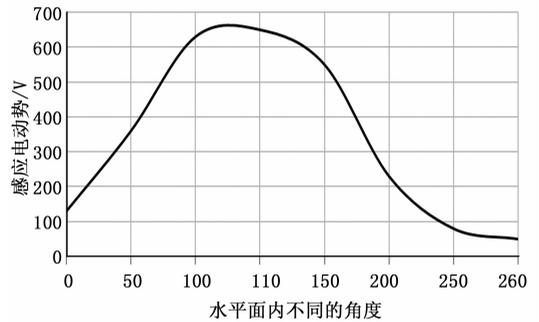


图 12 感应电动势测试数据

### 3.4 HC-SR04 模块测距测试

为测试 HC-SR04 模块测距的精度, 设计如下方案:

- 1) 在模块附近随机选取 6 个点;
- 2) 用米尺分别测量这些点与模块之间的距离, 测量 3 次取平均值, 将平均值近似看作点与模块之间的标准距离;
- 3) 将一个刚性固体介质分别放置到这 6 个点的位置;
- 4) 在每一点处连续测 10 次介质与模块的距离;
- 5) 用测量得到的数据与标准距离的差值的平均值表示误差。

以第一个点和第二个点测量数据为例说明。

1) 第一个点实际测量距离为 20 cm, 超声波测距数据如表 1 所示。

表 1 第一个点测量距离 cm

18.1	19.3	19.3	19.6	19.5
19.6	20.1	19.4	19.6	18.8
19.6	19.5	19.8	20.4	19.6
20.3	21.2	20.5	19.8	19.1

以上 20 组测量数据平均值为: 20.8。

2) 第二个点实际测量距离为 18 cm, 超声波测距数据

如表 2 所示。

表 2 第二个点测量距离 cm

18.3	19.3	19.5	19.0	17.1
16.3	20.1	19.1	18.2	18.8
19.1	18.2	19.8	18.3	18.2
19.3	19.5	19.5	19.2	18.6

以上 20 组测量数据平均值为: 19.1。

HC-SR04 超声波测距模块可提供 2~400 cm 的非接触式距离感测功能, 测量精度最高可以达到 3 mm。分析以上测量结果可得, 设计的机器人所用超声波测距模块测量精度为 1 cm。

### 3.5 系统功耗测试

本文分别在待机状态下(停止电动势检测、机器人运行等, 仅串口接收数据工作)测试系统静态电流、电压及功耗, 在全负荷状态下(开启所有设备)测试系统工作电流、电压及功耗。

各个硬件模块的功耗如表 3 所示。

表 3 系统各模块功耗

系统各模块	静态功率/W	动态功率/W
UP Squared 处理器	3.50	4.50
机器人驱动模块	0.50	1.60
舵机	0.20	0.60
步进电机	0.70	5.10
小型水泵	0.30	1.20
Zigbee 模块	0.05	0.10
STM32F103x	0.04	0.12
陀螺仪	0.06	0.08
共计	5.35	13.60

根据以上各模块功率测试所得, 静态功耗主要集中在 UP Squared 处理器, 但总体相对来说较低, 共计 5.35 W, 动态功率共计 13.6 W, 大概为静态功率的 2.5 倍。

通过测试发现在静态情况下机器人耗电极少, 可支持长时间数据监听; 在巡航倒水的模式下也有较好的续航能力。

## 4 结论

本文所设计的系统采用 Zigbee 模块进行呼叫器与机器人之间的数据交互; 采用 UWB 模块在室内进行精准定位; 采用 MPU6050 模块进行旋转角度感知, PID 算法控制机器人旋转; 基于电流磁效应和电磁感应定律感知水杯位置; 采用超声波模块对出水口上升的高度和水杯中水位进行检测。不仅能够很好地实现运水和倒水两个功能, 并且定位精度、运动的稳定性以及功能的可靠性都得到了良好的保障, 完全实现了智能室内定位送水的功能, 达到了实际应用于室内智能定位送水的技术要求。

### 参考文献:

- [1] 史洁, 卢广昌, 张岩, 等. 简易运水机器人 [J]. 电子制作, 2009, 4: 46-49.
- [2] 唐阳雨, 秦雷, 闵玄. 基于 ARM 的智能接水机器人设计方案与仿真 [J]. 电子世界, 2016, 495 (9): 67-68.
- [3] 陈少博, 秦会斌. 基于 LC 谐振电路的智能送餐机器人设计 [J]. 软件导刊, 2017, 11: 105-107.
- [4] 苏业环, 任军. 智能送餐机器人设计 [J]. 科技创新与应用, 2018 (7): 32-34.
- [5] 贺晶晶, 姜平, 冯晓荣. 基于 UWB 的无人运输车的导航定位算法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 11.
- [6] 彭笑, 张丹红, 熊斌宇, 等. 基于 DW1000 的室内定位系统设计与稳定性优化 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2018, 43 (5): 127-134.
- [7] 包松, 鲍可进, 余景华. 基于单片机 PID 算法的直流电机测控系统 [J]. 微机发展, 2003, 13 (8): 72-74.
- [8] 苗永梅, 林辉. 模糊 PID 控制下移动机器人定位方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (8): 72-74.
- [9] Wang J, Wang Y, Wan S. PID parameter self-tuning and real-time control based on dynamic neural network [J]. Systems Engineering & Electronics, 2004.
- [10] Zhuo W, Jiang Y, Wang S. The application of feedforward PID control in water level control system [C]. 2012.
- [11] 赵争鸣, 张艺明, 陈凯楠. 磁耦合谐振式无线电能传输技术新进展 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (3): 1-13.
- [12] 黄学良, 吉青晶, 谭林林, 等. 磁耦合谐振式无线电能传输系统串并式模型研究 [J]. 电工技术学报, 2013, 28 (3): 171-176.
- [13] 李军, 申俊泽. 超声测距模块 HC-SR04 的超声波测距仪设计 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2011, 11 (10): 77-78.
- [14] 罗庆生, 韩宝玲, 等. 一种基于超声波与红外线探测技术的测距定位系统 [J]. 计算机测量与控制, 2005, 13 (4): 304-306.
- [15] 苏琳. 基于 HC-SR04 的超声波测距器的设计 [J]. 科技信息, 2012 (9): 130-131.
- [16] 张海鹰, 高艳丽. 超声波测距技术研究 [J]. 仪表技术, 2011 (9): 58-60.
- [17] 唐晓鹏, 谢兴生. 利用集成 HC-SR04 模块设计对射式测距系统 [J]. 微型机与应用, 2014 (22): 90-93.
- [18] 丁飞, 张西良, 张世庆. 基于 ZigBee 的无线通信技术及其应用 [J]. 江苏通信, 2006 (5): 27-30.
- [19] 王超然, 刘强, 汪神岳, 等. 基于 Zigbee 的高层火灾定位及语音报警系统 [J]. 计算机测量与控制, 2017 (11): 138-141.
- [20] 李华洲, 林小强, 苏辉, 等. 一种智能送水系统的设计 [J]. 数字技术与应用, 2017 (6): 177-178.
- [21] 杨磊, 黄锡江, 印松, 等. 基于单片机的自动送水机器人的设计 [J]. 电子世界, 2013 (9): 133-134.