

# 基于 RFID 无源标签的智能开关控制系统

周尧<sup>1</sup>, 周松照<sup>1</sup>, 崔逸林<sup>1</sup>, 叶宁<sup>2</sup>

(1. 南京邮电大学 海外教育学院, 江苏 南京 210003;

2. 南京邮电大学 江苏省无线传感网高技术重点实验室, 江苏 南京 210000)

**摘要:**针对传统手势控制系统制作成本高和对光线依赖性强等问题,设计了一种基于 RFID 无源标签的智能开关控制系统。系统以 RFID 技术与蓝牙 mesh 技术为支撑,将手势识别技术与智能开关控制技术有机结合,首先通过提取用户所佩戴的 RFID 无源标签的运动轨迹,并在 PC 端中构建手势数据指令库,同时利用加窗处理来解决无源标签运动时反射信号的不连续性,提取标签运动时相位流中的波纹特征分段,继而利用动态时间规整(dynamic time warping, DTW)算法计算当前手势运动分段与预先设置的手势指令库中各维分量的匹配度,同时在此基础上结合 KNN 邻近算法实现手势分类,之后将识别的手势指令与 PC 端构建的数据指令库进行匹配,通过蓝牙 mesh 系统将控制指令传递给各个用电器,实现用户对智能开关系统的手势控制。实验结果显示该系统可以对多个智能开关进行远程实时控制,智能开关对手势指令正确反馈率达到 90%。

**关键词:**RFID; 手势控制; 智能家居; 无源标签; 蓝牙 mesh

**中图分类号:**TP302

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2020)06-0029-06

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2020.06.006

## An Intelligent Switch Control System Based on RFID Passive Tag

ZHOU Yao<sup>1</sup>, ZHOU Song-zhao<sup>1</sup>, CUI Yi-lin<sup>1</sup>, YE Ning<sup>2</sup>

(1. School of Overseas Education, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;

2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Wireless Sensor Networks, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210000, China)

**Abstract:** An intelligent switch control system based on RFID passive tag is designed to solve the problems of high cost and strong dependence on light in traditional gesture control system. This system is supported by RFID and wireless Bluetooth mesh technology, which organically combines gesture recognition technology and intelligent switch control technology. Firstly, the trajectory of the RFID passive tag worn by the user is extracted, and the gesture database is constructed in the PC terminal. Meanwhile, the window handing is used to solve the discontinuity of the reflected signal when the passive tag moves. Then the ripple characteristics segments from the phase flow of tag movements are extracted, and the matching rate between the current gesture segments and each dimension component in the preset gesture database is calculated by the dynamic time warping (DTW). At the same time, the gesture classification is realized by combining k-Nearest Neighbor (KNN) on this basis, and then the recognized gesture instruction is matched with the gesture database by the PC terminal, and the control instruction is transmitted to each user through the Bluetooth mesh system, so as to realize the gesture control of the intelligent switching system by the user ultimately. Experiment show that the correct response rate of intelligent switches to gesture instructions has reached exactly 90% and this system can control multiple intelligent switches remotely in real time.

**Key words:** RFID; gesture control; smart home; passive tags; Bluetooth mesh

## 0 引言

随着大数据时代的到来,移动互联网和泛在物联网网络下的各种前端信息感知、处理与传输载体更加丰富。射频识别技术(radio frequency identification,

RFID),作为物联网发展的一项核心技术,已悄然融入人们的日常生活,其作为物联网发展的基石和催化剂,秉承着“物物相连”的理念,得到了迅速的推广和发展,逐渐从单纯的“标记识别”转变为“无源感知”的物

收稿日期:2019-07-16

修回日期:2019-11-19

基金项目:国家自然科学基金(61572260,61373017,61572261,61672297);江苏省大学生实践创新训练计划重点项目(SZDG2018045)

作者简介:周尧(1998-),男,研究方向为无线传感器网络、智能家居;叶宁,教授,CCF 高级会员(10059S),研究方向为物联网信息处理和可穿戴计算。

联网代表性技术<sup>[1]</sup>。

目前,物联网中人机交互技术的发展,已经从以往的以计算机为中心逐步变革到现在以用户为中心。射频识别技术,作为物联网发展的一项核心技术,使人机之间的通信不再需要中间媒介,用户可以很便捷地对所处环境的机器进行一系列操作<sup>[2-3]</sup>。与此同时,随着人们对家居环境的安全性、舒适度和智能性等要求的不断提高,家居生活中对于物联网技术的应用需求也不断增强。当代家居住房中通常具备多种家用电器,大量的开关及线路布置增加了家庭用电的危险性,再加上其复杂的按键控制更是给弱势群体(如伤残人士、老年人和幼龄儿童)的日常生活带来不便<sup>[4]</sup>。因此,通过声音或者手势控制的智能家居将凭借其广泛的适用性和安全性,在弱势群体中更容易被接受,从而成为智能家居控制系统的热门选择。

智能家居在美国、德国、新加坡和日本等国都有广泛而成熟的应用。其中通过 ZigBee 技术、WIFI 和蓝牙<sup>[5-6]</sup>等控制家居开关的技术已日益成熟,而关于手势识别开关控制系统却还处于起步阶段。例如宜家(IKEA)Tradfri 系统<sup>[7]</sup>与大众 Golf 7 “Discover Pro”手势控制的信息系统<sup>[8]</sup>。Tradfri 系统的核心是一种网关设备,通过接入到互联网与本地网络之间来实现衔接作用,而用户仍然需要旋转该控制器才能够调节灯光的明暗。大众 Golf 7 “Discover Pro”手势控制的信息系统则是在大众的 Golf R Touch 上采用的飞行时间技术(time of flight, ToF),是一种通过计算光线的传播时间来测量距离的技术。然而由于光的传播速度非常快,所以基于 ToF 技术的感光芯片需要飞秒级的快门来测量光飞行时间,这也是 ToF 技术难以普及的原因之一:这样的感光芯片成本过高。

目前,RFID 无源标签运动轨迹大多利用无源标签和读取天线的偏振特性,通过对信号强度(RSSI)的提取和预处理,同时将基于帧的数据进行分割转换,利用标签重定位引起的反向散射信号强度的变化来检测标记对象的运动<sup>[9-10]</sup>。但由于读取天线通常只在其水平和垂直方向检测到 RSSI 的明显变化,所以该方法不足以满足对使用者在做出立体手势运动轨迹的读取。文中通过对 RFID 无源标签相位特征的提取,计算求得相邻相位间的差值,由于相位差的矢量性能够较好地反映出标签的运动方向和距离,因此可以最大限度地提高对运动的检测精度。同时系统借鉴了较为成熟的蓝牙 mesh 技术框架<sup>[11]</sup>,通过提取用户佩戴的 RFID 无源标签的运动轨迹,构建手势数据指令库,之后通过蓝牙 mesh 技术将指令传递给各个用电器,最终实现用户对智能开关系统的手势控制。

针对传统手势控制系统制造成本高和对光线依赖

性强等问题,文中以 RFID 技术与蓝牙 mesh 技术为支撑,将手势识别技术与智能开关控制技术有机结合,实现基于手势控制的多设备多开关的智能开关控制系统。

## 1 基于 RFID 的手势运动识别算法

在 RFID 无源系统中,由于标签运动时运动数据不断更新,使得手势动姿的识别存在不精准性。此外,由于使用者不规范的运动手势以及设备部署位置引起的手势数据特征变化的问题也需要进一步优化。本小节主要介绍了如何进行准确的手势提取,并确立完备的手势特征集来提高手势匹配的精准度。

### 1.1 手势运动轨迹的提取

在一般的 RFID 系统中,阅读器可以从标签中获得的信号参数有接收信号强度,相位值和多普勒频移。

为了选择应用于手势识别系统的最佳系统指标,通过实验以检查标签在运动情况下的输出信号特征。标签在运动状态下,相位受环境的干扰较小并随着标签的运动轨迹而波动,波形相对稳定,然而信号强度和多普勒频移的波动情况与标签在静止状态下的波动程度没有稳定的规律,难以识别出标签的运动。

因此我们相位来获取标签运动信息。在 RFID 一般系统中,相位与距离的关系如下式:

$$d = \frac{\varphi}{4\pi\lambda} \quad (1)$$

其中, $\lambda$  是载波波长, $\varphi$  为接收和发射信号之间的实际相位差。

设一个射频信号的载波频率为  $f$  (Hz),则波长和频率的关系满足公式  $\lambda = c/f$ ,其中  $c$  是 EM 波的传播速度,等于空气中的光速( $\approx 3 \times 10^8$  m / s)。R 为读写器和标签的距离,则该标签的真实相位  $\varphi$  可以按如下公式计算:

$$\varphi = \varphi + N = \frac{2\pi}{\lambda} \times 2R + \theta_T + \theta_R + \theta_{TAG} \quad (2)$$

其中, $\varphi$  为 RFID 读写器测量到的相位偏移, $N$  为能够保持相位周期性变化的未知整数, $\theta_T$ ,  $\theta_R$  及  $\theta_{TAG}$  分别表示发射天线、接收天线及标签反向散射天线造成的相位固有偏移,除此之外, $\varphi$  是经 RFID 阅读器特殊处理后的相位值,保持返回的值范围为  $[0, 2\pi]$ ,因此这里的  $N$  是  $2\pi$  的整数倍。

文中并不是采用原始的相位值来检测无源标签的运动,而是在相同频率通道中测量的两个相位采样点来计算二者的差值,利用相位差持续跟踪手势运动,因此由天线等硬件造成的相位固有偏移,在同一实验环境下再通过计算可以将其消除。

同时根据式(1)可知,标签和读写器距离  $R$  每隔

$\lambda/2$  的距离时,  $\varphi$  值也相应的重复,即

$$R_n = \frac{n\lambda}{2}, n = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

每次标签成功运作时,阅读器都会产生一个 RF 相位估计。使用应用程序从单个标签中提取出多个 RF 相位的样本,进行 RF 相位的速度计算。由于测量信道的跳频,读写器跳到下一个频道时,测量的相位值在不断地改变。正如 EPC 标准协议所规定的,阅读器在频率信道之间跳频是指在工作频率范围内,不断变换频率,以减轻频率选择性衰落和同信道干扰,同时保证追踪佩戴标签的移动而不被信道调频中断。首先要根据信道指数对相位值进行分组,同时设定标签相对阅读器距离小于 3 米(3 米内相位差变化较为明显且采样率较高)时进行采样,通过式(2)计算每个通道两个连续相位读数之间的位移。此时两个连续的相位采样点的标签位移小于波长的一半:

$$|\Delta R| = |R_{i+1} - R_i| = \frac{\lambda}{4\pi} |\varphi_{i+1} - \varphi_i + 2\pi(k_{i+1} - k_i)| \quad (4)$$

其中,  $|\Delta R|$  表示  $i+1$  时刻的位移,  $\varphi_{i+1}$  和  $\varphi_i$  表示同频道下两个连续相位测量值。因此,计算  $N$  次采样后的总位移为:

$$D_j = \sum_{i=1}^N \Delta d_{i+j} \quad (5)$$

进行归一化处理。由于无源标签的初始位置决定了 RFID 相位数据的幅值,相同手势特征的数据段会展现出不同的空间性,但其波形变化是一致的。因此对相位数据进一步处理之前需要将相同范围内的数据段进行归一化处理,从而有效减小匹配误差。具体归一化处理公式如下:

$$\bar{L} = \frac{L - \min(L)}{\max(L) - \min(L)} \quad (6)$$

将位移值进行归一化处理后,对收集到的位移数据进行加窗处理<sup>[12]</sup>:将  $W$  个连续采集的数据分组集中到固定窗口,窗口容量为  $w$ 。然后通过相对熵方法<sup>[13]</sup>对相邻窗口数据的概率分别进行比较,求出相邻窗口标签运动数据的差异。假设相邻窗口为  $W_i$  和  $W_j$ ,对应函数分别为  $P, Q$ ,则相对熵分布公式如下:

$$D_{KL}(P \parallel Q) = \sum_i P(i) \cdot \log \frac{P(i)}{Q(i)} \quad (7)$$

通过吉布斯不等式<sup>[14]</sup>,将  $D_{KL}(P \parallel Q)$  与给定阈值

$\rho$  进行比较,当  $V_X$  满足公式

$$D_{KL}(P \parallel Q) \geq \rho \quad (8)$$

则表示相邻的两个窗口至少有一个数据在数据波动采样区间。通过对所有得到的满足要求的窗口数据进行遍历,来提取动态手势特征。

## 1.2 手势识别

将从读写器接收到的标签运动数据与指令库已有运动数据进行比对,判断是否达到动作有效阈值,主要思路为:判断标签运动方向与指令库设定指令运动方向是否一致;判断运动距离  $|\Delta R|$  是否大于指令库设定指令有效运动距离  $S$ ;判断运动时间  $t$  是否小于指令库设定指令有效运动时间  $T$ 。通过 DTW 算法对收集到的具备动态手势特征的窗口数据  $A$  进行手势库数据  $B$  匹配。

假定  $A = a_1, a_2, \dots, a_M$  和  $B = b_1, b_2, \dots, b_N$  为离散时间序列,通过对序列  $A$  进行关于序列  $B$  的规整路径:  $v = (v_1, v_2, \dots, v_k, \dots, v_K)$ , 并进行下列计算:

$$c_v(A, B) = \sum_{k=1}^K d(v_k) \quad (9)$$

对所有可能的规整路径进行遍历后,通过动态时间规整(dynamic time warping, DTW)<sup>[15]</sup>得到最佳路径  $V_X$ ,则序列  $A$  和  $B$  之间的 DTW 距离  $(A, B)$  所获得的最佳对齐路径为:

$$DTW(A, B) = cv \cdot (A, B) = \min[cv(A, B) \mid v \text{ is an warping path}] \quad (10)$$

## 2 系统总体设计

文中采用动态手势识别方案实现用户与智能开关控制系统的人机交互应用,用户在 RFID 阅读器天线读取范围内做出动态手势,系统通过对数据进行加窗处理来解决标签反射信号在时域上的不连续性问题,并利用相对熵的思想提取相位流中动态手势的指纹特征数据。对数据预处理得到分析数据,用分析数据建立手势识别模型,然后利用动态时间规整算法计算当前分段与手势指纹库中各一维分量的匹配程度。最后选取相似度高的指令匹配,通过蓝牙 mesh 网络与开关进行串口通信,发出控制指令,实现人机交互应用。图 1 为智能开关控制系统各模块结构示意图。

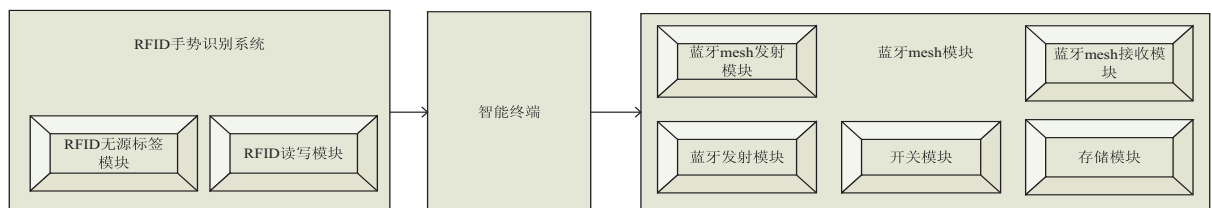


图1 智能开关控制系统各模块结构示意图



## 2.1 开关结构与配置

(1) 主体结构:该实验中模拟日常家庭情景,参考用户日常生活行为习惯,分别设置用户卧室房间控制

开关和用户客厅控制开关;其中 RFID 读写设备放置在用户卧室房间,方便用户夜间进行开关控制(见图 2)。



图2 室内情景模拟图

(2) 主要模块。

**RFID 无源标签模块:**该模块主体为 RFID 无源标签,内置 RFID 天线,由使用者携带,其功能为将标签运动轨迹信息传输给 RFID 读写模块。

**RFID 读写模块:**该模块与智能设备相连,主体为 RFID 阅读器,对无源标签发射无线射频信号,并接收由标签反射回的无线射频信号,同时将采集的模拟信号经过预处理后转换为数字信号。

**智能终端:**该设备为基于 Java 语言的数据采集及处理的 PC 端,将接收到 RFID 读写器的数字信号与数据库比对,匹配成功后将相应指令通过蓝牙发射模块发送。

**智能开关模块:**该模块包括蓝牙模块、继电器模块以及蓝牙 mesh 接收模块、存储模块、蓝牙 mesh 发射模块和继电器模块。其采用蓝牙 mesh 协议,工作频率为 2.4 GHz,设定波特率为 9 600 bps。蓝牙模块实现智能设备与开关之间的通信,继电器模块根据接收指令进行开关控制。

(3) 蓝牙 mesh 系统。

系统开启后,所有开关模块执行存储模块初始指令(所有开关保持关闭状态)。

系统中蓝牙 mesh 接收模块接收到智能终端发射的控制指令后,将指令存入存储模块,通过与存储模块现有指令中各开关状态比对:

① 开关状态一致时,直接通过蓝牙 mesh 发射模块向组网中异同状态开关发出新指令;

② 开关状态不一致时,改变现有开关模块状态,同

时通过蓝牙 mesh 发射模块向组网中异同状态开关发出新指令;

③ 该系统组网中其他蓝牙 mesh 接收模块重复第 2 阶段,直至所有存储模块的存储指令一致。

## 2.2 手势指令匹配

文中在初次实验中测试实现了 5 种动态手势,分别为:手势 1 表示“左移”,对应控制指令为“打开当前房间灯控开关”;手势 2 表示“右移”,对应指令“关闭当前房间灯控开关”;手势 3 表示“前推后左移”,对应指令“打开客厅灯控开关”;手势 4“前推后右移”,对应指令“关闭客厅灯控开关”;手势 5“后拉”,对应指令“关闭所有用电器”。

## 3 实验结果分析

该实验中利用 Java 语言对系统的软件部分进行设计,软件是基于 RFID 阅读器开发商提供的 JDK,结合英频杰公司提供的读写器支持文件完成的,主要包括基于 Java 语言设计的数据采集与处理办法。实验场景如图 2 所示,英频杰 R420 读写器通过以太网与智能终端(PC 端)连接,RFID 无源标签贴在用户手背,使用者站在阅读器天线前 1~2 米内,智能终端(PC 端)利用蓝牙 mesh 与智能开关进行串口通信。

实验首先开启控制系统,并将系统各个模块之间建立通信。将 RFID 读写器、智能开关接收器和智能设备(PC 端或智能手机)根据实际区域按照一定的规则布置,将智能设备与智能开关接收器进行蓝牙配对,从而保持通信良好。使用者事先佩戴 RFID 无源标

签,并在 RFID 读写器工作范围(3 米)内做出对应手势。当标签进入监控区域,硬件参数会发生变化。一切就绪后,系统进入实时手势识别模式。图 3 为实验系统流程。

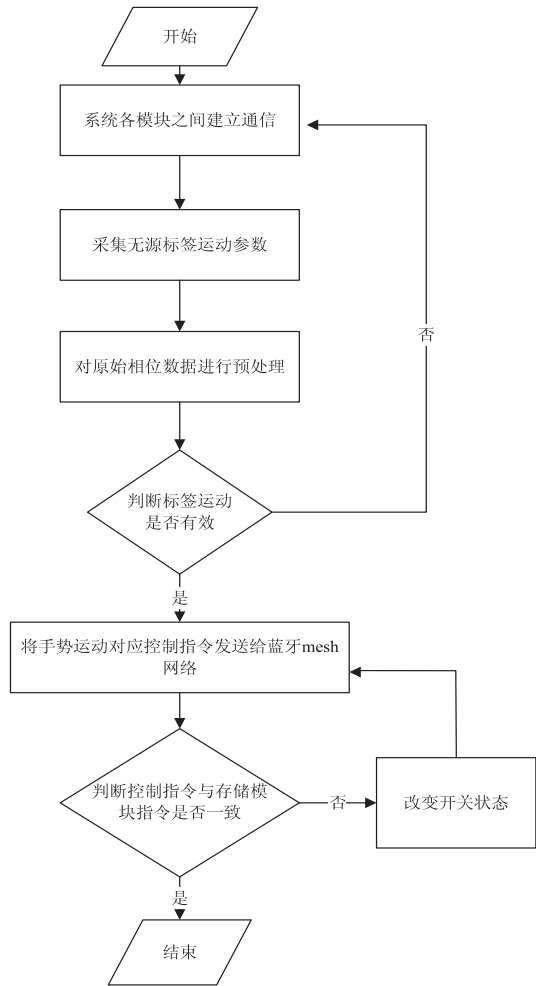


图 3 实验系统流程

实验模拟的是正常家居(15 m \* 10 m)环境情景,客厅与房间由木质隔板相互隔离,由于实验者手部佩戴的无源标签始终处在读写器天线覆盖范围内,且本次实验仅涉及到贴在实验者手部无源标签的运动轨迹,与个体参与者手部特征无较大关联,因此选取志愿者测试每个手势指令 100 次,同时记录出每个手势指令正确响应、错误响应、无响应的次数和识别率百分比。表 1 列出了智能开关对手势指令的反应情况。

表 1 智能控制开关系统反馈

指令	实验次数	指令正确/次数	指令错误/次数	指令无响应/次数	识别率/%
左移	100	90	2	8	90
右移	100	92	5	3	92
前移后左移	100	82	12	6	82
前移后右移	100	83	9	8	83
后拉	100	93	0	7	93

统计上述结果,可发现由于使用者初始动作不规范,会导致实验初期出现无动作响应或判断错误等情况的出现。其中错误响应动作大多为手势“3”与手势“1”混淆,手势“4”与手势“2”混淆,原因主要为使用者前移动作不明显或者前移动作过快。为此,在智能开关对手势指令做出响应的同时,记录了使用者做出手势时无源标签的运动速度分布区间与指令响应率。

表 2 无源标签运动速度分布区间

速度分布区间( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	左移	右移	前移后左移	前移后右移	后拉
0 ~ 20	0	0	0	0	0
21 ~ 40	3	2	3	4	1
41 ~ 60	5	8	14	6	3
61 ~ 80	80	83	78	80	86
81 ~ 100	7	6	2	6	4
101 ~ 120	5	1	3	4	4
120+	0	0	0	0	2
总计	100	100	100	100	100
响应率/%	92	97	94	92	93









根据表 1 和表 2 可知,在标签运动速度过快或者过慢(标签移动速度小于  $40 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  或者大于  $100 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )时,会导致  $D_{KL}(P//Q)$  超出设定阈值,造成手势指令无法被读写器有效识别,智能开关对手势指令无响应。而由于手势 3 和手势 4 相较于其他手势动作更为复杂,并且与手势 1 和 2 在部分动作具有冲突,因此针对这一情况,重新设计了手势为“顺时针旋转”,对应指令“打开客厅灯控开关”;手势 4“逆时针旋转”对应指令“关闭客厅灯控开关”。同时对新的手势进行测试,在选取实验者进行试验之前,重新演示并让实验者熟练每个手势指令动作,实验结果如表 3 所示,同时记录了每个手势指令匹配的概图,见表 4。

表 3 改进手势后智能控制开关系统反馈

指令	实验次数	指令正确/次数	指令错误/次数	指令无响应/次数	识别率/%
左移	100	97	0	3	97
右移	100	98	0	2	98
顺时针旋转	100	95	2	3	95
逆时针旋转	100	96	1	4	95
后拉	100	96	0	4	96

根据对表 3 的分析,可以统计出在重新设计手势 3 和 4 后,相对单一的手势运动方向能较好地读写器识别并响应,同时通过熟练培训后的实验者在做出有效指令的次数也在上升。

表 4 手势指令匹配概图

手势	匹配概图	指令
手势 1		左移
手势 2		右移
手势 3		顺时针旋转
手势 4		逆时针旋转
手势 5		后拉
手势 6		前移
误差手势 1		前移后左移
误差手势 2		前移后右移

根据对表 4 的分析,原先的误差识别手势 1 和 2 由于其特征峰值变化并不明显,在实验者做出不规范手势时易于与手势 1 和 2 混淆。当重新设计手势 3 和 4 后,相对单一的手势运动方向能较好地被读写器识别并响应,同时通过熟练培训后的实验者在做出有效指令的次数也在上升。

在对智能开关执行手势指令的平均反馈时延进行统计后,实验者在做出手势 1,2,5 时,系统执行指令的平均反馈时延低于 0.75 s (0.73 s/0.74 s/0.71 s),且手势的正确识别率在 95% 以上。而当实验者做出手势 3 和 4 时,系统平均反馈时延分别为 0.98 s 和 1.01 s,正确识别率在改进手势后也上升至 95% 左右,可以看出手势动作复杂程度与智能开关对手势指令的反馈具有正相关性。单一方向的手势指令,在使用者熟练动作后,可以满足使用者对智能开关的远程手势控制。

#### 4 结束语

通过将 RFID 技术与蓝牙 mesh 技术相结合,构建了一种基于 RFID 手势识别的智能开关控制系统。该系统通过预先构建手势指令库,将用户所需的家庭开关应用情景与手势指令相匹配,从而实现用户对智能开关的手势控制。通过对实验结果的分析和改进,智能开关对手势指令的正确反馈率达到 95%,其 RFID 无源标签能够较好地反映出使用者的手部运动,无源标签运动轨迹数据在处理后能够正确匹配控制指令,并通过蓝牙 mesh 向智能开关传递指令。通过设置单一方向的手势可以有效提高对于智能家居的开关控制

的精确度和实时响应的准确性。

#### 参考文献:

- [1] 贾雯杰. 物联网与智能家居发展浅析[J]. 科技与生活, 2010(13):119.
- [2] 程 康,叶 宁,黄海平,等. 基于 RFID 反向散射通信的机器人手势控制系统[J]. 计算机系统应用,2018,27(11): 57-63.
- [3] 王经纬,何泾沙. 基于 RFID 技术的无源定位算法[J]. 计算机工程与设计,2013,34(10):3486-3491.
- [4] 安 文. 物联网技术在智能家居中的应用[J]. 信息与电脑,2017(10):195-196.
- [5] 刘永富,焦斌亮,刘庆赞. 基于蓝牙的智能家居控制系统[J]. 现代建筑电气,2010,1(12):13-18.
- [6] 孟令许. 基于 S3C2440A 的 ZigBee+WiFi 的智能家居控制系统[D]. 成都:成都理工大学,2012.
- [7] TRADFRI 宜家智能灯泡支持 HomeKit 和 Alexa[J]. 数字家庭,2017(11):9.
- [8] 德尔福红外摄像头提升手势控制精度[J]. 经营者,2015(16):36.
- [9] LEEY H, MARSIC I. Object motion detection based on passive UHF RFID tags using a hidden Markov model-based classifier[J]. Sensing and Bio-Sensing Research, 2018, 21: 65-74.
- [10] LI W, ZHANG W, TAM K W. Wireless control for Vision Impaired based on posture effect of UHF RFID cane[C]// IEEE international conference on RFID technology & applications. Foshan: IEEE, 2016:939-945.
- [11] 钱建平,李晓兵,茅梅芳,等. 基于蓝牙 Mesh 组网的智能灯丝灯产品设计[J]. 中国照明电器,2018(8):25-29.
- [12] QIAN S, CHEN D. Optimal biorthogonal analysis window function for discrete Gabor transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(3):694-697.
- [13] MACKAY D J C. Information theory, inference & learning algorithms[M]. New York:Cambridge Univ. Press, 2003.
- [14] VEDRAL V. The role of relative entropy in quantum information theory[J]. Reviews of Modern Physics, 2002, 74(1):197-234.
- [15] HARTMANN B, LINK N. Gesture recognition with inertial sensors and optimized DTW prototypes[C]//IEEE international conference on systems man & cybernetics. Istanbul, Turkey: IEEE, 2010:2102-2109.