

一种最优路径规划的灭火机器人系统设计

温卫敏

(滁州学院计算机与信息工程学院,安徽 滁州 239000)

摘要:消防灭火机器人在复杂的火场情景下可代替消防员完成火场监测和灭火任务。文章设计了一款灭火机器人系统,采用 MK60DN512ZVLQ10 单片机、三路防震火源采集摄像头、两路红外避障传感器和红外火焰传感器,通过 PID 算法实现机器人行走的速度控制和方向调节;车身设计综合考虑灭火机器人行走稳定性、负载重量和系统稳定性;系统采用自适应均值滤波算法有效消除火源图像信息噪声干扰,优化火源图像质量,提高火源定位精度;结合红外避障传感器采集信息,利用最小生成树 Kruskal 算法按照火焰大小和避障规划选择最优灭火路径,达到提高灭火效率和精度的目的。

关键词:灭火;机器人;滤波算法;路径规划

中图分类号:TP242

文献标志码:A

引言

灭火机器人是集人工智能、仿生科学、机械设计与制造等学科知识为一体的智能机器人,用于协助消防员开展火灾现场灭火救援,适合复杂环境、高危火情下替代消防员进行火灾现场监测和灭火,提高灭火的精度和速度,对保障人民生命财产和消防员人身安全有重要的现实意义。众多研究者开展了灭火机器人的智能化、自动化相关核心技术的探索,主要研究方向有灭火机器人系统设计、路径识别、火源鉴别、火源定位、火源监测和灭火救援,其中火源鉴别、火源定位和路径识别是消防灭火机器人系统中关键的环节^[1]。吴宜勇^[2]等采用了 MSP430 单片机实现了灭火报警机器人,有效检测了烟雾浓度,估算了火源与机器人的距离;盛彬^[3]等采用

STC12C5A60S2 单片机实现了智能灭火机器人,利用火源温度和烟雾浓度判读火源地点;王志中^[4]采用了改进蚁群算法实现了机器人智能路径优化;蒋林^[5]等采用了分层模糊控制系统实现了灭火机器人火源寻踪;史兵^[6]等通过无线传感网络和远程网络控制实现了移动灭火机器人控制,达到了良好的效果。

及时灭火能有效降低火灾造成的损失,然而,要实现及时灭火,就需要尽早确定火源点。火源点确定最直接的方式是直接火源图像获取信息,但基于火源图像处理 and 最短路径的灭火机器人设计较少。由于火灾现场环境复杂高、情景变化快,火源干扰较强等问题,大量的外界噪声一直影响系统识别和定位的精度。为提高火源定位精度和效率,本文设计了一种最优路径规划的灭火机器人系统。系统采用自适应均值滤波算法消除

收稿日期:2018-03-06

基金项目:安徽省教育厅自然科学基金项目(KJ2016B18)

作者简介:温卫敏(1980-),女,安徽阜阳人,实验师,主要从事智能控制与无线传感器网络方面的研究,(E-mail)wenweim@chzu.edu.cn

火灾现场监测图像噪声,以提高监测图像的质量和火源定位的精度^[7],利用最小生成树 Kruskal 算法^[8]结合红外路径避障原理,调节灭火机器人移动偏移量,选择最短路径抵近火源点,完成灭火任务。实验证明算法具有良好的鲁棒性,系统稳定性较好。

1 系统整体设计

系统在整体架构设计上,综合考虑了灭火机器人行走稳定性、自身重量、负载重量、数据采集、元器件选择、

硬件结构布局及软件设计等。为提高灭火机器人行走的稳定性,采用对称四驱轮式车型结构,整车高与宽的比例为 1:1.35,负载水枪、探头、传感器等设计为可升降式,在机器人行走时,可降低高度至贴近车身位置,以保障行驶稳定性;负载重量和自身重量关系到驱动电机的选择,为提高动力性能,采用双电机耦合驱动。数据采集装置包括火源探测摄像头,红外避障传感器和红外火焰传感器等。系统总体架构如图 1 所示。

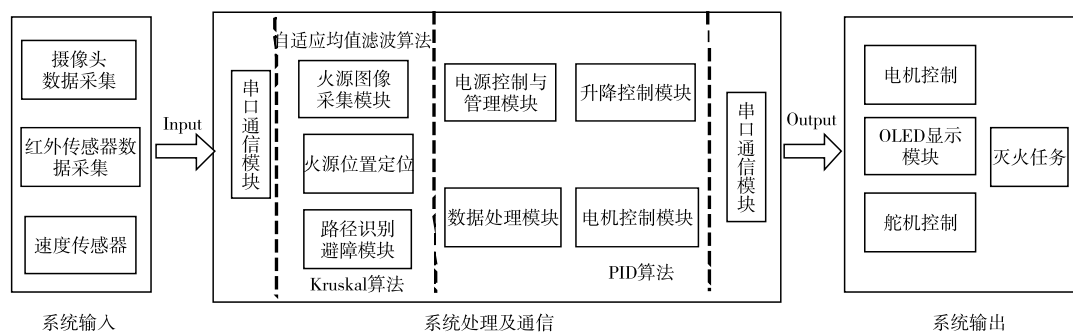


图 1 灭火机器人系统架构

系统主要分为输入部分、数据处理及通信和输出部分。输入部分主要完成火源图像数据采集、道路障碍物数据采集和机器人行进速度数据采集,火源图像数据通过自适应均值滤波算法去除噪声,结合红外火焰传感器计算火源中心位置,判读行驶路径障碍物,并通过最小生成树 Kruskal 算法^[9-10]计算规划灭火行驶最短路径,控制器根据数据处理结果对电源进行管理,触发舵机偏移和电机调节,闭环自动控制技术 PID 算法控制行驶速度,行驶到近火源有效位置。

1.1 硬件设计

系统控制器选用 MK60DN512ZVLQ10 单片机,该芯片具有 32 位微控制器、144 引脚、16 个 DMA 通道、128 KB SRAM、512 KB FLASH、16 位 A/D 转换器、12 位 D/转换器、12 个通道正交解码和电机控制、5 个 UART 模块、100 MHz 时钟频率,可有效利用控制脉冲宽度控制舵机输出电流和电压,支持多种数据格式传输和接受,功耗较低,运算速度满足系统运算和控制需求。

摄像头选用防震动摄像头,集成了彩色 CMOS 图像采集芯片,分辨率为 652 × 582,传输速率为 60 帧/秒,支

持 VGA、QVGA 图像格式,输入电压 3.3 V,额定功率小于 150 mW,可以在运动状态下获取火场图像数据,体积小,易控制芯片集成,系统设计为 3 路摄像头采集电路。

红外避障传感器采用发射管持续发射一定频率的红外线传感器,当在传播方向上遇到障碍物,接受管将收到较强的反射光线,经比较器电路处理后,信号输出接口输出低电平数字信号,探测障碍物距离。红外火焰传感器通过探测火源发出的短波红外线,确定火焰位置信息,探测波段范围:700 nm ~ 1100 nm^[11]。

速度传感器采用增量式编码器 E6B2 - CWZ6C 型,输入电压 5 V ~ 24 V,500 脉冲/旋转,最高转速 6000 r/min,输出 A、B、C 相,A 相、B 相相位差为 $90 \pm 45^\circ$,最高响应频率 100 kHz,可实现正向和反向速度控制,用于记录和控制机器人速度。

电机是系统动力的提供者,本系统采用双电机耦合驱动,驱动模块包括 SN74HC244S 型和 HIP4082IBZT 型,其中 SN74HC244S 型电机驱动模块为信号放大模块,主要完成单片机 GPIO 工作电流放大,HIP4082IBZT 型驱动模块可以工作在 5 V ~ 15 V 电压范围内,主要完

成对 PWM 波放大,可为灭火机器人提供稳定的动力驱动。系统主要硬件见表 1。

表 1 系统主要硬件性能表

硬件名称	主要性能参数	功能
MK60 单片机	32 位微控制器,144 引脚,16 个 DMA 通道,128 KB SRAM, 512 KB FLASH,16 位 A/D 转换器、100 MHz 时钟频率、低功耗	系统主控芯片负责系统运算、控制和通信
捕食者-S 型摄像头	CMOS 图像采集芯片,分辨率为 652 × 582, 传输速率为 60 帧/秒,支持 VGA、QVGA 图像格式	火源图像信息采集
红外避障传感器	探测距离为 30 cm 可调节	路径障碍信息采集
红外火焰传感器	探测范围:700 nm ~ 1100 nm,输出数字信号和模拟信号	火源位置信息采集
增量式编码器	最高转速 6000 r/min、最高响应频率 100 kHz, 可实现正向和反向速度控制	记录和控制机器人速度
LM317 型稳压芯片	最大电流负载为 1.5 A, 可稳定输出 1.2 V ~ 37 V 电压	摄像头模块和 OLED 显示模块 提供了 3.3 V 电压
LM7805 型稳压芯片	提供 5 V 直流稳定电压	最小系统板,速度传感器模块和红外 避障传感器模块,供电 5 V 电压
LM2940CT 型稳压芯片	最大输出电压为 26 V、具有电池反接和低电流保护电路	舵机模块提供电源
SN74HC244S 型驱动芯片	信号放大模块	单片机 GPIO 工作电流放大
HIP4082IBZT 型驱动芯片	工作在 5 V ~ 15 V 电压范围内	PWM 波放大

1.2 软件架构设计

系统软件设计主要包括系统的初始化、图像采集与数据处理、核心算法控制等,流程如图 2 所示。系统初始化主要是对系统硬件接口连接如摄像头模块、OLED 显示模块、速度采集模块、红外避障模块、电机舵机驱动模块等进行初始化。图像采集与数据处理主要是通过

摄像头传感器将其值采集存放到数组中,由于摄像头存在噪点,用中值滤波器算法消除噪声,确定火源的具体位置。核心算法控制算法主要是确定火源位置后,将当前位置与机器人正前方的中线计算出一个偏差,根据这个偏差利用简单的 PID 算法计算出系统所需舵机的 PWM 波的输出量,来具体控制舵机前进的方向。

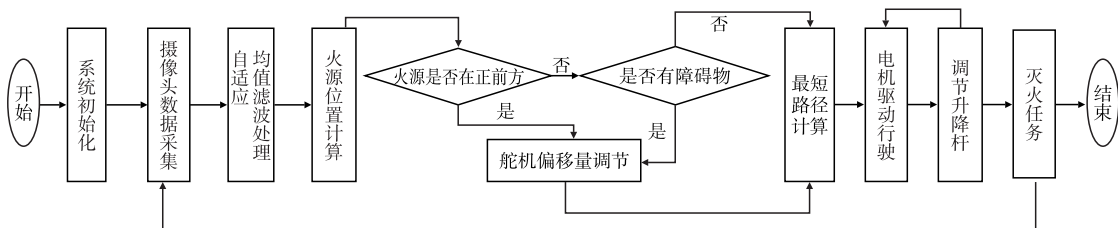


图 2 系统软件流程图

硬件模块软件初始化主要包括:摄像头模块软件初始化、串口模块软件初始化、电机舵机模块软件初始化、编码器软件初始化、OLED 显示屏软件初始化、红外避障模块软件初始化及按键电路模块初始化等。其中摄像头模块软件初始化主要完成数据传输方式、场中断和行中断设置,将火场图像数据按照帧为单位传输;串口模块软件初始化主要完成内核时钟、外设时钟和 UART0 串口模块接口设置;电机舵机模块软件初始化主要设置 3 个 FTM 模块的通道分配,将 FTM0 模块的两个通道为

电机使用,FTM1 和 FTM2 共八个通道分配给舵机和编码器,可输出稳定的 PWM 波;OLED 显示屏软件初始化完成对 7 个引脚进行初始赋值,将 DC、D1、D0 和 CS 引脚分别连接 SPI 总线的 SOUT 信号、SIN 信号、CLK 时钟信号和片选信号接口;红外避障模块初始化是完成检测距离调节和将输出电平初始设置为低电平;按键模块软件初始化是设置各相关引脚为输入状态,各模块的初始化为系统开始工作做好准备。

系统硬件模块初始化后,然后进行摄像头图像采

集,将采集到的原始数据放在指定的地址空间内,然后进行自适应加权滤波处理消除采集到图像中的噪点,确定火源的位置与机器人正前方的位置进行偏差计算得到偏移量,通过PID算法利用偏移量计算电机舵机的PWM波的输出量,然后驱动电机舵机准确找到火源的位置,将火源扑灭。

2 系统算法设计

图像采集的清晰度直接影响系统的精确度。摄像头在图像采集中难免会有噪声,如光电转换中灵敏元件的不均匀及量化噪声等,容易对系统视觉判读产生一定的干扰,导致系统精确度不高。通过大量的算法实验对比分析,自适应均值滤波算法具有很好的去噪能力。本系统采用自适应均值滤波算法对摄像头采集的数据进行有效地降噪处理,通过窗口各像素与中心像素间灰度差异和距离计算窗口中心像素灰度值均值,用分段线性函数根据各像素对不同像素到中心像素的影响程度和距离赋予权值,达到降噪和保持原有图像的有效信息不失真,为计算火源位置提供较精确的位置信息。采用最小生成树Kruskal算法规划计算火源点最短路径,综合考虑路障信息和最小距离,最终规划最优行驶路径。

2.1 自适应均值滤波算法设计

自适应均值滤波算法^[12-14]是在均值滤波算法基础上,将窗口内各像素与窗口中心像素间的距离纳入权值决策因素,确保窗口中心像素平均灰度值更接近真实场景,达到降噪的目的。自适应均值滤波算法在计算窗口中心像素灰度均值取决于窗口局部邻域灰度因子 $W_{j,t}^p$ 和局部邻域空间因子 $W_{j,t}^d$,其中 $W_{j,t}(j,t \in \{-1,0,1\})$ 为窗口因子, $W_{j,t}^p$ 为窗口各像素在灰度值上对中心像素的影响, $W_{j,t}^d$ 为各像素与中心像素在空间距离的影响。 $W_{j,t}^p$ 和 $W_{j,t}^d$ 定义如下:

$$W_{j,t}^p = \exp\left(\frac{-\|f(x,y) - f(x+j,y+t)\|^2}{\delta_p \times \rho_{p,(x,y)}^2}\right)$$

$$W_{j,t}^d = \exp\left(\frac{-\max(|(x+j) - x|, |(y+t) - y|)}{\delta_j}\right)$$

其中,图像窗口大小为 $M \times N, j, t \in \{-1,0,1\}, 1 \leq x \leq M, 1 \leq y \leq N, f(x,y)$ 为窗口中心像素灰度值, $f(x+j,$

$y+t)$ 为窗口内非中心各像素灰度值, δ_p 决定 $W_{j,t}^p$ 变化特征,为延伸的尺度因子, δ_j 决定 $W_{j,t}^d$ 变化特性,在 $(x+j,y+t)$ 位置空间与中心像素 (x,y) 的距离越近,则 $W_{j,t}^d$ 就越大,其对中心像素的影响就越大,权值就高, $\rho_{p,(x,y)}^2$ 为中心像素与非中心像素灰度差异函数, $\rho_{p,(x,y)}^2$ 越小窗口内灰度均值越好:

$$\rho_{p,(x,y)} = \sqrt{\frac{\sum_{(x+j,y+t) \in N(x,y)} \|f(x+j,y+t) - f(x,y)\|^2}{N_{N(x,y)}}}$$

其中, $N(x,y)$ 是像素 (x,y) 的邻域像素, $N_{N(x,y)}$ 为窗口邻域内像素个数,若窗口内非中心像素灰度值 $f(x+j,y+t)$ 与窗口中心像素灰度相似的越大,局部邻域灰度因子 $W_{j,t}^p$ 就越大。两个决定因素综合影响窗口系数,定义为 $W_{j,t}^{pd}$:

$$W_{j,t}^{pd} = \begin{cases} W_{j,t}^p \times W_{j,t}^d & (j,t) \neq (0,0) \\ 0 & (j,t) = (0,0) \end{cases}$$

经滤波后窗口中心像素灰度值函数为:

$$f_{(x,y)}^{pd} = \frac{\sum_{j=-1}^1 \sum_{t=-1}^1 W_{j,t}^{pd} f(x+j,y+t)}{\sum_{j=-1}^1 \sum_{t=-1}^1 W_{j,t}^{pd}}$$

利用滤波函数 $f_{(x,y)}^{pd}$ 将有效降低图像的噪声干扰,有利于火源中心位置计算。其核心代码为(C++):

```

.....
for (i = filter; i < height - filterH + filter + 1; i +
+)
    { for (j = filterX; j < width - filterW + filterX +
1; j + +)
        { for (k = 0; k < filterH; k + +) //滤波器的高度
            { for (l = 0; l < filterW; l + +) //滤波器的宽度
                { gR = img.at < Vec3b > (i + 1 - filterX, j + 1 -
filter) [0];
                    // filterX:滤波器的中心元素 X 坐标
                    //filter:滤波器的中心元素 Y 坐标
                    pAryR[k * filterW + 1] = gR;
                    gG = img.at < Vec3b > (i + 1 - filterX, j + 1 -
filter) [1];
                    pAryG[k * filterW + 1] = gG;

```


晰度不够明显,传统均值滤波算法处理降噪的效果明显低于自适应均值滤波算法,自适应均值滤波算法可以有效地降低外界环境对图像的影响,图像的清晰度较高,为火源位置计算提高了较准确的依据。

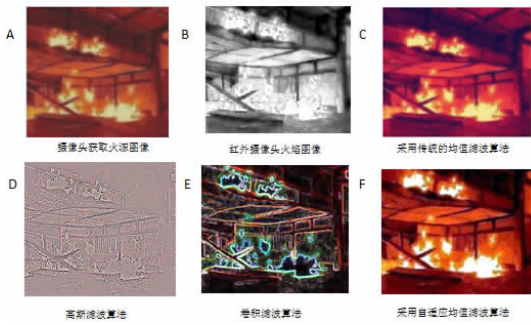


图3 各种滤波算法效果对比

为提高灭火效率,采用最小生成树 Kruskal 算法,并综合了火焰大小和火源离灭火机器人的距离,规划灭火最优路径,具体过程图4所示。实验分别按照避障优先路径规划、火焰最大优先路径规划和综合火焰、避障和最短路径规划,如图5所示,避障优先路径规划灭火机器人要经过7条边回到出发点,边的权值波动较大;火焰最大优先路径规划灭火机器人要经过6条边,个别边的权值波动较大,影响灭火时间;而综合考虑避障、火焰最大,最优路径规划经过5条边,边的权值起伏小于前两种规划。因此,在考虑火焰大小和避障条件下,最优路径规划最节省灭火时间,减少火灾损失。

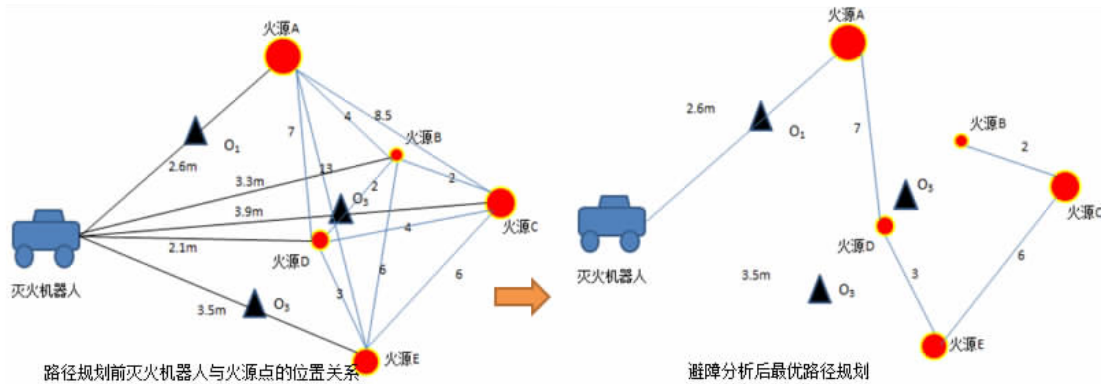


图4 灭火最优路径规划

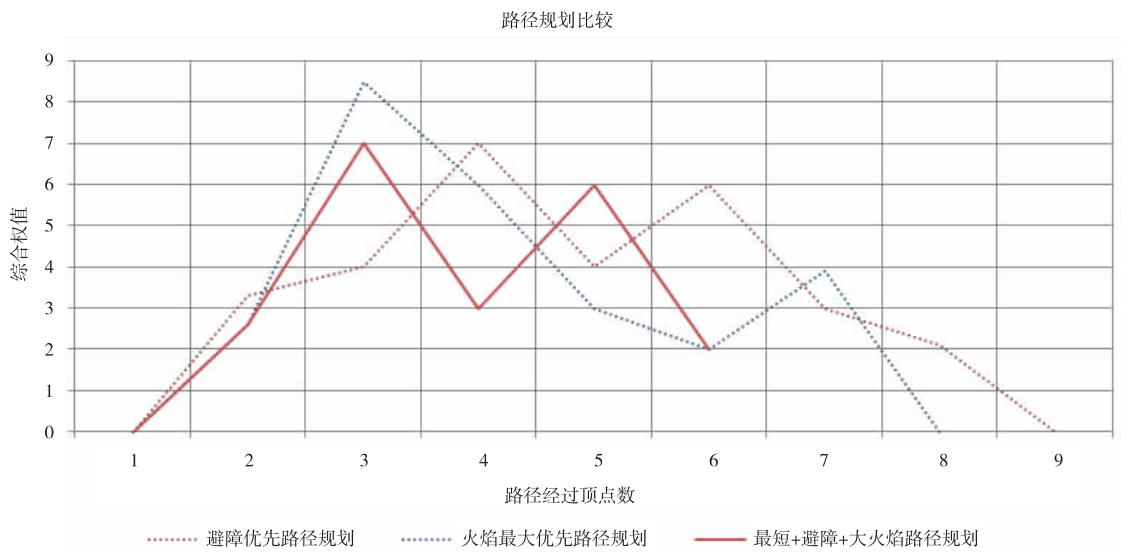


图5 路径规划比较

按照路径最优计算过程,分别令灭火机器人为点 O , R_o 为避障优先路径规划值、 R_f 为火焰最大优先路径

规划值, R_c 为综合火焰最大、避障和最优路径规划值,对其进行计算。

由图 4 可知 OA、OB、OC、OD、OE 级各火源点之间的距离,火焰面积和烈度,见表 2。

表 2 火源点距离表述

点测距	OA	OB	OC	OD	OE	AB	AC	AD	AE	BC	BD	BE	CD	CE	DE
距离或权值	2.6m	3.3m	3.9m	2.1m	3.5m	4w	8.5w	7w	13w	2w	2w	6w	4w	6w	3w
障碍物	0	×	0	×	0	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
火源点		A	B	C	D	E									
火源面积/s		5	1	3.5	2.5	3									
火焰烈度/I		4	1	3	2	2.5									

注:m 为距离单位,w 为单位权值系数,s 单位面积,I 为单位烈度值。

$$R_b = OB \times s_B^{-1} \times b_B + AB \times s_A^{-1} \times b_A + AD \times s_D^{-1} \times b_D + DC \times s_C^{-1} \times b_C + CE \times s_E^{-1} \times b_E$$

其中

$$R_f = OA \times s_A^{-1} \times b_C + AC \times s_C^{-1} \times b_C + CE \times s_E^{-1} \times b_E + DE \times s_D^{-1} \times b_D + BD \times s_B^{-1} \times b_C$$

$$R_c = OA \times s_A^{-1} \times b_C + AD \times s_D^{-1} \times b_D + DE \times s_E^{-1} \times b_E + CE \times s_C^{-1} \times b_C + BC \times s_B^{-1} \times b_B$$

其中: b_A 、 b_B 、 b_D 、 b_C 、 b_E 为无障碍,值为 1; $b_C > 1$ 且障碍物大小相等值为 1.2,令面积单位 s 为 1,烈度单位 I 为 1,将表中数据带入公式计算可得:

$$R_b = 4.88; R_f = 4.76; R_c = 4.52; R_b > R_f > R_c, R_c$$

为最优路径规划。

4 结束语

灭火机器人在火场监测和救援上的运用越来越广泛,总体向着自动化、智能化、交互式方向发展,目的是为应对火场复杂环境、提高灭火效率和灭火质量、在危险时刻大显身手。基于自适应均值滤波算法的灭火机器人的设计,优化了图像噪声处理效果,提高了火源定位精度,有助于机器人快速锁定灭火目标,最短路径规划和避障设计有利于灭火机器人按照火焰大小和距离远近规划最有效的灭火路径方案,提高灭火效率。系统在三维立体场景下的灭火运用有待进一步设计,尤其是密闭环境下三维火源信息采集是下一步研究的重点。

参考文献:

[1] 曹晶秀.基于多传感器信息融合技术在灭火机器人系统的设计[J].计算机测量与控制,2012,20(1):288-290.

[2] 吴宜勇,郭颖,金嘉谊,等.基于 MSP430 的小车式灭火机器人设计[J].国外电子测量技术,2017(11):99-102.

[3] 盛彬,乔栋.基于单片机的用电报警系统在智能灭火机器人中的应用[J].通讯世界,2017(16):272-273.

[4] 王志中.基于改进蚁群算法的移动机器人路径规划研究[J].机械设计与制造,2018(1):242-244.

[5] 蒋林,金祖飞,程文凯,等.一种分层模糊控制的灭火机器人火源寻踪[J].机械设计与制造,2017(9):49-53.

[6] 史兵,段锁林,李菊,等.基于无线传感器网络的室内移动灭火机器人系统设计[J].计算机应用,2018,38(1):284-289.

[7] 张文娟,康家银.一种用于图像降噪的自适应均值滤波算法[J].小型微型计算机系统,2011,32(12):2495-2498.

[8] 王英,刘天时.基于 Kruskal 算法的最短路径算法研究[J].重庆高教研究,2009,28(6):37-39.

[9] 潘敏.最小生成树及 Kruskal 算法在城市规划中的应用[J].数字技术与应用,2017(8):132-133.

[10] 袁威威.应用 Kruskal 的改进算法求最小生成树[J].江苏第二师范学院学报,2017,33(6):12-13.

[11] 林凡强,张阳,杨文旭.基于红外火焰传感器和最小二乘法的灭火机器人[J].传感器与微系统,2015,34(1):110-112.

[12] 张文娟,康家银.一种用于图像降噪的自适应均值滤波算法[J].小型微型计算机系统,2011,32(12):2495-2498.

[13] 陈家益,黄楠,熊刚强,等.基于置信区间的自适应加权均值滤波算法[J].南京理工大学学报:自然科学版,2017,41(3):307-312.

- [14] 魏彦.基于自适应均值的图像滤波算法[J].包装工程,2017,38(13):204-207. 95-95.
- [15] 李仙玉.基于 Prim 算法和 Kruskal 算法的最小生成树优化研究[J].计算机光盘软件与应用,2010(3):
- [16] 丁晓春.面向灭火救援工作需求的最优路径规划研究[J].测绘与空间地理信息,2013,36(8):103-106.

Design of a Fire-fighting Robot System Based on Optimal Path Planning

WEN Weimin

(College of Computer and Information Sciences, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China)

Abstract: Fire-fighting robot can replace fireman to complete fire behavior monitoring and extinguishing task in complex fire scene. The hardware of this system is MK60DN512ZVLQ10 single-chip micro-computer, three roads shock proof fire acquisition camera, two roads infrared sensor and infrared flame sensor of obstacle avoidance. The self-adjusting speed and direction of the robot are realized by the PID algorithm. The walking stability, load weight and system stability of robot body design has been considered on the fire-fighting robot. An Adaptive Mean Filtering Algorithm is adopted to eliminate the noise interference of the fire source image effectively, optimize the image quality of fire behavior, and improve the positioning accuracy of fire source. Combined with collected information from infrared obstacle avoidance sensor, the best extinguishment path used the minimum spanning tree Kruskal algorithm is planed, which according to the flame size and obstacle avoidance, and the aim of improving efficiency and accuracy of fire-fighting is achieved.

Key words: fire-fighting; robot; filtering algorithm; pathplanning