

## 基于飞行时间深度图像变化率的火焰识别方法

韩郁翀, 秦俊, 马兴鸣, 赵兰明, 李雨农

(中国科学技术大学 火灾科学国家重点实验室, 安徽 合肥 230027)

**摘要:** 为开发飞行时间算法在火灾探测中的应用, 简化算法, 提高检测速率和准确性, 根据飞行时间法, 结合火焰的深度图特征, 设计了基于深度图像变化率的火焰识别算法。以三维深度相机为主要图像捕获设备, 进行了多组火焰识别实验, 包括正庚烷火焰、乙醇火焰、纸张火焰、灯光干扰、行人干扰实验, 对捕获的图像进行了处理与计算, 提出了识别火焰的简化算法和火焰像素估计模型。采用该方法分析了火焰深度图特征, 火焰识别结果图像的频谱图特征、集中度特征以及面积变化特征。研究表明, 采用文中提出的算法的实验识别率大于 91.5%, 误识率小于 3.8%, 能有效识别火焰。

**关键词:** 火焰识别; 深度图; 飞行时间; 火灾探测

中图分类号: X913.4; TP391.41 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)01-0338-07

## Identification of fire flame based on variation rate of time-of-flight-depth-map method

Han Yuchong, Qin Jun, Ma Xingming, Zhao Lanming, Li Yunong

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** In order to develop the application of time-of-flight algorithm in fire detection and simplify the algorithm to improve detection rate and accuracy, according to the time-of-flight-depth-map method, considering with the characteristics of depth map of fire flame, fire flame identification algorithm based on variation rate of time-of-flight-depth-map was designed. Several groups of fire flame identification experiments, including n-heptane flame, ethanol flame, paper flame, lamplight interference and pedestrian interference test, were carried out with 3-D depth camera acted as main equipment. The captured maps were processed and computed. A simplified algorithm was proposed for fire flame identification which was used to analyze the characteristics of depth map, frequency spectrogram, concentration ratio and area fluctuation of fire flame. The results indicate that the identification precision rate is greater than 91.5%, and the misrecognition rate is less than 3.8%. Fire flame could be efficiently identified with this algorithm.

**Key words:** fire flame identification; depth map; time of flight; fire detection

收稿日期: 2013-05-12; 修订日期: 2013-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(51276176); 国家科技支撑计划(2011BAK03B02)

作者简介: 韩郁翀(1989-), 女, 硕士生, 主要从事火灾科学与技术方面的研究。Email: irishyc@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 秦俊(1953-), 男, 教授, 主要从事热灾害及热流场实验诊断方法方面的研究。Email: qinjun@ustc.edu.cn

## 0 引言

火焰图像识别是常用的一种图像型火灾探测方法,一般利用普通彩色摄像机拍摄得到图像序列,再根据火焰颜色<sup>[1]</sup>特征识别火焰。基于颜色的火焰识别法难以区分色彩与火焰相近的物体,比如红、黄色的高亮度物体、闪烁的灯光等。因此还需要结合其他判据,例如火焰脉动频率<sup>[2]</sup>、火焰尖角<sup>[3-4]</sup>等特征将火焰与干扰源区分。

随着科技的进步,人们尝试将更多的新技术应用到火灾探测中。基于飞行时间法的三维深度相机是视觉研究领域新近出现的一种硬件手段,该技术在机器视觉、生物医疗以及视频监控方面已受到了广泛关注<sup>[5-6]</sup>。Steven Verstockett 等人首次将三维深度相机用于火灾探测,将测得的深度图、振幅图与普通摄像机得到的彩色图像相结合,进行火焰识别<sup>[7-8]</sup>。但是这种多模式多传感器的探测方式较为复杂、软硬件要求较高。文中通过飞行时间法得到深度图,在帧差法的基础上,提出了一种深度图像变化率算法,可以识别不同物质燃烧产生的火焰,分析火焰与非火焰的深度图特征。

## 1 基于飞行时间深度图像变化率的火焰识别算法

飞行时间法(Time of Flight, TOF)的测距原理是利用光的物理传播特性<sup>[9]</sup>,测量主动光线在照射到物体表面后又反射回来这一过程中的飞行时间,再结合光速得到视场内物体的深度图像,此图像包含了视场中不同物体的距离信息。光发射器发出连续调制波,将直接测量飞行时间转换为用“四点法”<sup>[10]</sup>测量相位的改变,利用公式(1)~(2)计算各点的距离,再将距离矩阵转换为深度图像。

$$\Delta\varphi = \arctan\left(\frac{c_3 - c_1}{c_0 - c_2}\right) \quad (1)$$

$$d = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \cdot \frac{cT}{2} \quad (2)$$

式中: $\Delta\varphi$ 为相位差; $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$ 、 $c_4$ 为“四点法”的互相关系数; $c$ 为光速; $d$ 为深度,即物体到相机的距离。

Steven Verstockett 等人通过实验发现<sup>[9]</sup>,深度图虽然能准确地反映出一般物体到光探测器的距离,但在拍摄火焰时得到的深度图呈现出高度的无序性。

深度图中火焰像素点对应的距离  $d$  不等于火焰到探测器的实际距离,火焰区域与非火焰区域相比, $d$  随时间快速变化,而且变化范围的跨度大,在探测器的整个有效范围内无规律地变化。因此文中尝试通过分析深度图序列地变化特点,达到火焰识别的目的。

### 1.1 疑似火焰像素检测

对于序列图像信号来讲,最有用的信息是相邻两帧间图像信号的变化信息,帧差法<sup>[11]</sup>就是一种常用的分析方法。TOF 相机得到的图像的物理意义是物体到探测器的距离,物体静止情况下的帧差应该为零。当帧差非零时认为该点的深度值发生变化,有可能是火焰区域。但是在实际使用中,受技术的制约,必须要考虑 TOF 相机的测量误差,图像的内在噪声产生非零差值<sup>[12]</sup>。在一定的误差率下,距离远的物体的深度图帧差会大于距离近的物体。如果阈值设置过小,远处物体由于测量误差产生超过阈值的帧差,随后会被误判为火焰。如果阈值设置过大,又可能导致近处火焰发生漏报。因此文中提出了 TOF 深度图像变化率算法,基本思想是在深度图像序列中,进行当前帧与上一帧的图像相邻帧间差分运算,再求帧差与上一帧的深度值比值,即计算深度值的变化率。当变化率超过阈值时,认为该点为疑似火焰像素点,标记为白色(值为 1)。如果小于阈值,认为该点为非火焰像素点,标记为黑色(值为 0)。像素点深度值的变化率将火焰与非火焰像素深度值变化的差别放大,排除了相机本身的静态误差,可以快速有效地进行火焰识别,具体公式如下:

$$D_n(x, y) = \frac{|f_n(x, y) - f_{n-1}(x, y)|}{f_{n-1}(x, y)} \quad (3)$$

$$\text{flame}_n(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{if } D_n(x, y) \geq T_1 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

设  $f_n(x, y)$  为第  $n$  帧深度图像在空间  $(x, y)$  处经归一化后的灰度值,取值范围是  $0 \sim 1$ ;  $D_n(x, y)$  为空间  $(x, y)$  处前后两帧的帧差与上一帧的比值;  $T_1$  为阈值;  $\text{flame}$  为处理得到的疑似火焰区域二值图像。

二值化处理中最关键的是确定阈值。文中采用最小  $1/2$  抽样方法<sup>[13]</sup>确定阈值。处理拍摄得到的火焰深度图序列,计算火焰深度变化率的绝对值  $D_n(x, y)$ ,放入一维数组  $\{d\}$  中。将  $\{d\}$  按升序排列,取中间值  $m$ 。按公式(5)~(7)计算序列的权值  $w(x, y)$ 、噪声的均值  $\mu$  和方差  $\sigma$ ,计算分割阈值  $T_1 = \mu + \lambda\sigma$ 。其中  $\lambda$  为修正阈值的常数,用来兼顾减少噪声和保持识别出的火

焰区域的完整性。

$$w(x,y)=\begin{cases} 1 & d(x,y)\leq m \\ 0 & d(x,y)> m \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu=\frac{\sum d(x,y)\cdot w(x,y)}{\sum w(x,y)} \quad (6)$$

$$\sigma^2=\frac{\sum |d(x,y)-\mu|^2\cdot w(x,y)}{\sum w(x,y)} \quad (7)$$

## 1.2 运动像素排除

运动物体对提取火焰的影响分为两种情况。

(1) 物体纵向位移的影响:分析运动物体上的某一像素点  $(x,y)$ , 当它朝探测器前进或者后退时, 深度值发生变化。但室内运动物体的速度有限, 一般速度低于  $10\text{ m/s}$ , 当采样频率为  $25\text{ FPS}$  时, 相邻帧深度值变化小于  $0.4\text{ m}$ 。将深度数据归一化后得深度图序列, 计算深度图变化率, 结果值远小于设定阈值  $T_1$ , 可以很好地排除纵向运动物体的干扰。

(2) 物体横向位移的影响:当物体产生横向位移时, 物体本身到探测器的距离变化和纵向位移类似。但是运动物体边缘像素点的横向位移会造成背景的遮挡和显露现象, 导致边缘点的深度值发生较大变化, 可能会被误识别为火焰。背景(如远处的墙面等)与物体边缘点的深度值差距越大该现象越显著。图1为背景与行人距离  $3\text{ m}$  和  $5\text{ m}$  时的深度图和识别结果图, 可以看到用深度变化率算法得到的  $5\text{ m}$  的结果图显现出了运动物体轮廓。

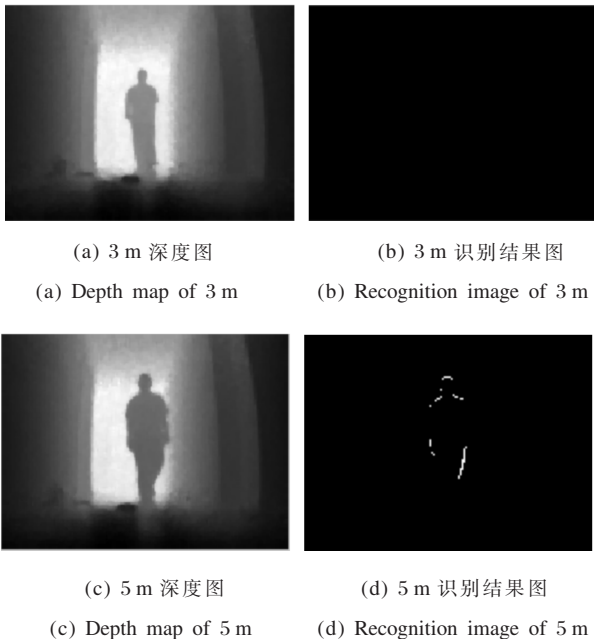


图1 背景与运动物体不同距离时的识别结果比较  
Fig.1 Recognition results of depth maps with different distances between background and moving object

文中将当前帧和上一帧深度值较大者与背景的深度值进行比较, 判断是否存在背景的遮挡和显露现象。当空间点  $(x,y)$  的  $D_n(x,y)$  大于阈值, 即该点被判断为疑似火焰后, 如果当前帧和背景的深度值一样, 认为该点是新显露出的背景; 如果上一帧和背景的深度值一样, 认为是背景被有横向位移的物体覆盖。同 1.1 节考虑 TOF 相机的测量误差, 仍采用深度变化率的形式。结合公式(1), 若前后两帧的变化率大于阈值, 但与背景差分的变化率小于阈值时, 认为该点为运动物体边缘像素点。只有当相邻帧深度变化率, 以及与背景差分变化率均超过阈值时才认为是火焰像素点。为排除运动物体边缘像素点深度变化的干扰, 改进后的算法如下:

$$DB_n(x,y)=\frac{|\max[f_n(x,y), f_{n-1}(x,y)]-B(x,y)|}{B(x,y)} \quad (8)$$

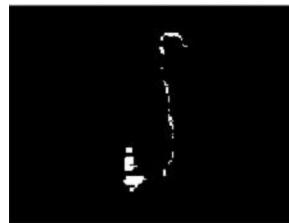
$$\text{flame}_n(x,y)=\begin{cases} 1 & \text{如果 } D_n(x,y)\geq T_1 \ \& \ DB_n(x,y)\geq T_2 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $B$  为背景的深度图像;  $DB_n(x,y)$  为空间  $(x,y)$  处当前帧或上一帧与背景的深度变化率。该算法可以有效地去除误识别的运动物体的边缘像素点, 如图 2 所示。仍用 1.1 节提到的最小  $1/2$  抽样方法确定阈值。

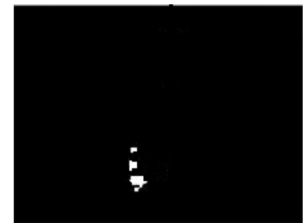


(a) 火焰+运动物体深度图

(a) Depth map of flame and moving object



(b) 公式(2)得到的识别图



(c) 公式(3)得到的识别图

(b) Recognition image using Eq.(2) (c) Recognition image using Eq.(3)

图2 两种方法的识别结果图比较

Fig.2 Recognition results of two methods

至此提出了完整的基于深度图像变化率的火焰识别算法, 如图 3 所示, 主要步骤如下: (1) 利用 TOF

相机测量各点深度,转化为深度图;(2)用公式(3)~(4)计算深度图序列中相邻帧的深度变化率,确定疑似火焰区域;(3)排除运动物体干扰,用公式(8)~(9)计算疑似火焰区域与对应背景区域的变化率,确定火焰区域,图像二值化。(4)经数学形态学后处理,得到识别结果图。

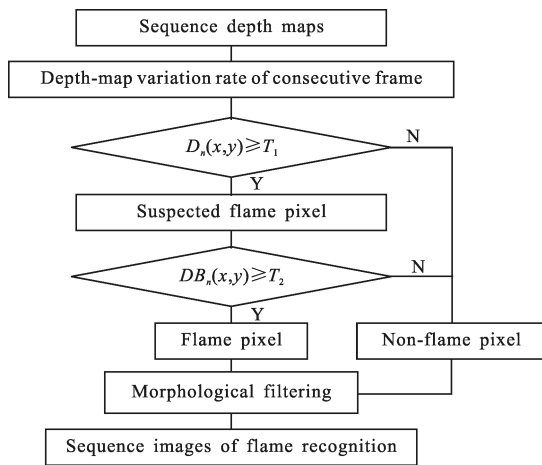


图 3 基于深度图像变化率的火焰识别算法流程图  
Fig.3 Flow chart of fire flame identification algorithm based on variation rate of depth map

## 2 实验及结果分析

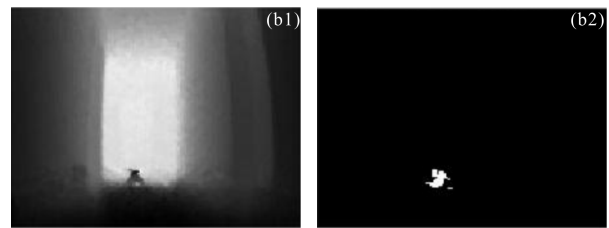
文中深度图像采集的三维测距相机为 D-Imager EKL3104。其分辨率为 160×120,测量范围为 1.2~9m,光发射器的红外波长为 850 nm,文中实验设置的图像采集帧率为 25 帧/s。在白天室内的光照条件下,进行了多组火焰探测实验。第一组为改变火源距离的正庚烷火焰识别实验,火焰与探测器的距离分别为 2 m、3 m、4 m、5 m 和 6 m。第二组为不同火源等距离(3 m)的火焰识别实验,包括正庚烷火、乙醇火、纸张火。以上实验燃烧盘尺寸为 10 cm×10 cm×1 cm,正庚烷和乙醇的用量为 50 ml。第三组为无火焰的对照实验,包括仅拍摄背景、拍摄运动的行人、闪烁并且移动的荧光灯。

### 2.1 火焰识别率分析

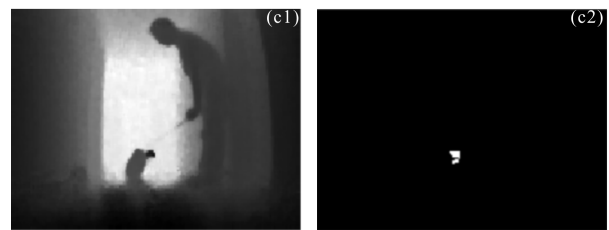
利用 TOF 深度变化率算法处理图像序列中的相邻帧深度图,得到火焰识别结果图,图 4 为实验中典型的深度图及识别结果图。正庚烷火焰的识别结果图中背景物体以及运动的人像被去除,仅留下火焰区域,如图 4(a)所示。图 4(b)、4(c)为 3 m 处的乙醇



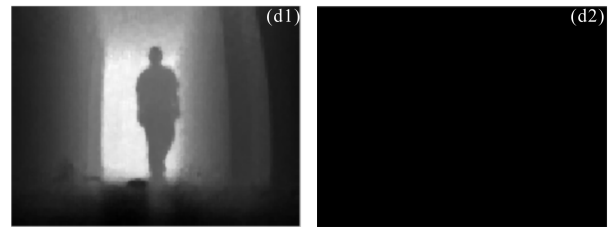
(a) 正庚烷火焰相邻帧深度图及识别图  
(a) Consecutive depth maps and recognition image of n-heptane flame



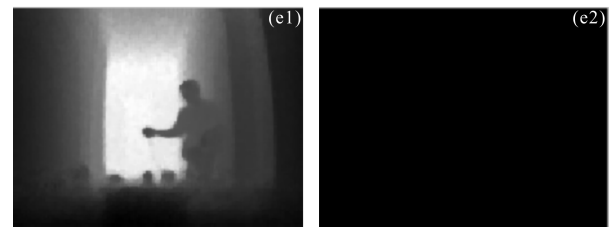
(b) 乙醇火的深度图及识别图  
(b) Depth map and recognition image of alcohol flame



(c) 纸张火的深度图及识别图  
(c) Depth map and recognition image of paper flame



(d) 运动人体的深度图及识别图  
(d) Depth map and recognition image of moving people



(e) 运动且闪烁灯光的深度图及识别图  
(e) Depth map and recognition image of flashing fluorescent lamp

图 4 典型的火焰识别结果图

Fig.4 Typical flame recognition results

和纸张火焰,现场实际的火焰比正庚烷的小,因此识



别出来的火焰面积也相应较小。图 4(d)中运动物体未被识别。图 4(e)中的人手中拿着闪烁的荧光灯,并且前后左右移动。

同理用深度图像变化率算法处理余下的深度图,处理结果以及火焰识别率如表 1 所示。每组实验的深度图总帧数为 TF(total frames);实际有火焰存在的帧数为 RFF (real flame frames);误识别帧数为 FRFF(false recognition frames)。正确识别的帧数(correct recognition frames of flame, CRFF) 是指拍摄图像时有火焰存在, 并且该帧图像被判断为火焰的图像帧数。识准率(correct recognition rate, CRR)为 CRFF 与 RFF 之比;误识率(false recognition rate, FRR)为 FRFF 与 TF 之比。大部分燃烧实验的识准率超过 95%,乙醇火焰和远距离的正庚烷火焰识准率略低, 可能是由于火焰区域占整幅图像的比重较小。运动的人误识率为 3.8%,灯光误识率为 3.2%,较好地排除了运动物体和荧光灯的干扰。

表 1 图像序列帧数及火焰识别率表

Tab.1 Frames of image sequences and recognition rate

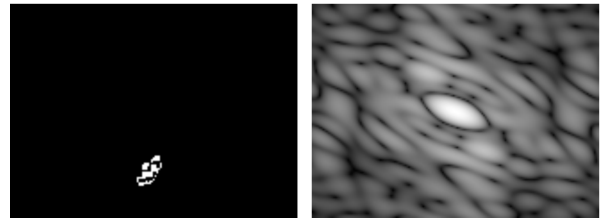
Flame recognition tests	Distance /m	TF	RFF	CRFF	FRFF	CRR	FRR
n-heptane fire	2	1 000	997	997	0	100%	0
	3	1 000	997	970	0	97.3%	0
	4	1 000	901	896	2	99.4%	0.2%
	5	1 000	899	897	0	99.8%	0
	6	1 000	922	844	6	91.5%	0.6%
Alcohol fire	3	1 000	904	828	0	91.6%	0
Paper fire	3	1 000	719	689	2	95.8%	0.2%
Moving people	1.2~7	400	-	-	15	-	3.8%
Fluorescent lamp	3	1 000	-	-	32	-	3.2%

## 2.2 火焰深度图特征分析

### (1) 图像集中度特性

如果仅用公式(4)算法处理火焰和运动物体的深

度图,运动物体常常会被误识别。以正庚烷火焰和行人实验为例,经快速傅里叶变换和视觉增强后的频谱图如图 5 所示。正庚烷火焰变换后的图像中心有一明显光斑。与火焰区域比较集中的像素点分布不同,运动物体为轮廓细线,因此频谱图上主要频率成分为细长的线条。

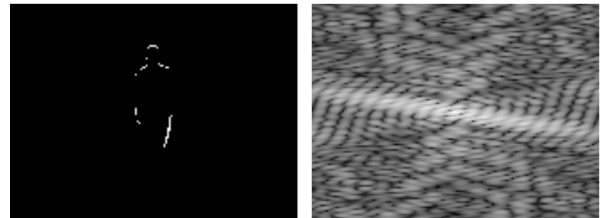


(a) 火焰识别图

(b) 图 5(a)的频谱图

(a) Recognition image of flame

(b) Spectrogram of fig.5(a)



(c) 行人干扰识别图

(d) 图 5(c)的频谱图

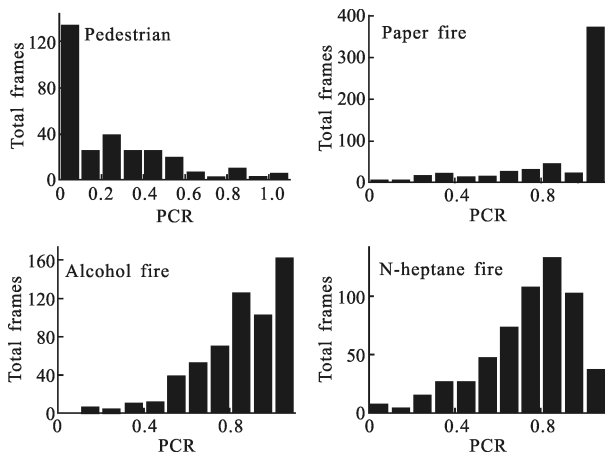
(c) Recognition image of pedestrian (d) Spectrogram of fig.5(c)

图 5 公式(4)算法得到的火焰与运动物体频谱图的比较

Fig.5 Spectrograms of recognition images of flame and pedestrian using Eq. (4)

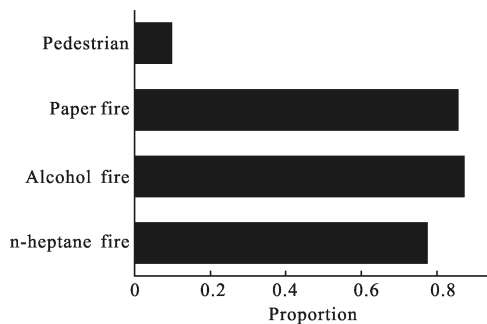
从图中可以发现运动物体与火焰区域的像素点的集中程度差别较大,以图像质心为中心,取一个矩形,面积等于疑似火焰面积的 4 倍,图像集中度等于落在该矩形中的疑似火焰像素点个数与疑似火焰像素点总数的比值,结果取值范围为 0~1。用公式(10)定义识别图像的集中度(pixels concentration ratio, PCR),  $pnum_r$  为矩形中疑似火焰像素点个数,  $pnum_{total}$  为疑似火焰像素点总数。计算仅用公式(4)的情况下正庚烷火、乙醇火、纸张火和行人干扰实验的识别结果图序列,图 6(a)为它们的图像集中度的直方图。可以发现火焰图像的集中度较高,集中度值大于 0.6 的图像数占总帧数的 70%以上,而运动物体图像的集中度偏低,数值大于 0.6 仅有 10%,如图 6(b)所示。因此图像集中度特征可以作为区分火焰和运动物体的辅助判据。

$$PCR = pnum_r / pnum_{total} \quad (10)$$



(a) 图像序列集中度的直方图

(a) Histograms of pixels concentration ratio of image sequences



(b) 图像集中度大于 0.6 帧数与总帧数之比

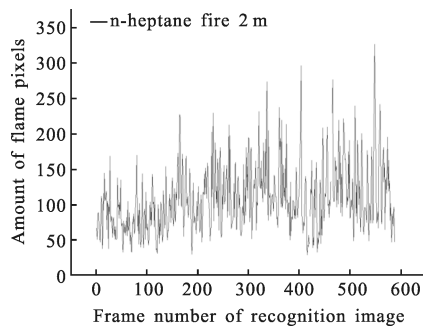
(b) Proportion of frames(PCR>0.6) in the total frames

图 6 图像序列集中度特性图

Fig.6 Character figures of PCR of image sequences

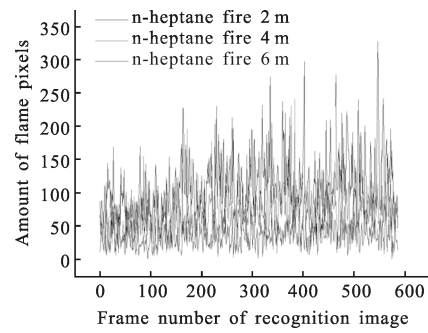
(2) 图像面积变化特性

以正庚烷燃烧火焰的识别结果图为例，提取其火焰面积。从识别出火焰的时刻开始统计，得到在改变火源距离情况下的火焰面积变化趋势。正庚烷燃烧初期，火焰面积不断震荡，整体趋势逐渐增大，如图 7(a)所示。随着距离的增加，火焰面积曲线具有相似的震荡规律，如图 7(b)所示。



(a) 2 m 远处火焰面积

(a) Flame area(distance 2 m)



(b) 2 m, 4 m, 6 m 远处火焰面积

(b) Flame area (distance 2 m, 4 m, 6 m)

图 7 火焰面积变化曲线图

Fig.7 Flame area plot of different distances

3 结论

根据飞行时间深度图，设计了一种对火焰图像识别的深度图像变化率算法，建立了火焰像素估计模型。研究表明，飞行时间深度图像变化率算法具有良好的识别效果，实验识准率大于 91.5%，误识率小于 3.8%。该算法简单并且对运动物体和灯光具有较强的抗干扰性。不足之处在于深度相机的分辨率和有效范围较小，但随着这种新型的视觉硬件设备的发展，基于 TOF 深度图像的火焰识别方法有望推广为新型高效的火灾探测方法。

参考文献：

- [1] Celik T, Demirel H, Ozkaramanli H, et al. Fire detection in video sequences using statistical color model[C]//ICASSP, 2006, 2: 213-216.
- [2] Chen Zhibin, Hu Longhua, Huo Ran, et al. Flame height characteristics based on image luminance [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2008, 14(6): 557-561. (in Chinese)
- [3] Wu Longbiao, Song Weiguo, Lu Jiecheng. A new fire recognition method in image fire monitoring [J]. *Fire Safety Science*, 1997, 6(2): 60-66. (in Chinese)
- [4] Wang Junming, Yang Yongyue, Fu Guiquan. Research of multi-recognition fire image detecting system [J]. *Industrial Control Computer*, 2008(2): 50-51. (in Chinese)
- [5] Ringbeck T, Hagebeuker B. A 3D time of flight camera for object detection [C]//Proceedings of the Optical 3 -D Measurement Techniques Conference VIII, 2007.
- [6] Kolb A, Barth E, Koch R, et al. Time-of-flight sensors in

- computer graphics [C]//Proc Eurographics (State-of-the-Art Report), 2009: 119–134.
- [7] Verstockt S, Vanoosthuysen A, Van Hoecke S, et al. Multi-sensor fire detection by fusing visual and non-visual flame features[M]//Image and Signal Processing. Berlin Heidelberg: Springer, 2010: 333–341.
- [8] Verstockt S, Van Hoecke S, De Potter P, et al. Multi-modal time-of-flight based fire detection [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2013: 1–26.
- [9] Cai Xiping, Li Huimin, Liu Jianbo, et al. Overview of active optical three-dimensional imaging technology [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(1): 22–25. (in Chinese)
- [10] Oggier T, Kaufmann R, Lehmann M, et al. Novel pixel architecture with inherent background suppression for 3D time-of-flight imaging[C]//SPIE, 2005, 5665: 1–8.
- [11] Meier T, Ngun K N. Video segmentation for content-based coding [J]. *IEEE Trans On Circuits and Systems for Video Technology*, 1999, 9(8): 1190–1203.
- [12] Din Jinjin. Error analysis and compensation research of the TOF 3D camera [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2011.
- [13] Zhao Yanling, Zhang Zhichao, Gao Zhenming, et al. Simple and workable moving objects segmentation algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(6): 611–614. (in Chinese)