

文章编号: 2095-2163(2022)03-0113-05

中图分类号: TP391

文献标志码: A

基于多属性分类器融合的火焰检测算法

杨凯文, 李双群

(中电长城圣非凡信息系统有限公司, 北京 102209)

摘要: 火焰检测作为火灾事件自动识别的关键技术,其检测的准确性对于火灾的事先预防和快速响应尤为重要。然而,现有方法不能有效地利用火焰的综合属性给出令人满意的检测结果。本文设计了一种基于多属性的火焰检测算法,融合火焰的颜色和运动属性,提高了复杂监控视频中的火焰检测准确率。为了利用火焰的瞬时运动特性,设计了一个基于深度运动特征的运动熵描述符表示火焰的运动属性。最后,构建了一个火灾检测视频数据集,包含371个有火和无火视频片段,其中的负样本非常具有挑战性。实验结果表明,本文方法得到了良好的火焰检测性能,检测准确度达91.18%,误报率仅为8.53%。

关键词: 火焰检测; 运动估计; 决策融合; 视频监控

Fire Detection Algorithm based on Fusion of Multi-attribute Classifiers

YANG Kaiwen, LI Shuangqun

(China Electronic Greatwall Shengfeifan Information System Co., Ltd, Beijing 102209, China)

[Abstract] Fire detection, as a key technology for automatic identification of fire events, has attracted many researchers' focuses, and its detection accuracy is particularly important for fire prevention and rapid response. However, the existing methods cannot effectively exploit the comprehensive attribute of fire to give satisfying accuracy. In this paper, we design a multi-attribute based fire detection algorithm which combines the fire's color and motion attributes to accurately detect the fire in complicated surveillance videos. In order to utilize fire's instantaneous motion character, a motion entropy descriptor based on deep motion features is designed to represent the motion properties of flames. Finally, a fire detection video dataset is constructed, containing 371 fire and non-fire video clips, in which the negative samples are very challenging. Experimental results demonstrate that the proposed approach achieves the best fire detection performance, with the detection accuracy of 91.18% and the false positive of only 8.53%.

[Key words] fire detection; motion estimation; decision fusion; video surveillance

0 引言

随着社会的不断进步、城市规模的扩大以及人口密度的增加,火灾作为世界上危害最大的灾害之一,严重威胁着人类的生命财产安全。近年来,中国发生了很多重大火灾,主要集中在人员密集场所、森林、仓库、高大建筑物内等,造成了极大的人员和经济损失,社会影响也越来越大。因此,火灾自动检测显得尤为重要。基于视频监控的火焰检测作为火灾自动检测的核心技术,其检测准确性对于火灾的事先预防和快速响应尤为重要。然而,视频监控场景中的火焰检测仍然存在以下问题:

(1)许多物体与火焰具有相似的外观,例如阳光、人造灯光、光反射现象、移动的红色目标,这些物体经常被误判为火焰;

(2)很难对视频监控中火焰的随机运动、外观多变等复杂性质进行建模,但这些因素对于火焰检测准确率产生着直接影响。

针对上述问题,现有火焰检测研究还无法达到令人满意的结果,火焰检测准确率依然不能满足应用需要。由于现有的相关研究主要依靠颜色和形状变化检测视频中的火焰,对火焰亮度、燃烧物质和天气条件等因素变化非常敏感,很难准确地区分火焰和红色物体。虽然运动属性已经被用于检测火焰,但火焰随机多变的运动,很难被准确地描述。

本文利用火焰深度特征,对火焰的运动属性进行建模,结合火焰颜色和运动属性的互补特性,设计了一种基于多属性分类器融合的火焰检测方法,用于准确的检测森林、室内、室外环境监控视频中的火焰,提高火焰检测准确率。首先,提取火焰YUV颜色空间属性,构建颜色属性分类器,该分类器受火焰亮度变化影响较小;接着,为了准确描述火焰的随机多变的运动特性,提出了一种运动熵描述符,运动熵描述符可以使用低维度特征向量有效的描述火焰的瞬时运动信息和内部及边界运动信息,采用词袋模型表示运动目标的有效运动信息;最后,在火焰检测

作者简介: 杨凯文(1982-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:智能控制技术、通信信息系统;李双群(1977-),男,博士,副教授,主要研究方向:大数据、人工智能、计算机视觉。

收稿日期: 2022-01-07

哈尔滨工业大学主办 ◆ 系统开发与应用

数据集(186 有火视频片段和 185 个无火视频片段)上的实验表明,本文方法取得了很好的检测准确性。

本文主要贡献为:

(1)设计了一个火焰检测方法,结合了火焰颜色和运动属性的互补特性,在监控视频中获得了准确的火焰检测结果;

(2)提出了运动熵描述符用于表示火焰的运动信息,综合描述火焰的瞬时运动和内部及边界运动信息;

(3)收集了一个更广泛和更具挑战性的火焰检测数据集,综合评估本文方法良好的火焰检测性能。

1 相关研究

目前,火焰检测技术已引起学术界、工业界的广泛关注。根据使用的特征类型,现有研究大致分为基于颜色属性的检测技术和基于运动属性的检测技术。

1.1 基于颜色属性检测技术

常见可燃物(例如:木材、织物等)燃烧产生的火焰具有相似的颜色,采用基于颜色属性的方法可以准确地检测火焰。例如:龙凯等人^[1]利用火焰颜色与火焰光谱的关系研究影响火焰颜色的因素,并通过燃烧甲烷进行验证;Celik 等人^[2]采用 YUV 颜色空间描述火焰颜色,并在 YUV 空间中定义了 6 个规则,将火焰的亮度与色度分开,有效地缓解了火焰亮度变化导致检测准确率降低的问题。本文采用 YUV 空间下的 6 种不同规则的组合来识别火焰颜

色。除了光线和背景干扰外,不同材料可燃物燃烧产生的火焰颜色差别很大。如:汽油、庚烷等火焰颜色均接近白色。因此,仅仅使用颜色属性无法准确地检测复杂环境下的火灾事件。

1.2 基于运动属性检测技术

此前,研究者们已经提出了一些运动描述符来表示火焰的运动特性。如,Foggia 等人^[3]提出了一个基于词袋模型描述符,来表示火焰运动信息;张驰等人^[4]基于支持向量机,将火焰的局部二值模式纹理和边缘相似度特征进行融合并用于火焰检测;Xie 等人^[5]同时利用火焰运动闪烁的动态特征和深度静态特征,对视频中的火焰进行检测。与上述方法不同,本文提出了一种新型运动属性描述符—加权归一化运动熵,来表示火焰的内部运动和边界运动,具有描述准确、特征维度低等优势。

2 多属性分类器融合识别方法

本文设计的多属性分类器融合的火焰检测算法框架如图 1 所示。该算法采用自适应混合高斯模型(GMM)^[6],对监控视频背景进行建模,并使用背景差分算法提取监控视频中的运动物体;使用形态学方法消除噪声,将运动物体对应的区域标记为候选目标;引入基于颜色、运动属性的两种分类器,分别对候选目标进行分类;最后,使用权重投票机制,融合两种分类器得到最终检测结果。

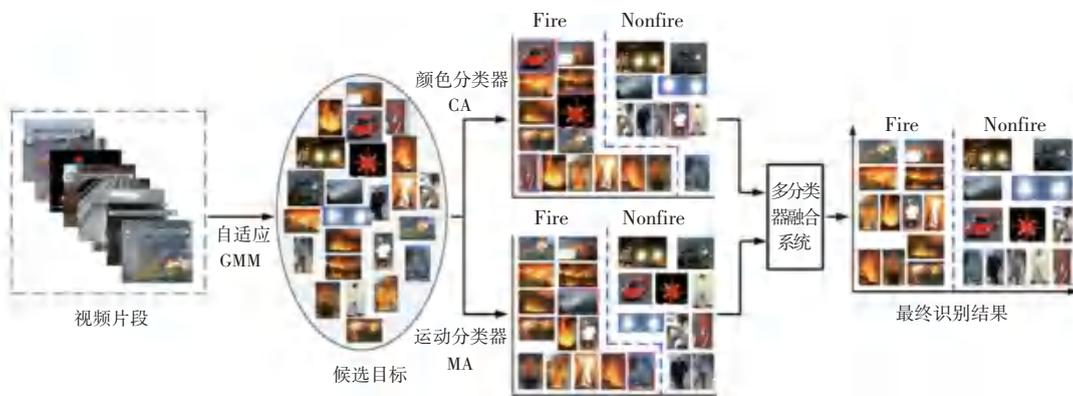


图 1 本文方法概述图

Fig. 1 Overview of the proposed method

2.1 基于颜色属性分类器

由于 YUV 颜色空间分离了亮度与色度,亮度变化对色度影响很小。为了准确地表示火焰颜色,首先从 YUV 颜色空间提取火焰颜色属性,使用 6 条规则对火焰的颜色属性进行建模^[2]。6 条规则记为 r_1^c, \dots, r_6^c 。

规则中:对于火焰目标, r_1^c 表示红色通道的值大于绿色通道值; r_2^c 表示绿色通道值大于蓝色通道值;若火焰像素的红色通道值高于当前帧中像素红色通道的平均值,在 YUV 空间下,火焰像素在 Y 和 V 通道的值分别大于当前帧中像素 Y 和 V 通道的平均值(即 r_3^c 和 r_5^c); r_4^c 表示 U 通道的值小于

当前帧中像素 U 通道平均值; r_6^c 表明火焰像素在 U 和 V 通道值的差异较大。

基于颜色属性的分类器 C_{CA} 由 r_1^c, \dots, r_6^c 决定, 如公式(1):

$$C_{CA} = \begin{cases} F & \text{if } r_1^c \wedge r_2^c \wedge r_3^c \wedge r_4^c \wedge r_5^c \wedge r_6^c \\ \bar{F} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

若所有规则都满足, 则该候选目标被检测为火焰目标。

2.2 基于运动属性分类器

在监控视频中, 阳光、人造灯光等场景的颜色与火焰颜色相似, 且一些特殊材料(如: 汽油、庚烷等)燃烧产生的火焰颜色与常规材料燃烧的火焰颜色差别很大。因此, 仅仅使用颜色属性无法准确地检测复杂环境下的火灾事件。

由于自然环境、燃烧材料等因素影响, 火焰的运动具有随机性、复杂性和不可预测性等特点。而铰链型物体(如: 穿着红色衣服的人)、刚性物体(如: 红色交通工具)和人造灯光(如: 霓虹灯、车灯等)在一段时间内沿特定的方向进行移动, 其运动具有规律性、确定性。

为了有效区分火焰目标和非火目标, 本文提出了运动熵描述目标的运动信息, 可以有效区分目标的随机性运动和规律性运动。

2.2.1 目标运动特征提取

与 Foggia 方法不同, 本文使用高效准确的 FlowNet 2.0 光流模型^[7]来提取候选目标的运动特

征(深度特征), 进而计算候选目标中每个像素的运动幅度和方向。对于候选目标 i 在 t 帧的每个像素 (x, y) , 光流域表示为 $(u_t^i(x, y), v_t^i(x, y))$ 。其中, $u_t^i(x, y)$ 和 $v_t^i(x, y)$ 分别表示像素在水平方向和垂直方向上的运动速度, 光流域的大小与候选目标 i 相同。对于候选目标 i 在 t 帧的每个像素 (x, y) , 其幅度 $L_t^i(x, y)$ 和方向 $O_t^i(x, y)$ 可以通过以下公式计算得到:

$$L_t^i(x, y) = \sqrt{u_t^i(x, y)^2 + v_t^i(x, y)^2}$$

$$O_t^i(x, y) = \tan^{-1} \frac{\frac{\partial u_t^i(x, y)}{\partial x}}{\frac{\partial v_t^i(x, y)}{\partial y}} \quad (2)$$

2.2.2 运动属性分类器

2.2.2.1 运动属性描述子

为了有效区分候选目标的随机性运动和规则性运动, $O_t^i(x, y)$ 是通过运动特性判别火焰目标和非火目标的重要线索。本文将角度空间 $O_t^i(x, y)$ 平均划分成 $|S|$ 个角度区间(实验设置 $|S|$ 为 18), 每个角度区间覆盖 20° 的目标运动方向。为了获得两帧图像之间快速变化的有效像素, 使用一个与候选目标大小相同的自适应掩膜 $M_t^i(x, y)$, 来过滤候选目标 i 的无效像素点, 掩膜由 0 和 1(幅度大于平均值)构成。对于每个候选目标, 18 个角度区间的方向直方图, 是通过计算每个角度区间有效像素的总数得到, 记为 $H_t^i(k)$, $k = 1, \dots, |S|$, 用于描述目标的运动属性。不同运动目标的运动属性如图 2 所示。

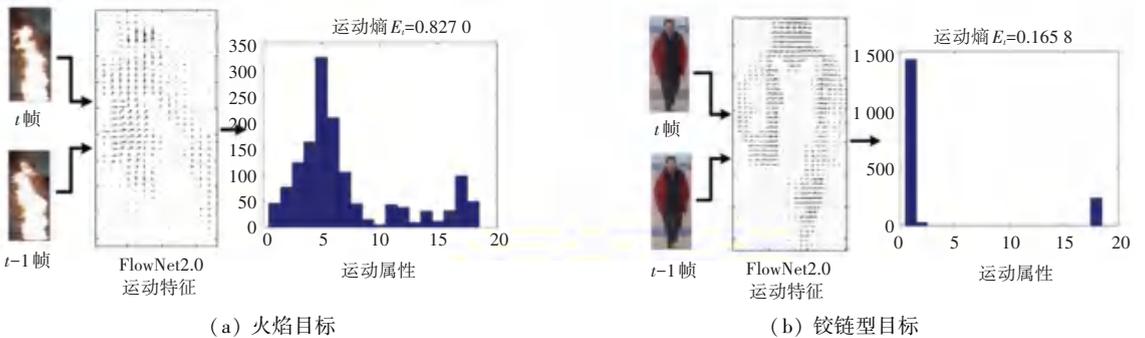


图 2 不同运动目标的运动属性

Fig. 2 Motion attributes of different moving objects

2.2.2.2 分类器

火焰的运动是随机的、杂乱的不规则运动, 在火焰区域周围和内部蔓延, 其运动方向直方图是分散的, 运动熵值较大(如图 2(a))。与火焰运动不同, 铰链型目标的运动是有规律的, 其运动方向直方图集中在少数角度区间内, 运动熵值很小, 刚性目标也是如此(如图 2(b))。基于上述观察, 提出了运动

熵 E 来表示方向直方图的同质程度, 通过运动熵值的大小来区分规律运动和不规则运动。对于 t 帧中的候选对象 i , 其运动熵 E_t^i 定义为:

$$E_t^i = - \frac{N_t^i}{A_t^i} \frac{1}{\log_2 |S|} \sum_{k=1}^{|S|} \frac{\partial H_t^i(k)}{e} \cdot \log_2 \frac{\partial H_t^i(k)}{e} \frac{\partial \partial}{N_t^i} \frac{\partial \partial}{\partial \partial} \quad (3)$$

其中: $N_t^i = \sum_{k=1}^{|S|} H_t^i(k)$, 表示目标 i 中有效像素的

总数; A_i^i 代表目标 i 的面积; $\frac{N_i^i}{A_i^i}$ 可以提高火焰的运动熵、降低非火焰对象的运动熵。

如图 2(a) 所示, 由于火焰的运动方向直方图是分散的, 其运动熵值较大; 相反, 刚性目标或铰链型目标的方向直方图是集成的, 其运动熵值较小, 如图 2(b) 所示。因此, 基于运动属性的分类器 C_{MA} 定义为:

$$C_{MA} = \begin{cases} F & \text{if } \tau_{\min} < E_t^i < \tau_{\max} \\ \bar{F} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

实验中, τ_{\min} 和 τ_{\max} 分别设置为 0.6 和 0.95。由于 τ_{\max} 用来过滤具有闪烁特性的移动目标(如车灯、霓虹灯等), 其运动具有很强的规律性且运动方向平均分布在各个角度区间中, 运动熵值接近于 1。

2.3 多属性分类器融合系统

本文采用加权投票方式, 融合颜色属性、运动属性分类器, 属于决策层信息融合方法^[8], 具有高灵活性、强抗干扰性、良好的容错性等优点。文献[9-10]研究表明, 多属性分类器融合系统是最鲁棒的融合方式之一。

对于第 k 个分类器, $k \in \{C_{CA}, C_{MA}\}$, 候选目标 i 属于类别 $c_k(i)$, 类别 $m \in \{F, \bar{F}\}$ 的投票可通过公式(5)进行计算:

$$\delta_{mk}(i) = \begin{cases} 1 & c_k(i) = m \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

权重 ω_k 通过贝叶斯公式动态估算, 以获得最高的识别率。若给定第 k 个分类器的分类矩阵 $C^{(k)}$, 类别 m 的权重 $\omega_k(m)$ 通过公式(6)进行计算:

$$\omega_k(m) = P(i \in m \mid c_k(i) = m) = \frac{C_{mm}^{(k)}}{\sum_{r=1}^M C_{rm}^{(k)}} \quad (6)$$

其中, m 为类别的数量。

最终分类结果通过最大化多分类器, 在识别一个特定类的可信度得到。候选目标 i 属于类别 m 的可信度 $\psi(m)$, 通过加权投票计算得到:

$$\psi(m) = \frac{\sum_{k \in \{CA, GA, MA\}} \delta_{mk}(i) \cdot \omega_k(m)}{\sum_{k \in \{CA, GA, MA\}} \omega_k(m)} \quad (7)$$

3 实例验证

3.1 数据集

为了评价本文提出算法的性能, 建立了一个火焰检测数据集。火焰检测数据集中收集了 186 个有火视频片段和 185 个无火视频片段。由 47 个森林

场景、129 个室内场景和 195 个室外场景组成。其中包含了 155 个非常具有挑战性的负样本。如车灯、霓虹灯、光线变化及反射、移动的烟雾、穿红色衣服的人、红色车辆等。

数据集被随机划分成两个部分: 80% 作为训练集, 20% 作为测试集, 使用准确率、误检率(FPR)、漏检率(FNR)评价所提方法的性能。

3.2 实验结果分析

表 1 中, 与运动估计方法(ME)^[3] 相比, 本文提出的运动属性分类器(MA)可以通过使用目标内部运动信息和边界运动信息显著提高火焰检测性能。其原因是: ME 方法使用 SIFT 特征^[11] 匹配来计算运动信息, 但很难在火焰上提取到准确的 SIFT 匹配点, 本文提出的运动熵, 使用深度运动特征计算目标的运动信息, 能够准确地、区分性地描述目标的随机性运动和规律性运动。最后, 使用加权投票规则, 融合颜色属性和运动属性进行火焰检测, 得到了最高准确率(91.18%), 高于 Foggia 方法将近 1.25 个百分点。

通过实验可知, 颜色属性对于火焰检测仍然是最重要的属性(见表 1)。但是, 如果只使用颜色属性来检测火焰, 在某些特殊情况下不能正确区分火焰和非火目标。因此, 在这些特殊情况下, 通过融合运动属性可以得到正确的检测结果。如图 3 中的前两行所示, Foggia 方法得到了错误的检测结果, 而本文方法通过融合颜色属性和运动属性, 可以正确区分火焰和非火对象; 图 3 中的后两行属于常规材料燃烧产生的火焰, 本文方法和 Foggia 方法都得到了正确的检测结果。因此, 运动属性能够减少由颜色属性引入的误报(既可以过滤掉穿红色衣服的人、红色车辆、车灯、霓虹灯等带来的误报), 同时也能正确识别由特殊材质(如: 汽油、庚烷等)燃烧产生的火焰。

表 1 火焰检测结果对比

Tab. 1 Comparison of the fire detection results

方法类型	分类器融合	准确率 Accuracy / %	误检率 FPR / %	漏检率 FNR / %
单分类器	CA ^[2]	84.73	17.45	15.19
	ME ^[3]	66.13	41.95	14.67
	MA	78.22	43.15	1.08
融合分类器	CA+ME ^[3]	89.18	13.09	9.10
	Foggia 方法 ^[3]	89.93	11.71	9.12
	CA+MA(所提方法)	91.18	8.53	9.10

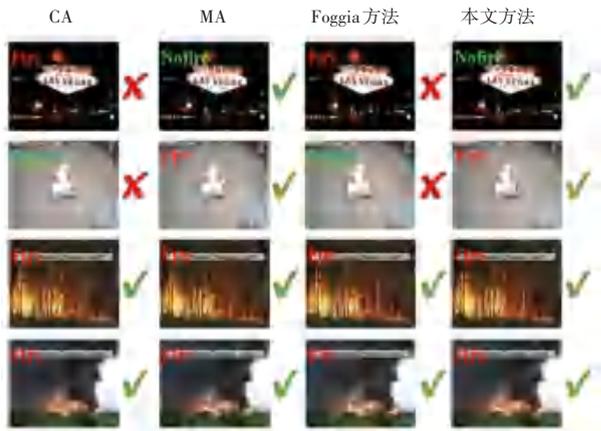


图3 不同方法火焰检测结果的典型示例

Fig. 3 Examples of fire detection results from different methods

4 结束语

本文设计了一种基于多属性分类器融合的火焰检测方法,提出了运动熵描述符用于表示火焰的运动信息,结合火焰颜色和运动属性的互补特性,提高火焰检测算法的准确率。此外,还建立了一个更广泛和更具挑战性的火焰检测数据集,用于评估本文提出的方法。实验结果表明,本文方法得到了良好的火焰检测性能。在未来研究工作中,将尝试利用深度学习表示火焰运动属性,以进一步提高火焰检测准确率。

(上接第112页)

速度快,性能可满足制动电阻正常工作对风机的使用要求。温度控制器在PID算法基础上通过模糊算法在线整定PID参数的方式使温度控制器减小超调量,鲁棒性提高,自适应能量增强。制动电阻风机通过温度实时监测的方式调整运转功率,既能满足散热需求,又能降低风机功耗和噪声,采用上述方法能使制动电阻适应大规模再生制动过程的多变工况下实现节能要求。

参考文献

- [1] ÁLVARO J. LÓPEZ-LÓPEZ, RAMÓN R. Pecharromán, Antonio Fernández-Cardador, A. Paloma Cucala. Assessment of energy-saving techniques in direct-current-electrified mass transit systems [J]. *Transportation Research Part C*, 2014, 38.
- [2] 张哲. 地铁牵引电传动系统与其控制技术[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [3] 张治国, 黄金桥, 王茹玉. 城市轨道交通车辆制动方式综述[J].

参考文献

- [1] 龙凯, 杨健晨. 基于成像颜色校正的机器视觉测量甲烷预混火焰当量比的方法研究[J]. *智能计算机与应用*, 2020, 10(3): 288-293.
- [2] Turgay Celik, Hasan Demirel. Fire detection in video sequences using a generic color model [J]. *Fire Safety Journal*, 2009, 44(2): 147-158.
- [3] Pasquale Foggia, Alessia Saggese, and Mario Vento. Real-time fire detection for video-surveillance applications using a combination of experts based on color, shape, and motion [J]. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Techn.*, 2015, 25(9): 1545-1556.
- [4] 张驰, 孟庆浩, 井涛. 基于改进GMM和多特征融合的视频火焰检测算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(4): 128-137.
- [5] XIE Yakun, ZHU Jun, CAO Yungang, et al. Efficient Video Fire Detection Exploiting Motion-Flicker-Based Dynamic Features and Deep Static Features [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 81904-81917.
- [6] 宋少杰. 基于GMM改进算法的森林火灾检测研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2021.
- [7] Eddy Ilg, Nikolaus Mayer, Tommo Saikia, et al. Alexey Dosovitskiy and Thomas Brox. FlowNet 2.0: Evolution of Optical Flow Estimation with Deep Networks [C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2017: 1647-1655.
- [8] 李洋, 赵鸣, 徐梦瑶, 等. 多源信息融合技术研究综述[J]. *智能计算机与应用*, 2019, 9(5): 186-189.
- [9] Josef Kittler. Combining classifiers: A theoretical framework [J]. *Pattern Anal. Appl.*, 1998, 1(1): 18-27.
- [10] CHU Lingyang, ZHANG Yanyan, LI Guorong, et al. Effective Multimodality Fusion Framework for Cross-Media Topic Detection [J]. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, 2016, 26(3): 556-569.
- [11] David G. Lowe. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110.

企业技术开发, 2015, 34(16): 64-65, 85.

- [4] 曾平利. 城市轨道交通运输计划编制方法研究[J]. *铁路技术创新*, 2017(3): 18-24.
- [5] 杨俭, 李发扬, 宋瑞刚, 等. 城市轨道交通车辆制动能量回收技术现状及研究进展[J]. *铁道学报*, 2011(2): 26-33.
- [6] 吕华林. 异步电机矢量控制变频调速系统的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [7] 伏哲东. 基于MATLAB的异步电机变频调速系统的仿真与分析[J]. *科技创新与应用*, 2020, 302(10): 22-23.
- [8] 李素敏, 滕俊杰. 基于改进PID算法的镀铬槽液温度控制系统设计[J]. *电气传动*, 2019, 359(9): 66-69.
- [9] CHEN Xiangjian, LI Di, BAI Yue, et al. Modeling and Neuro-Fuzzy adaptive attitude control for Eight-Rotor MAV [J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2011, 9(6): 1.
- [10] 陈穗九. 地铁列车制动电阻设置的探讨[J]. *都市轨道交通*, 2009, 22(2): 47-51.
- [11] 基于模糊自适应PID的储能电池集装箱温度控制[J]. *自动化技术与应用*, 2020, 39(5): 1-5.