

基于有限状态自动机的人眼开度 PERCLOS 实现算法*

巩晓倩, 蒲亦非, 杨智勇, 周激流

(四川大学 计算机学院, 成都 610065)

摘要: 针对驾驶员驾驶过程中因疲劳引起的眼睛开度变化问题,在原有 PERCLOS (percentage of eyelid closure over the pupil over time) 标准的基础上,提出了一种基于有限状态自动机的人眼开度 PERCLOS 计算方法,并将其应用到疲劳驾驶预警系统中。该系统首先采用红外摄像头实时获取驾驶员的脸部视频图像,使用 ASM (active shape models) 算法进行人脸检测,在定位到的人脸范围内搜索人眼区域并计算人眼开度,为了避免人与摄像头距离变化影响计算结果,对人眼开度进行归一化处理;然后依据建立的有限状态自动机模型计算 PERCLOS 值;最后根据制定的预警机制实现基于人眼开度的疲劳预警。实验结果表明本方法能够实时监测驾驶员疲劳状况,具有对光照变化、脸部配饰不敏感的特点。

关键词: 人眼开度; 有限状态自动机; PERCLOS; ASM; 疲劳驾驶

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2014)01-0307-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2014.01.073

PERCLOS implementation computing method of eye open degree based on finite state machine

GONG Xiao-qian, PU Yi-fei, YANG Zhi-yong, ZHOU Ji-liu

(School of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: As for the drivers' eye open degree changing due to fatigue, this paper proposed a finite state machine based on PERCLOS algorithm and applied to pre-warning system of fatigue driving according to the original PERCLOS standards. Firstly, it used infrared camera to capture drivers' face in real time and detected face by ASM algorithm. To avoid the influence of the distance between man and camera, it normalized eye open degree when it was calculated. Then it obtained PERCLOS value by the proposed finite state machine based method. Finally, the eye open degree based system pre-warns the fatigue according to the established pre-warning mechanism. The experiment results show that this method can monitor drivers' fatigue status in real time and it is insensitive to light and drivers' accessories.

Key words: eye open degree; finite state machine; PERCLOS; ASM; fatigue driving

0 引言

疲劳驾驶是重大交通事故的主要诱因之一^[1-4]。近年随着汽车数量的增加和公路建设规模的扩大,疲劳驾驶引起的交通事故等问题日益突出,因此疲劳驾驶预警相关技术的研究有着重要的现实意义与应用价值。

驾驶员产生疲劳的主要表现有眨眼时眼睛闭合时间变长、打哈欠、注意力不集中、反应迟钝、心情急躁等,而眨眼时眼睛闭合时间变长为基于计算机视觉的疲劳驾驶预警提供了重要依据。Ueno 等人^[5-7]研究表明,PERCLOS 算法用于疲劳预警判断具有很高的准确性。PERCLOS 的原理就是利用单位时间内眼睛闭合时间所占比例来判定驾驶员的疲劳程度。

疲劳驾驶检测中眼睛状态检测的方法有多种。其中程如中

等人^[8]提出了基于正交最小二乘曲线拟合法计算上眼睑的弯曲程度来判断眼睛开闭的方法,该方法虽然精确,但其计算复杂效率偏低。Li 等人^[9]提出了通过检测到的人眼面积与最大张开度人眼面积的比值来判断人眼是否闭合的方法,该方法实际计算的面积是眼睛所在矩形的面积,计算精度不够高。文中利用 ASM 算法^[10]对人眼开度进行精确计算,根据人眼开度确定眼睛开闭状态,为获得准确的 PERCLOS 值奠定基础。该方法在完成人眼定位的同时即可根据人眼部位的特征点精确计算人眼开度,计算复杂度较低,为从 PC 移植到嵌入式开发奠定了基础,完成了从算法到系统的实用化的初步研究。

本文首先通过红外摄像头实时获取驾驶员脸部图像,利用 ASM 算法完成人脸检测与人眼定位,实时监测人眼开度,同时修正人与摄像头距离变化引起的人眼开度异常变化。之后根

收稿日期: 2013-03-04; **修回日期:** 2013-04-22 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60972131); 国家教育部回国人员科研启动基金资助项目(201111139); 四川省科技支撑计划资助项目(2011GZ0201); 法中科学与应用基金资助项目(FFCSA); 四川大学青年教师科研启动基金资助项目(2012SCU11036)

作者简介: 巩晓倩(1989-),女,河南驻马店人,硕士研究生,主要研究方向为分数阶微积分和数字图像处理;蒲亦非(1975-),男,四川成都人,副教授,主要研究方向为分数阶微积分在信号处理中的应用、模式识别、图像处理(puyifei_007@163.com);杨智勇(1988-),男,河南驻马店人,硕士研究生,主要研究方向为分数阶微积分和数字图像处理;周激流(1963-),男,四川成都人,教授,博导,主要研究方向为图像处理、人脸识别、无线网络、计算智能。

据眼睛的三种状态(完全睁开、半睁开、闭合)建立有限状态自动机模型,依据求得的人眼开度值及本文提出的有限状态自动机的 PERCLOS 实现算法计算单位时间内眼睛闭合时间所占比例,制定预警机制完成疲劳预警。该方法具有实时性、鲁棒性、准确性等特点,且易于推广。

1 基于人眼开度的驾驶员疲劳检测算法

1.1 人眼定位及人眼开度计算

利用 ASM 算法进行人脸检测及人眼定位时,应先建立目标形状模型与局部灰度图像模型。文中取不同肤色、不同年龄段、不同表情的 N 张人脸图像作为样本训练集,每张人脸取 57 个点作为控制形状的标定点,用第 $i(i=1,2,\dots,n)$ 幅图像中标定的每个特征点的横纵坐标来表示其形状向量 x_i :

$$x_i = (x_{i0}, y_{i0}, x_{i1}, y_{i1}, \dots, x_{ik}, y_{ik}, \dots, x_{in-1}, y_{in-1}) \quad (1)$$

对标定图像进行对齐操作,再利用主成分分析法进行数据降维,这样任意一个形状向量可近似地表示为

$$X = \bar{X} + Pb \quad (2)$$

其中: $\bar{X}$ 为平均形状; P 表示前 k 个最大特征值向量; b 是一个形状参数。

建立纹理信息灰度外观模型时,首先对每幅训练图像标定特征点处的法线方向,以标定的特征点为中心取一定数目(n_p)的像素点,将第 k 幅图像中的第 i 个特征点的灰度值表示成向量:

$$h_{ki} = (h_{ki0}, \dots, h_{ki(n_p-1)}) \quad (3)$$

求灰度沿法线方向的导数,对齐进行规格化处理得训练集中的 N 幅图像的平均:

$$\bar{g}_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N g_{ki} \quad (4)$$

其中: g_{ki} 表示对齐规格化处理后灰度沿法线方向的导数,计算其协方差矩阵得

$$C_i = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (g_{ki} - \bar{g}_i)(g_{ki} - \bar{g}_i)^T \quad (5)$$

则某一候选点对应的标准化灰度导数向量 g'_i 与平均标准化灰度导数向量的马氏距离可以表示为

$$d = (g'_i - \bar{g}_i)^T C_i^{-1} (g'_i - \bar{g}_i) \quad (6)$$

在目标搜索过程中就可以通过计算不同点的马氏距离来确定最佳候选点,定位人脸图像。图 1 为利用 ASM 算法在自然光照下定位到的带有标定点的人脸图像。

完成人脸定位后,再在定位到的人脸范围内搜索人眼,能提高算法运行效率。此后依据人眼上眼睑与下眼睑上标定的特征点来计算人眼开度。

在利用 ASM 算法进行人脸检测与人眼定位过程中发现,光照的变化严重影响到人脸与人眼的准确定位。考虑到驾驶会发生在夜间和不同的天气情况下,有必要减少不同情况下光线的影响,保障夜间和光照变化情况下都能准确识别,采用 850 nm 波长的近红外摄像头进行视频采集。白天不同的天气和时段光照变化的干扰会在一定程度上被滤除,只剩下特定频段的光线通过,提高了图像的稳定性;夜间驾驶时,车厢内外光线不足,驾驶员脸部没有光照,此时摄像头内的 LED(light emitting diode)白光补光灯可以自动补光,增加额外光源来照射成像,使全天候检测成为可能。

1.2 基于有限状态自动机的 PERCLOS 实现算法

人眼的准确定位是计算人眼开度的前提条件,人眼定位越

精准,求得的人眼开度的值也就越准确。基于 ASM 算法的人脸检测能够准确地检测到每帧图像中的人眼开度,为下文进行 PERCLOS 值的计算奠定了基础。

PERCLOS 是指眼睛闭合时间占某一特定时间的百分率。

PERCLOS 方法通常有三种标准:

a) P70。以眼睑遮住瞳孔的面积至少超过 70% 计为眼睛闭合,统计闭合时间的百分比作为标准。

b) P80。以眼睑遮住瞳孔的面积至少超过 80% 计为眼睛闭合,统计闭合时间的百分比作为标准。

c) EM。以眼睑遮住瞳孔的面积至少超过一半计为眼睛闭合,统计闭合时间的百分比作为标准。

David 等人研究表明,PERCLOS 方法的三种标准中 P80 的检测准确率最高,因此本文在进行疲劳判断时采用 PERCLOS P80 标准^[4]。其原理如图 2^[11] 所示。

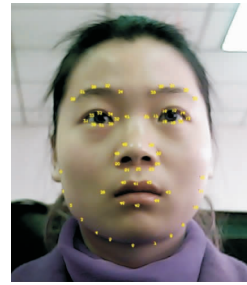


图 1 人脸定位图像

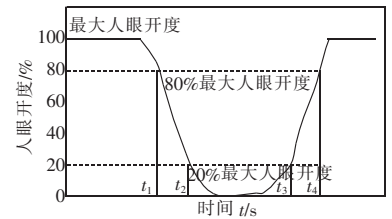


图 2 PERCLOS P80 标准的测量原理

只需测出 $t_1 \sim t_4$ 的值,就能计算出 PERCLOS 的值 f 。

$$f = \frac{t_3 - t_2}{t_4 - t_1} \times 100\% \quad (7)$$

其中: f 为眼睛闭合时间占某一特定时间的百分率,即 PERCLOS 值; t_1 是眼睛由睁开到闭合到眼睛最大开度 80% 的时刻; t_2 是眼睛由睁开到闭合到眼睛最大开度 20% 的时刻; t_3 是眼睛从闭合到睁开到眼睛最大开度 20% 的时刻; t_4 是眼睛从闭合到睁开到眼睛最大开度 80% 的时刻。

依据 PERCLOS 原理进行疲劳预警时,首先应该计算人眼的开度值,判断人眼的开闭状态,本文采用 ASM 算法进行人眼标定后,选取 ASM 模型中正对瞳孔处上眼睑与下眼睑处的标定点来计算人眼开度。而经过大量的实验发现,同一实验人员在眼睛开度一定的情况下,人眼与摄像头的距离越远测得的人眼开度越小,人眼与摄像头的距离越近,测得的人眼开度越大,这不利于后期 PERCLOS 的计算及预警判断。为此要归一化处理人眼与摄像头相对位置变化引起的人眼开度异常变化。利用 ASM 算法可以测得一个人的瞳距 l ,瞳距与眼睛开度的变化存在线性关系,假设实际测得的人眼开度为 h ,归一化后的人眼开度为 H ,利用式(8)进行人眼开度值修正:

$$H = \frac{h}{l} \times C \quad (8)$$

其中: C 表示选择的一个修正参数。

本文针对已有方法^[8,9] 计算复杂或精度不高的问题,提出了一种基于有限状态自动机的 PERCLOS 实现算法。具体实施步骤如下:前期依据测得的人眼开度值,求得人眼的最大张开度,记做 $\text{Max}W$,假设实验测得的人眼开度为 W 。其中状态 I 表示 $W > 80\% \text{Max}W$,此时眼睛为完全睁开状态;状态 II 表示 $20\% \text{Max}W < W \leq 80\% \text{Max}W$,眼睛为半睁开状态;状态 III 表示 $W \leq 20\% \text{Max}W$,眼睛为闭合状态。图 3 为前一帧图像人眼开度到后一帧图像人眼开度的状态转换图。

本文提出的有限状态自动机的基本思想是:假设前一帧图

像中测得的人眼开度为状态 I, 后一帧图像中测得的人眼开度为状态 II 或者为状态 III, 即眼睛由完全睁开状态到半张开状态或者闭合状态, 记为状态跳变 1; 前一帧图像中测得的人眼开度为状态 II, 后一帧图像中测得的人眼开度为状态 III, 即眼睛由半张开状态到完全闭合状态, 记为状态跳变 2; 前一帧图像中测得的人眼开度为状态 III, 后一帧图像中测得的人眼开度为状态 II, 即眼睛由完全闭合状态到半张开状态, 记为状态跳变 3; 前一帧图像中测得的人眼开度为状态 III 或者状态 II, 后一帧图像中测得的人眼开度为状态 I, 即眼睛由闭合状态或半张开状态到完全张开状态, 记为状态跳变 4。

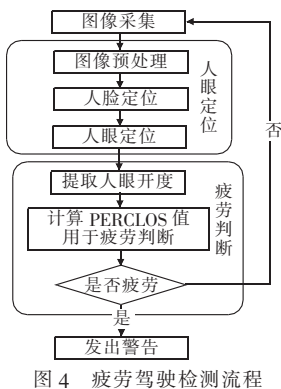
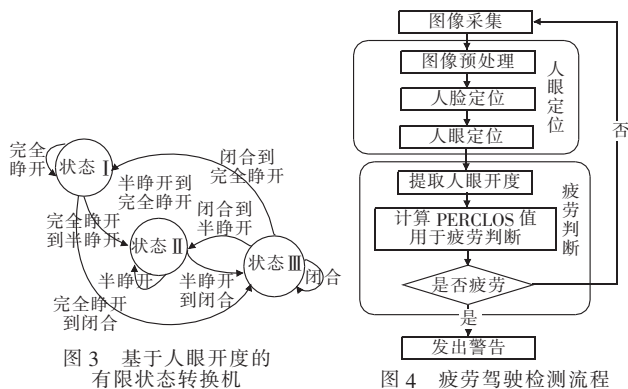
检测到一个由状态跳变 1 到状态跳变 4 的完整周期时, 统计该周期内人眼开度小于等于 80% 最大人眼开度的帧数, 记做 n , 同时统计该周期内人眼开度小于等于 20% 最大人眼开度的帧数, 记做 m , 即可得到 PERCLOS 值 f 。计算公式如下:

$$f = \frac{n}{m} \times 100\% \quad (9)$$

其中: f 越接近 1, 则代表驾驶员越接近疲劳状态。经过大量的实验可以得到一个实验阈值 T , 如果 $f > T$ 则表明该驾驶员处于疲劳状态, 以声音形式预警, 提醒驾驶员注意疲劳驾驶。

2 实验及结果分析

本文实现疲劳驾驶预警的算法流程如图 4 所示。



系统主要分为两个部分: 第一部分为人眼的定位与人眼开度计算, 采用 ASM 算法先粗定位出人的脸部图像, 再精确定位人眼图像, 得到人眼开度值; 第二部分为疲劳预警部分, 利用本文提出的基于有限状态自动机的 PERCLOS 算法计算 PERCLOS 值, 之后依据本文提出的疲劳判断机制进行疲劳预警。

在进行人脸检测与人眼定位时, 系统采用 850 nm 波长的近红外摄像头采集视频序列, 采样率为 25 fps, 视频大小为 320 × 240。使用 ASM 算法进行人脸检测, 如图 5 所示, 方框所示即为得到的红外人脸图像。



图 5 定位到的人脸图像

定位到人脸以后, 在人脸范围内精确定位人眼图像, 缩小在整幅图像中寻找人眼的时间, 提高系统运行效率。如图 6 所示, 本文算法对驾驶员是否佩戴眼镜不敏感, 两种情况下都具

有良好的人眼定位功能。

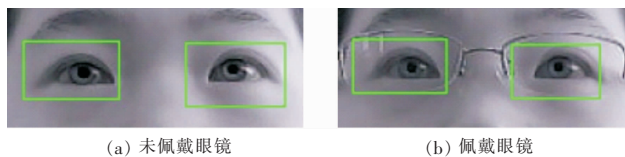


图 6 定位到的人眼图像

精确定位到人眼以后, 利用模型中标定的特征点来计算人眼开度, 如图 7 所示。红线标示长度 (见电子版) 即为人眼开度, 再利用式 (8) 归一化实验测得人眼开度值。

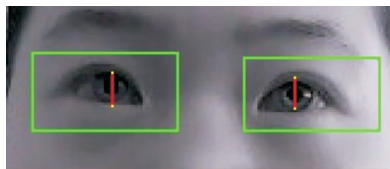


图 7 人眼开度值计算

至此完成了人眼开度值的计算。使用文中的基于有限状态自动机的 PERCLOS 方法利用式 (9) 可以准确地计算出 PERCLOS 值, 为后期疲劳预警提供了重要依据。

为了给出合理的预警机制, 本文组织实验室 40 位人员进行模拟疲劳驾驶, 对不同被测试者录取 100 s 的视频段, 统计分析视频中实验人员疲劳阶段与非疲劳阶段的人眼开度值。图 8 和 9 分别给出了实验人员在疲劳状态和非疲劳状态下的眼睛开度曲线图。

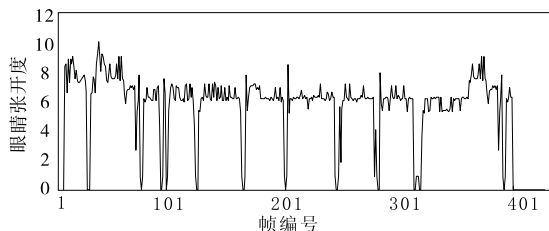


图 8 眼睛开度曲线(非疲劳状态)

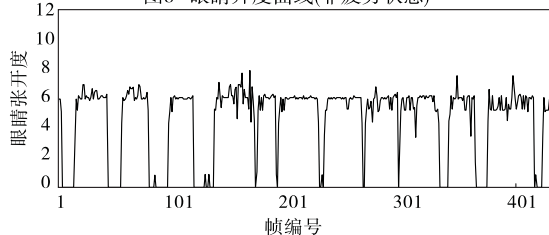


图 9 眼睛开度曲线(疲劳状态)

从图 8 和 9 可以看出, 非疲劳阶段的眨眼速度明显快于疲劳阶段的眨眼速度。视频采样率为 25 fps 时, 在非疲劳阶段, 眼睛“睁—闭—睁”一个完整的周期只需要 1 ~ 5 帧, 而疲劳时则需要 10 ~ 35 帧, 检测到的眼睛闭合帧数明显变大。

汪磊等人^[12]研究表明: 驾驶员在不疲劳状态下平均闭眼时长小于 0.2 s, PERCLOS 值小于 0.1; 轻度疲劳时平均闭眼时长为 0.2 ~ 0.25 s, PERCLOS 值为 0.1 ~ 0.3; 中度疲劳时平均闭眼时长为 0.25 ~ 0.3 s, PERCLOS 值为 0.3 ~ 0.5; 而闭眼时长大于 0.3 s 时即为严重疲劳, 此时 PERCLOS 值大于 0.5。文中为了提高预警准确率同时降低虚警率, 使用红外摄像头对 40 位不同被测试者各录取 100 s 的视频段, 对这些视频段分析、实验测得 PERCLOS 值在 0.4 时较为合理。故本文将 PERCLOS 的阈值取为 0.4。当 PERCLOS 值 $f \geq 0.4$ 时, 可以认为出现了疲劳驾驶, 以声音形式产生警报, 避免出现交通事故。

该原型系统如图 10 所示, 界面主要分红外图像视频采集

区、人眼开度实时显示区、PERCLOS 值预警区,分别完成相应的功能。



图 10 系统界面

3 结束语

本文设计并实现了一套基于计算机视觉技术的驾驶员疲劳检测系统。基于 ASM 算法进行人脸检测和人脸定位后计算人眼开度,利用改进的基于有限状态自动机的 PERCLOS 算法计算出 PERCLOS 值,依据制定的疲劳预警机制能够准确地作出疲劳判断。该系统对光线变化不敏感,系统响应时间不超过 1.5 s,同时具有一定的鲁棒性。今后的工作主要集中在算法的优化,提高运算效率上,以满足嵌入式开发的需求,同时考虑采用数据融合的方法来提高预警的准确率。

参考文献:

- [1] ROYAL D. National survey on distracted and driving attitudes and behaviours, DOT HS 809 566 [R]. 2003.
- [2] JI Qiang, LAN P, LOONEY C, et al. A probabilistic framework for modeling and real-time monitoring human fatigue [J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics—Part A: Systems and Humans*, 2006, 36(5): 862-875.

(上接第 291 页)检测算法。无须迭代过程,该检测算法利用同一尺度层局部极大值准则和相邻尺度层极大值准则,可直接断定兴趣点的特征尺度。相比其他检测算法,本文所提检测算法在图像模糊和 JPEG 压缩情况下取得最好结果,实验结果表明了该算法的有效性。但在图像发生视点变换等情况下,随着变换加剧,可重复率和可匹配率会急剧下降。笔者下一步将研究如何减少图像几何变化对频率空间分析的影响,提高 Gabor 多尺度空间中不变兴趣点检测方法的稳定性。

参考文献:

- [1] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant key points [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110.
- [2] MIKOLAJCZYK K, SCHMID C. Scale & affine invariant interest point detectors [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(1): 63-86.
- [3] MIKOLAJCZYK K, TUYTELAARS T, SCHMID C, et al. A comparison of affine region detectors [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2005, 65(1): 43-72.
- [4] MATAS J, CHUM O, URBAN M, et al. Robust wide-baseline stereo from maximally stable extremal regions [C]//Proc of British Machine Vision Conference. UK: BMVA Press, 2002: 384-393.
- [5] FERRAZ L, BINEFA X. A sparse curvature-based detector of affine invariant blobs [J]. *International Journal of Computer Vision and Image Understanding*, 2012, 116(4): 524-537.
- [6] DAUGMAN J G. Spatial visual channels in the Fourier plane [J]. *Vision Research*, 1984, 24(9): 891-910.

- [3] BERGASA L M, NUEVO J, SOTELO M A, et al. Real-time system for monitoring driver vigilance [J]. *IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems*, 2006, 7(1): 63-77.
- [4] 李都厚, 刘群, 袁伟, 等. 疲劳驾驶与交通事故关系 [J]. *交通运输工程学报*, 2010, 10(2): 104-109.
- [5] UENO H, KANEDA M, TSUKINO M, et al. Development of drowsiness detection system [C]//Proc of Vehicle Navigation and Information Systems Conference. New York: IEEE Press, 1994: 15-20.
- [6] DINGES D F, GRACE R. PERCLOS: a valid psychophysiological measure of alertness as assessed by psychomotor vigilance, FHWA-MCRT-98-006 [R]. Washington DC: Federal Highway Administration, US Department of Transportation, 1998.
- [7] ABE T, NONOMURA T, KOMADA Y, et al. Detecting deteriorated vigilance using percentage of eyelid closure time during behavioral maintenance of wakefulness tests [J]. *International Journal of Psychophysiology*, 2011, 82(3): 269-274.
- [8] 程如中, 赵勇, 戴勇, 等. 基于 Adaboost 方法的嵌入式疲劳驾驶预警系统 [J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2012, 48(5): 719-726.
- [9] LI Li-ling, XIE Mei, DONG Hua-zhi. A method of driving fatigue detection based on eye location [C]//Proc of the 3rd IEEE International Conference on Communication Software and Networks. 2011: 480-484.
- [10] COOTES T F, TAYLOR C J, COOPER D H, et al. Active shape models—their training and application [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 1995, 61(1): 38-59.
- [11] 李洪研, 赵学敏. 基于人眼 PERCLOS 特征的列车驾驶员疲劳检测系统 [J]. *中国铁路*, 2012(12): 32-35.
- [12] 汪磊, 孙瑞山. 基于面部特征识别的管制员疲劳监测方法研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2012, 22(7): 66-71.

- [7] DAUGMAN J G. Uncertainty relation for resolution in space, spatial frequency and orientation optimized by two-dimensional visual cortical filters [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1985, 2(7): 1160-1169.
- [8] RAHMAN M H, PICKERING M R, KUNDU D. Efficient rotation invariant Gabor descriptors for texture classification [C]//Proc of International Conference on Informatics, Electronics and Vision. [S. l.]: IEEE Press, 2012: 661-666.
- [9] RAHMAN M H, PICKERING M R, FRATER M R. Scale and rotation invariant Gabor features for texture retrieval [C]//Proc of International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications. [S. l.]: IEEE Press, 2011: 602-607.
- [10] XU Wan-ying, HUANG Xin-sheng, LI Xing-wei. An affine invariant interest point and region detector based on Gabor filters [C]//Proc of the 11th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. [S. l.]: IEEE Press, 2010: 878-883.
- [11] 雷琳, 王壮, 栗毅. 基于多尺度 Gabor 滤波器组的不变特征点提取新方法 [J]. *电子学报*, 2009, 37(10): 2314-2319.
- [12] LEE T S. Image representation using 2D Gabor wavelets [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996, 18(10): 959-971.
- [13] KOENDERINK J J. The structure of images [J]. *Biological Cybernetics*, 1984, 50(5): 363-370.
- [14] LEE W T, CHEN H T. Histogram-based interest point detectors [C]//Proc of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. [S. l.]: IEEE Press, 2009: 1590-1596.