

基于霍夫减影的变电站指针仪表读数识别

冯胜¹ 李大华² 李淮璇² 于晓²

¹(中海石油(中国)有限公司天津分公司 天津 300384)

²(天津理工大学电气电子工程学院 天津 300384)

摘要 随着变电站智能化的不断提高,仪表自动读数成为未来的发展趋势。针对仪表图像受光照影响大、表盘背景复杂、对比度低和变电站自身的特点,提出一种基于霍夫减影的变电站指针式仪表读数。利用基于梯度的霍夫圆检测算法提取表盘圆心;利用减影法定位指针;利用模板匹配算法提取表盘特征刻度值;通过判断指针与刻度的相对位置计算读数。实验结果表明,算法受环境背景干扰小,识别精度高。

关键词 霍夫变换 减影法 指针仪表 读数识别

中图分类号 TM93 TP3

文献标志码 A

DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2024.10.011

READING RECOGNITION OF SUBSTATION POINTER METER BASED ON HOUGH SUBTRACTION

Feng Sheng¹ Li Dahua² Li Weixuan² Yu Xiao²

¹(China National Offshore Oil Corporation Limited-Tianjin, Tianjin 300384, China)

²(School of Electrical & Electronic Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract With the improvement of substation intelligence, automatic meter reading has become the future development trend. Pointer meter images are vulnerable to illumination, complicated background of panel, low contrast and substation itself. Aimed at this problem, a new algorithm for the reading recognition of substation pointer meter based on Hough subtraction is proposed. The proposed approach extracted the circle of meter region by Hough circle detection algorithm based on gradient. The pointer was positioned by image subtraction and the template matching method was adopted to extract panel characteristic scale value. The reading recognition was identified by the relation between the pointer and scale lines. Experimental results show that the proposed method is smaller effected by complicated background. It has batter recognition accuracy.

Keywords Hough transform Image subtraction Pointer meter Reading recognition

0 引言

指针式仪表凭借其结构简单、抗干扰能力强、成本低廉等优点,在工业生产和输电系统中得到广泛应用^[1]。因为变电站中需要检测的设备众多,同时考虑到变电站中复杂的电磁环境,所以通常情况下采用指针式仪表来检测设备的运行状态^[2]。

仪表的精确读数是保证整个变电站安全稳定运行

的必要条件。到目前为止,这类仪表数据读取通常是依靠人工来完成,存在效率低、精度低、耗时长等问题^[3]。同时,由于人员观察角度和视觉疲劳的影响,读取数据的可靠性也不高。当遇到雨雪等极端天气时,工作人员难以在恶劣的工作环境中进行读数^[4]。并且在上传仪表数据时,可能会出现遗漏的问题。因此,有必要对变电站内仪表自动读数算法进行研究。仪表图像中普遍存在光照过亮过暗、表盘背景复杂、噪声影响严重等问题,同时考虑到实际变电站中检测数据的实

时性的要求,提高自动识别读数精度和效率势在必行。

随着计算机技术的发展,机器视觉广泛应用于仪表检测中,其读数具有准确、实时的特点,许多学者进行了大量的研究。Song等^[5]提出了一种基于指针区域特征的读表方法,利用高斯同态高通滤波器来增强对光照变化的适应性,通过旋转仪表图像并将图像以每个旋转角度投影到垂直轴上来计算指针角度。Zhang等^[6]提出了一种基于视觉显著区域检测的指针式仪表读数方法,利用先验显著性信息(包括区域对比度、空间关系和中心先验)来检测指针区域。Xu等^[7]提出了一种用于巡检机器人的指针抄表识别系统,针对过亮或过暗环境下的指针提取问题,提出了一种迭代类间方差极大值算法。Liu等^[8]为了满足环境的要求,提出了一种基于Faster R-CNN网络算法检测仪表图像的位置。Zuo等^[9]针对仪表背景复杂、指针仪表倾斜、图像模糊等问题,提出了一种新的高鲁棒性算法。

这些论文中所提及的算法虽然识别读数精度较高,但没有考虑到变电站需要实时检测读数、传输数据,并根据数据对设备进行调节的特点。此外,目前还没有针对变电站仪表图像的数据库,若利用神经网络算法,前期需要大量的时间精力来收集用于训练图像,工作量大,耗费时间久。因此,寻找一种受光照影响小、鲁棒性高、运算时间短的读数识别算法至关重要。

在这种背景下,本研究针对变电站内仪表光照不均匀、背景复杂、对比度不高的问题,提出了一种基于霍夫减影的变电站指针式仪表识别读数算法。实验结果表明:本文提出的算法抗干扰能力强、检测效率高,可精确定位圆心和指针,以达到精准快速读数。具体而言,本文主要有以下三个贡献点:

- (1) 在定位表盘圆心时,采用基于梯度的霍夫圆检测算法,有效地提高了检测的精度和效率。
- (2) 在定位指针时,首先采用减影法提取指针,然后通过对提取的指针做其尖部的最小外接矩形来定位指针,减少由于指针定位不准带来的误差。
- (3) 在提取表盘刻度时,采用基于序贯相似性检测的模板匹配算法,有效地提高了特征刻度提取的准确度。

1 基于霍夫减影的仪表识别读数算法实现

传统的仪表读数识别算法主要是通过定位表盘、刻度和指针来实现。当表盘背景复杂,受光照影响大

时,这种方法定位不精确,从而导致读数识别误差较大。针对这一问题,本文提出一种基于计算机视觉的仪表读数识别算法。首先对图像进行高斯滤波,抑制图像噪声,然后利用基于梯度的霍夫圆检测算法获取仪表的圆心。其次构造无指针模板,利用减影法使图像与模板作差提取指针,在指针的外边缘做最小外接矩形,对矩形四个点的坐标求和取平均获取指针的中心点。最后利用基于序贯相似性检测的模板匹配算法对表盘特征刻度进行模板匹配,求得最小量程所对应的角度,根据角度法识别仪表图像的读数。整体算法流程如图1所示。

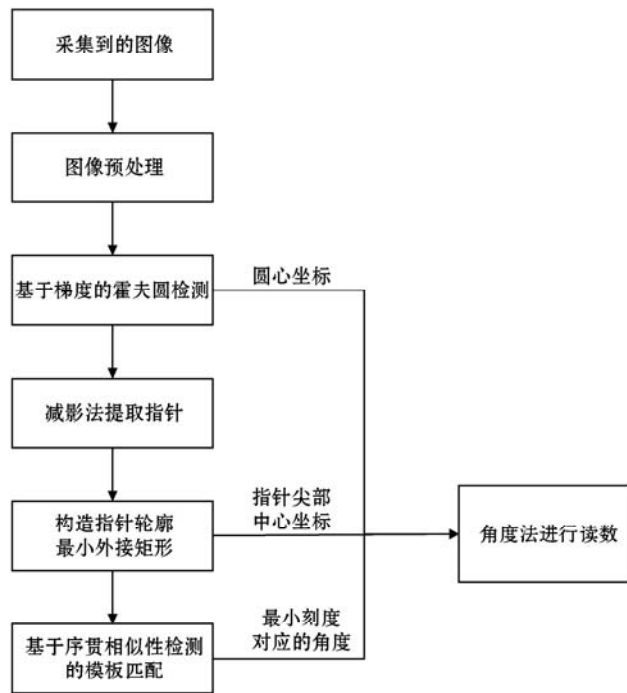


图1 整体算法流程

1.1 图像预处理

由于变电站内环境复杂,在获取仪表图像时会受到外界噪声的影响,这为仪表图像读数的识别造成很大的阻碍,所以在仪表图像提取、识别之前,首先对图像进行滤波、去噪处理,以保证之后的读数识别更加准确^[10]。

本文采用一种线性平滑滤波器——高斯滤波^[11-12],基于高斯滤波的知识,本文采用高斯内核大小 3×3 ,高斯核函数在X方向的标准偏差为1,在Y方向上的标准偏差为2。用该滤波器与原始图像做卷积得到处理后的清晰、增强的仪表图像。具体步骤如下:首先确定一个 3×3 的图像块,然后遍历所处理的图像,利用图像块与图像被遮挡部分像素点的加权平均灰度值作为被遮挡部分中心像素点的灰度值,使图像区域平滑,减少灰度值的突变。

设待处理图像为 $G(x, y)$, σ 值是代表平滑宽度, σ 值越大, 平滑程度越好。二维高斯函数表达式如式 (1) 所示。

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

1.2 圆心提取

传统的圆心提取方法为霍夫圆检测, 它将二维平面的圆变换成三维坐标下投票累积的点, 当累计的量达到确定的阈值, 则确定这一点为圆心的坐标, 再根据圆心确定坐标^[13]。但这种方法运算复杂, 计算量大, 导致算法运算速度慢。因此本文通过引进霍夫梯度法来提高运算速度。下面介绍传统霍夫变换的原理。

在笛卡尔坐标系中圆的表示方法为: $(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2$, (a, b) 为圆心, r 为半径, 坐标系如图 2 所示。

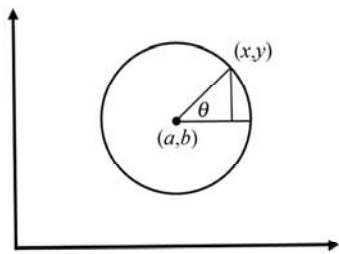


图 2 笛卡尔坐标系中的圆

若建立 abr 对应的三维坐标系 (下面称霍夫空间), 那么笛卡尔 xy 坐标系中的圆对应到霍夫空间中是一个点, 所以在 xy 坐标系中经过某一点的所有圆映射到霍夫空间中就是一条三维的曲线, 故当霍夫空间中一相交点积累的数量达到特定的阈值时, 则这个点就对应笛卡尔坐标系中的一个圆^[14]。三维坐标系的曲线如图 3 所示。

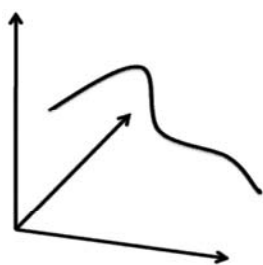


图 3 霍夫空间中的三维曲线

但这种方法运算量大, 耗时长, 为了提高运算速度, 本文基于霍夫梯度思想进行运算上的改善。主要根据圆的几何特征: 所有圆的切线交于一点, 即圆心。过圆心上任意一点做其切线, 圆心一定在该切线的垂直平分线上, 检测遍历累加所有非零对应的圆心, 对圆心进行考量, 再根据阈值进行最终判断^[15]。霍夫圆检测结果如图 4 所示。



图 4 霍夫圆检测结果图

算法 1 霍夫圆检测算法

1. 边缘检测
2. 计算图像梯度, 并根据其梯度值确定圆周, 垂直于圆周的方向即法线方向
3. 绘制整个图像的梯度直线, 若在某坐标点上累计的和最大, 则该点为圆心
4. 在 4 领域内对图像进行非极大值抑制, 排除非圆心点的干扰
5. 根据实验确定阈值, 大于该阈值的点判断为圆心

1.3 指针提取

传统的指针提取方法为霍夫线检测, 其思路是先将图像空间转换为参数空间, 相应的线检测问题会转变为点检测问题, 再通过确定累计点的峰值找到其所在直线^[16]。但这种检测方法可能会检测出多条直线, 导致指针定位不准确, 并且会受到刻度线的干扰。所以本文采用减影法来提取指针。

1.3.1 指针定位

由于表盘背景复杂, 如果直接用线检测算法来检测指针, 会出现边缘缺失或一条对应多条的问题, 同时会受到刻度盘的干扰, 因此本文采用减影法获取指针^[17]。具体做法根据式 (2): 设一幅原始图像 $G(x, y)$, 无指针模板图像 $Y(x, y)$, 指针图像 $T(x, y)$, T_0 为阈值。

$$T(x, y) = \begin{cases} 1 & |G(x, y) - Y(x, y)| \geq T_0 \\ 0 & |G(x, y) - Y(x, y)| < T_0 \end{cases} \quad (2)$$

但这种方法由于阴影的影响, 提取到的指针尾部不完整, 若提取整个指针, 会导致读数误差大, 因此本文构造的指针模板为无指针尖部的模板, 这样会大大提高模板定位的精度。结果如图 5 所示。

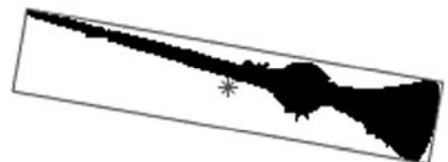


图 5 提取整个指针

1.3.2 指针中心提取

对提取到的指针尖部, 构造其最小外接矩形, 接着

对矩阵的四个顶点求和取平均得矩阵中心,即指针上的中心,如图6所示。可以看出,根据指针尖部获取的指针中心误差更小。

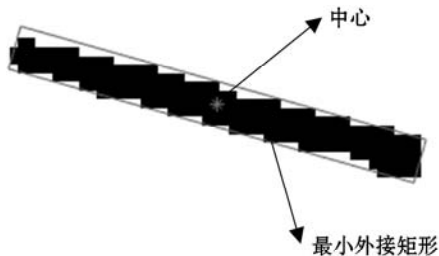


图6 提取指针尖部

指针中心提取 MATLAB 编程:

```
I = imread('G:指针尖部.png');
bw = im2bw(I);
[r c] = find(bw == 0);
[rectx, recty, area, perimeter] = minboundrect(c, r, 'a');
imshow(bw); hold on
line(rectx, recty);
A = rectx(1:4, 1);
B = recty(1:4, 1);
C = sum(A)/4;
D = sum(B)/4;
plot(C, D, '-*');
```

其中, (C, D) 为提取到的指针中心坐标。

1.4 特征刻度提取

模板匹配是通过生成的图像块依次遮盖图像的各个部分,根据被遮盖部分的运算情况来有效获取感兴趣的目标区域。该方法被广泛地应用于图像处理^[18]。首先构造一幅包含关键信息的目标图像,称为模板,然后将模板叠放在被搜索图像上平移,计算模板与被搜索区域的相似性。相似性越大,表明图像越相似,最后相关性最大的位置为目标所在的位置^[19]。

传统的模板匹配算法虽然原理简单,但需要对模板的每一个移动位置计算相似度,最后找到相似度最大的位置。假设一幅 $m \times n$ 原始图像和一幅 $M \times N$ 的模板进行匹配,每进行一次比较,计算量为 $(m - M) \times (n - N)$ 。这种方法无疑计算量大,导致算法运行慢^[20]。

本文采用序贯相似性检测算法(SSDA)进行匹配,它通过设定误差累计量来提前结束在非匹配位置上的计算,以达到优化运算速度的目的^[21]。设 $S(x, y)$ 是 $m \times n$ 的搜索图, $T(x, y)$ 是 $M \times N$ 的模板图, $S_{i,j}$ 是搜索图中的一个子图(左上角起始位置为 (i, j)), 阈值 T_h 。显然: $1 \leq i \leq m - M - 1, 1 \leq j \leq n - N - 1$ 。

定义绝对误差:

$$\varepsilon(i, j, s, t) = |S_{i,j}(s, t) - \bar{S}_{i,j} - T(s, t) + \bar{T}| \quad (3)$$

其中带上划线的量分别代表子图和模板的均值:

$$\bar{S}_{i,j} = E(S_{i,j}) = \frac{1}{M \times N} \sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N S_{i,j}(s, t)$$

$$\bar{T} = E(T) = \frac{1}{M \times N} \sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N T(s, t) \quad (4)$$

在模板图中随机选取不重复的像素点,计算与当前子图的绝对误差,将误差累加。当误差累计值超过阈值,记下累加次数,所有子图的累加次数 H 用表 $R(i, j)$ 来表示。SSDA 检测定义为:

$$R(i, j) = \{H \mid \min_{1 \leq h \leq M \times N} [\sum_{h=1}^H \varepsilon(i, j, s, t) \geq T_h]\} \quad (5)$$

若算法公式的计算结果大于事先确定的值,则考虑下一个候选区域。若所有候选区域均被处理,则算法公式计算出的最大 R 值所基于的 (i, j) 候选区域,即是最终结果。因为当随机点累加值大于事先确定的数值时就终止算法对候选区域的处理,不必处理候选区域的所有点。因此,运算效率得到有效改善。

由于仪表量程为 $0 \sim 100$,若选用 0 和 100 进行模板匹配,在表盘中的定位有多处,增加算法匹配的难度。所以本文选用特征数字 40 和 80 进行匹配。图7为匹配结果。



图7 匹配结果

1.5 读数识别

经过以上四个小节的处理,可得到表盘中心坐标、指针尖部中心坐标和两个刻度点坐标。根据两个刻度绕圆心的角度及其对应的刻度值,可确定表盘精度。设两个刻度点与表盘中心的夹角为 θ ,两个刻度点对应的示数分别为 ω_1, ω_2 ,仪表的精度为 ρ 。由此可得式(6)。

$$\rho = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\theta} \quad (6)$$

计算指针与刻度数字之间偏转的角度,设偏转角为 θ_p ,最终示数为 ω_p 。由式(7)可计算最终读数。

$$\omega_p = \begin{cases} \omega_1 + \theta_p \times \rho & \theta_p \text{ 顺时针偏转} \\ \omega_1 - \theta_p \times \rho & \theta_p \text{ 逆时针偏转} \end{cases} \quad (7)$$

2 实验结果分析

2.1 实验结果

本文采用测量发电机回水温度的仪表进行实验,

为了保证人员安全,拍摄照片时发电机处于停机状态,所以采集的图像整体温度偏低。本次实验选用 CCD 相机,型号 MV-CA050-10GM,分辨率 2 448 × 2 048,镜头型号 M0824-MPW2,焦距为 8 mm。仪表的示数范围为 0 ~ 100,共有 51 条刻度线,相邻刻度线的大小为 2 °C,选用 5 幅图像进行实验验证。采集图像的拍摄环境为白天正常光源,每幅图像均存在光照不均匀、背景复杂、对比度不高的问题。实验在 MATLAB 2018b 完成,根据图 1 所示的流程图编写程序。其中图像的大小为 480 × 480。实验检测结果如表 1、表 2 所示。结果展示根据本文算法获取的仪表圆心坐标、指针坐标、仪表精度和检测时间,并计算自动读数结果,与人工读数结果、文献[5]文献[6]算法结果比较。经实验分析确定指针定位阈值为 26。模板匹配的阈值为 10。比较本文算法与文献[5]文献[6]的相对误差,并绘制折线图如图 8 所示。

表 1 坐标检测结果

三组仪表	圆心坐标	指针坐标	仪表精度	检测时间/ms
仪表 1	(241,225)	(172,206)	2.1	89
仪表 2	(226,198)	(161,152)	2.0	96
仪表 3	(243,236)	(135,200)	2.1	92
仪表 4	(252,238)	(130,231)	2.1	95
仪表 5	(248,230)	(145,239)	1.9	90

表 2 仪表读数实验结果 单位:°C

三组仪表	人工读数	本文算法读数	文献[5]	文献[6]
仪表 1	22.0	21.8	22.3	22.5
仪表 2	32.5	32.2	32.1	32.1
仪表 3	18.7	18.5	18.4	18.3
仪表 4	15.6	15.4	15.8	15.1
仪表 5	13.8	13.7	13.6	14.3

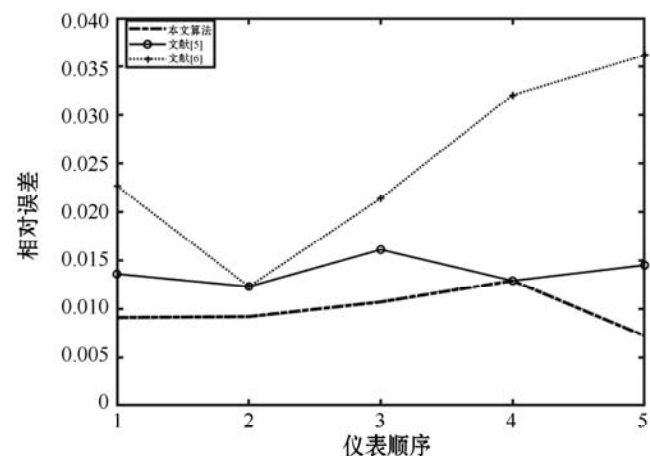


图 8 实验结果误差折线图

2.2 误差分析

由表 1 实验结果可以看出,仪表 2 的检测时间较长,这是由于相比较下,仪表 2 的背景更复杂,非圆心的干扰增多,导致运算时间增加。由图 8 实验结果可以看出,仪表 5 的相对误差相比更大,这是由于仪表 5 放置在光源充足的位置,反光问题相对严重,导致误差相对较大。但整体来说,本文读数的相对误差均在 1.3% 以下,检测时间在 96 ms 以内,表明本文所提出的算法具有很高的精确度和检测效率,其中圆心检测的准确度较高。分析可知由于指针型仪表自身的特点,即使圆心检测不准确,其对整体的读数结果影响较小。相反指针定位是否准确对读数结果影响很大,一点点定位的误差也会导致读数结果有很大的差别。后期可通过精确定位指针来提高仪表识别读数的准确度。

3 结 语

本文针对仪表图像光照不均匀、背景复杂、对比度不高和变电站自身的特点,提出基于霍夫减影的指针式仪表识别读数算法。准确性和快速性是整个算法主要考虑的问题。以往论文的目的主要是为提高其读数的准确度,但并不适用于变电站这种需要实时检测的场所。实验结果表明,基于霍夫减影的指针式仪表识别读数算法具有以下特点:(1) 圆心定位准确。(2) 指针定位准确。(3) 读数识别效率高,整个算法适用于变电站的实时读数检测。引入人工智能技术,切实提高巡检质量、效率。目前该算法在 2020 年中国机械工业科学技术奖项目申报中得到初步应用,随着巡检机器人的普及,将得到更广泛的应用。

参 考 文 献

- [1] 陈彬,金连文. 一种仪表指针位置检测的中心投影法[J]. 计算机应用研究,2005(1):246-248.
- [2] 李伟,张长胜,冯广,等. 基于图像处理的指针式表盘自动读取系统设计[J]. 电子科技,2018,31(6):24-26,35.
- [3] Zheng C, Wang S R, Zhang Y H, et al. A robust and automatic recognition system of analog instruments in power system by using computer vision[J]. Measurement, 2016, 92: 413-420.
- [4] 房桦,明志强,周云峰,等. 一种适用于变电站巡检机器人的仪表识别算法[J]. 自动化与仪表,2013,28(5):10-14.
- [5] Song W, Zhang W J, Zhang J, et al. Meter reading recognition method via the pointer region feature[J]. Chinese Jour-

- nal of Scientific Instrument, 2014, 35: 20 – 28.
- [6] Zhang W J, Xiong Q Y, Zhang J Q, et al. Pointer type meter reading recognition based on visual saliency[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2015, 27(12): 2282 – 2295.
- [7] Xu L, Shi W, Fang T. Pointer meter reading recognition system used in patrol robot[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(7): 1782 – 1790.
- [8] Liu Y, Liu J, Ke Y C. A detection and recognition system of pointer meters in substations based on computer vision[J]. Measurement, 2020, 152: 56 – 61.
- [9] Zuo L, He P, Zhang C H, et al. A robust approach to reading recognition of pointer meters based on improved Mask-RCNN[J]. Neurocomputing, 2020, 388: 90 – 101.
- [10] 姚洋, 彭道刚, 王志萍. 基于改进 Canny 检测与 Hough 变换的仪表图像识别算法[J]. 上海电力大学学报, 2020, 36(2): 183 – 189.
- [11] 左志强, 唐新明, 李国元, 等. GF-7 星载激光测高仪全波形自适应高斯滤波[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(11): 132 – 142.
- [12] Shoji A, Morita K, Takeshita T, et al. A Gaussian filter influenced the texture features on PET images[J]. Journal of Nuclear Medicine, 2018, 59: 2138.
- [13] 王延华, 李腾, 张沛, 等. 结合 HSV 与局部 Hough 变换的指针式仪表识别算法[J]. 电子设计工程, 2017, 25(2): 110 – 113.
- [14] 王高登, 钟俊. 基于改进的 Hough 变换的指针识别算法[J]. 现代电子技术, 2016, 39(16): 23 – 26.
- [15] 杨春岩. 一种基于霍夫变换的圆检测方法[J]. 白城师范学院学报, 2016, 30(2): 65 – 68.
- [16] 李泽, 张昊, 赵世昕, 等. 一种基于 OpenCV 的车道线检测方法[C]//中国计算机用户协会网络应用分会第二十四届网络新技术与应用年会, 2020.
- [17] 石林军, 余粟. 基于多约束条件下的霍夫变换车道线检测方法[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(9): 9 – 12, 38.
- [18] 贾迪, 朱宁丹, 杨宁华, 等. 图像匹配方法研究综述[J]. 中国图象图形学报, 2019, 24(5): 677 – 699.
- [19] 段亮弟, 宋平, 陈众, 等. 基于均值漂移的快速模板匹配算法[J]. 西北工业大学学报, 2018, 36(4): 792 – 799.
- [20] 徐遵义, 韩绍超. 基于相机标定和最大连通区域算法的指针式仪表读数识别[J]. 现代电子技术, 2019, 42(9): 46 – 50.
- [21] 郑剑斌, 郑力新, 朱建清. 一种基于灰度的快速模板匹配方法[J]. 现代计算机(专业版), 2018(26): 52 – 56.
- of multiple signals[J]. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 2018, 23(6): 2398 – 2408.
- [12] Fouad R M, Omer O A, Aly M H. Optimizing remote photoplethysmography using adaptive skin segmentation for real-time heart rate monitoring[J]. IEEE Access, 2019, 7: 76513 – 76528.
- [13] Conaire C O, O'Connor N, Smeaton A. Detector adaptation by maximising agreement between independent data sources[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2007: 1 – 6.
- [14] 李晓媛, 武鹏, 刘允, 等. 基于人脸视频的心率参数提取[J]. 光学精密工程, 2020, 28(3): 548 – 557.
- [15] Unakafov A M. Pulse rate estimation using imaging photoplethysmography: Generic frame-work and comparison of methods on a publicly available dataset[J]. Biomedical Physics & Engineering Express, 2018, 2018(4): 45001.
- [16] Tasli H E, Gudi A, Uyl M D. Remote PPG based vital sign measurement using adaptive facial regions[C]//IEEE International Conference on Image Processing, 2014: 1410 – 1415.
- [17] Fallet S, Moser V, Braun F, et al. Imaging photoplethysmography: What are the best locations on the face to estimate heart rate[C]//Computing in Cardiology Conference, 2016: 341 – 345.
- [18] Viola P, Jones M, Daniel S. Detecting pedestrians using patterns of motion and appearance[J]. International Journal of Computer Vision, 2005, 63(2): 153 – 161.
- [19] Mstafa R J, Elleithy K M. A video steganography algorithm based on Kanade-Lucas-Tomasi tracking algorithm and error correcting codes[J]. Multimedia Tools and Applications, 2016, 75(17): 10311 – 10333.
- [20] Haan G D, Jeanne V. Robust pulse rate from chrominance-based rPPG[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2013, 60(10): 2878 – 2886.
- [21] Wang D L, Yang X Z, Liu X N, et al. Detail-preserving pulse wave extraction from facial videos using consumer-level camera[J]. Biomedical Optics Express, 2020, 11(4): 1876 – 1891.
- [22] Tan W R, Chan C S, Yogarajah P, et al. A fusion approach for efficient human skin detection[J]. Industrial Informatics IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 8(1): 138 – 147.
- [23] Niu X S, Han H, Shan S G, et al. VIPL-HR: A multi-modal database for pulse estimation from less-constrained face video[C]//Asian Conference on Computer Vision, 2018: 562 – 578.
- [24] Niu X S, Shan S G, Han H, et al. RhythmNet: End-to-end heart rate estimation from face via spatial-temporal representation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2019, 29(10): 2409 – 2423.

(上接第 50 页)

- [11] Favilla R, Zuccala V C, Coppini G. Heart rate and heart rate variability from single-channel video and ICA integration