

doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2020.0005.017

手指静脉装置的光源优化设计及应用*

朱超平^{1,2}

(1. 重庆工商大学 计算机科学与信息工程学院, 重庆 400067; 2. 重庆市检测控制集成系统工程重点实验室, 重庆 400067)

摘要:为了提高手指静脉的识别率,首先需要提高手指静脉图像的质量,影响图像质量的关键因素是手指静脉采集设备,而采集装置的近红外 LED 光源系统直接决定手指静脉成像的质量;提出一种近红外 LED 阵列等边三角形排列的光源设计方法,优化三角形阵列的结构参数;实验结果表明:采集的手指静脉图像质量提高,有助于提升手指静脉识别图像的识别率。

关键词:手指静脉;近红外光;结构参数;特征识别

中图分类号:TP391

文献标志码:A

文章编号:1672-058X(2020)05-0108-07

0 引言

生物特征识别是当前安全领域的研究热点,其中手指静脉具有特征独有、活体识别、不易伪造、非接触和稳定性高的特有优势,在生物特征安全领域被广泛应用。但手指静脉图像在采集中容易受手指放置位置、光源位置、光照均匀度、使用者的习惯和采集方式等因素的影响,使采集到的静脉图像可能有阴影和光斑,图像的对比度低,进而影响手指静脉的识别质量^[1]。

手指静脉识别过程包含图像采集、图像预处理和手指静脉识别三步。其中,手指静脉图像的采集是手指静脉识别的基础,也是手指静脉识别的前提,为获得高质量的手指静脉图像,需要从多方面对手指静脉采集装置进行研究^[2]。国内外许多学者做了大量的研究工作,黄志星等^[3]提出采用多级

光强采集方案,解决手指静脉图像质量低的问题;吴飞等^[4]提出利用优化的光源阵列设计,提高光源的均匀性以提升手指静脉的采集质量;刘跃跃^[5]提出利用微透镜阵列组成的人造复眼采集手指静脉图像序列,提高手指静脉图像的采集质量;罗玉祥^[6]提出利用多摄像头对手指静脉图像进行采集,提取完整的指静脉信息;王陈^[7]提出了使用软件的增强方法,消除图像的曝光问题和手指静脉中由于散射导致的图像模糊性问题,软件方法需要耗费大量的处理时间,采集的时间较慢,并且体验性较差。张冬梅^[8]提出将低质量的手指静脉图像通过图像增强的方法来获得高质量的手指静脉图像,通过图像的变化获得的手指静脉图像,会导致手指静脉中的一些重要特征信息丢失,从而影响手指静脉的识别率。

综上所述,如何充分发挥手指静脉采集装置的功能,采集到高质量的手指静脉图,需要充分利用

收稿日期:2019-03-18;修回日期:2020-05-20.

* 基金项目:教育部科技发展中心产学研创新基金项目资助(2018A02049);重庆工商大学重点开放项目资助(KFJJ2019106);重庆市教育科学规划项目资助(2018-GX-348);重庆市基础研究与前沿探索项目资助(CSTC2018JCYJAX0057);重庆市教委科技项目青年项目资助(KJQN201800814);重庆工商大学自然科学基金项目资助(1752006)。

作者简介:朱超平(1977—),男,四川邻水人,讲师,硕士,从事机器学习和智能数据处理研究. Email:jsjzcp@163.com.

采集装置的光源阵列结构、光源特性、空间结构参数等参数,找到采集装置的最优结构参数,是获得手指静脉图像的关键,也是提高手指静脉识别系统性能的重要手段。因此,提出利用等边三角形的近红外光源阵列,优化近红外光源的设置,增强手指背面的光照均匀度,提高手指静脉的采集质量,完善识别性能。

1 相关理论研究

手指静脉图像特征信息比较丰富,手指静脉采集装置可以制作得非常小巧。利用 850 nm 波长的近红外光照射手指,由于手指皮肤脂肪较少,容易投射/透射近红外线,血液血红蛋白会吸收 850 nm 的近红外光线,从而在图像上形成暗影,可以利用摄像机非常容易地采集到清晰手指静脉。目前常见的手指静脉采集装置有透射式和反射式。透射式采集就是将近红外光源直接照射手指背部,使近红外光穿透手指,在 CMOS 传感器上形成静脉图像;反射式利用近红外光源照射手指侧面,光线从侧面照射静脉血管,从而形成手指静脉图像,通过成像装置获取手指静脉图像,但是,由于反射式装置采集到的静脉图像的静脉纹路、背景区域的区分度不高,还存在阴影,纹路不清晰,所以现在手指静脉采集装置还是以透射式为主,本文选取透射式的静脉装置来讨论手指静脉图像采集系统的光源设计问题。

1.1 近红外 LED 光源阵列研究

假如单个近红外 LED 在 (X, Y, O) 平面处,其照射的目标平面上有 P 点, P 点的位置为 (x, y, h) ,如图 1 所示。假设近红外 LED 光源是理想的朗伯分布,光强分布是发光角余弦的多次方函数,则单个近红外 LED 在 P 点处产生的光照度 E 与光强 I 满足余弦定律,如图 1 所示^[9]。

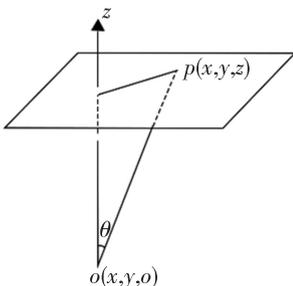


图1 单个近红外 LED 光照模型

Fig. 1 Single near-infrared LED lighting model

$$E(x, y, z) = \frac{I \cos \theta}{r^2} \quad (1)$$

其中, r 为近红外 LED 到 P 点的距离。根据图 1 可求得光源 O 点到 P 点的距离 $r = \sqrt{(x-X)^2 + (y-Y)^2 + z^2}$,结合朗伯分布公式和式(1),把 r 代入式(1)中得到单个 LED 在 P 点处产生的光照强度为^[10]

$$E(x, y, z) = \frac{I_0 h^{m+1}}{[(x-X)^2 + (y-Y)^2 + z^2]^{\frac{m+2}{2}}} \quad (2)$$

由于单个 LED 照度很弱,不能满足照度采集手指静脉图像的光照条件,实际工程应用往往采用多个近红外 LED 阵列光源组合,近红外 LED 阵列的组合方式排列方式不同,得到的光源照度和均匀度完全不同。假如有 N 个近红外 LED 按照一定的方式排列在 $Z=0$ 平面上,其光照强度是多个近红外 LED 光照强度之和,则在 P 点的光照强度为^[11]

$$E(x, y, z) = \sum_{n=1}^N \frac{I_0 h^{m+1}}{[(x - X_n)^2 + (y - Y_n)^2 + z^2]^{\frac{m+2}{2}}} \quad (3)$$

其中, X_n 和 Y_n 为第 n 个近红外 LED 在 Z 平面的坐标(图 2)。

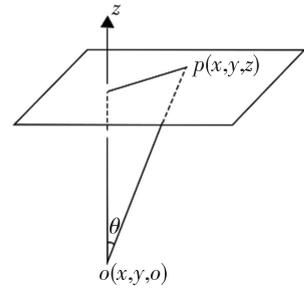


图2 P 点光照模型

Fig. 2 P point lighting model

假设近红外 LED 在 Z 平面的排列为三角形阵列,三角形阵列也称为六边形阵列,如图 3 所示,阵列行间交替,同行近红外 LED 灯间距为 d ,每个三角形的边也为 d ,即一个等边三角形。在阵列中,每一行的高度为 $\frac{\sqrt{3}}{2}d$ 。在三角形阵列中,该阵列有近红外 LED 灯的个数有 $(N \times M) - 0.25[2M + (-1)^M - 1]$ 个。把近红外 LED 的个数代入式(3)可以得到矩形阵列在 $Z=0$ 平面的 P 点产生的光照强度为^[12]

$$E(x, y, z) = z^m E_0 A_e \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_j} \{ [(x - N_j - 2i)(d/2)]^2 +$$

$$[y - (M + 1 - 2j)(\sqrt{3}d/4)]^2 + z^2 \}^{-(m+2)/2} \quad (4)$$

其中, $N_{\pm} = N + [(-1)^j \pm 1]/2$, A_e 是 LED 芯片的发光面积。

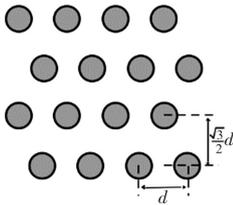


图 3 近红外 LED 的三角形阵列

Fig. 3 Triangular array of near infrared LEDs

由于近红外 LED 的聚光性很强,而三角形阵列产生的照度不具有对称性特性,根据对近红外 LED 的实验得知大约在 100 mm 宽度以内,单个近红外 LED 在中心轴的光照强度 E_0 的 20% 范围内几乎集中了整个近红外 LED 90% 以上的光通量,根据这个规律得到:

$$E \geq 0.2E_0 \quad (5)$$

假设近红外 LED 光源较长的边与 Y 轴平行,较短的边与 x 轴平行,光照面中心点到光照面边缘的最远距离为 R,到 LED 阵列较长边的距离为 T_d ,则光源的发散角 φ 满足^[13]:

$$\varphi = \text{ArcTan} \left[\frac{R - T_d}{z} \right] \times \frac{1.80}{\pi} \quad (6)$$

从式(6)中可以得出近红外 LED 阵列的照射光斑的发散性质,把式(3)和式(4)代入式(6)中可以计算出 R 的值。把光斑中心点(0,0,z)的值代入式(4)中能得出阵列的照度峰值 E_0 :

$$E_0 = z^m A_e I_0 \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_-} \{ (N_+ - 2i)^2 + [(M + 1 - 2j)(\sqrt{3}d/4)]^2 + z^2 \}^{-(m+2)/2} \quad (7)$$

根据 $E \geq 0.2E_0$ 得出 R 满足的方程为^[14]

$$E(x, y, z) = z^m E_0 A_e \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_-} \{ [x - N_+ - 2i](d/2) \}^2 + [y - (M + 1 - 2j)(\sqrt{3}d/4)]^2 + z^2 \}^{-(m+2)/2} = 0.2E_0 \quad (8)$$

由方程可以求解 R 的值,然后把 R 代入式(6)中计算出近红外 LED 阵列光源的照射光斑的发散角。

1.2 最优结构参数

为了求出近红外 LED 三角形阵列光源的最优结构参数,引入斯派罗法则进行计算。当两个高斯分布的能量函数以线性方式拉开,两峰值逐渐远离最大平坦距离,中心处将出现波谷,这个最大平坦距离被称为斯派罗极值 σ_L 。为了求得 σ_L ,对式(8)中的 $E(x, y, z)$ 求二次导数,并令 $x=0, y=0$ 处, $\partial^2 E / \partial x^2 = 0$,解方程得到最大平坦条件:

$$\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_-} \{ d^2 (m/2 + 1)(m/2 + 2) [N - 2i + (-1)^j + 2]^2 \} / g(d)^{\frac{m}{2}+3} - (m + 2) / g(d)^{\frac{m}{2}+2} = 0 \quad (9)$$

其中,

$$g(d) = \{ d^2 [N - 2i + (-1)^j + 2]^2 \} / 4 + z^2 + [3d^2 (M - 2j + 1)^2] / 16$$

d 是关于 m、N、M 的函数,根据设定好的参数进行求解,并求出最大平坦条件的结构参数:

$$d_{\max} = \sqrt{\frac{4}{m+3}} \cdot z \quad (10)$$

2 指静脉采集装置设计

指静脉实验采集装置采用透射方式采集静脉图像,由多个近红外 LED 组成的光源阵列照射指背,手指中的静脉血管吸收 850 nm 波长的近红外光,形成造影,为了增强效果,在摄像头的前端加上滤光片,选用型号为 HW780 的红外滤光片,滤掉其他波长的光线,在摄像机上形成清晰的手指静脉图片;成像器件选用型号 OV7725,采集速度可达 60 fps,分辨率为 752×480;镜头采用 CW0421IR 镜头,焦距为 4 mm,像面尺寸可达 0.84 mm,采集设备采用三角形矩阵光源的排列方式,如图 4 所示。

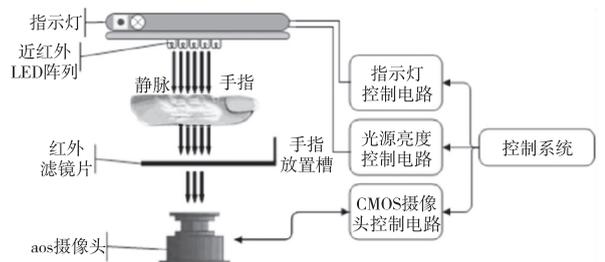


图 4 手指静脉实验装置

Fig. 4 Finger vein experimental device

3 静脉采集装置的结构参数讨论

近红外 LED 是一种非相干光源,照射强度可以由多个 LED 的照射强度叠加。如果叠加合理,光源的强度不够、照度不均匀,成像设备上采集到的手指静脉图像就不够清楚,可能存在光斑、阴影、漏光、曝光过度和造假等问题^[15]。下面对近红外 LED 阵列的照度模型进行讨论。

3.1 照度与光源阵列的关系

为了测试近红外 LED 光源整理的照度,光源阵列采用了三角形和矩形排列,采用同样数量的近红外 LED,在同样的采集设备上,设置相同的采集参数,对近红外 LED 的照度进行测量,从图 5 可以看出,采用三角形阵列的光源排列,在同样面积的照射面上,三角形排列的阵列的均匀照度面积比矩形阵列的均匀照度面积要大,形成的光源质量较高,有利于手指静脉图像的采集。

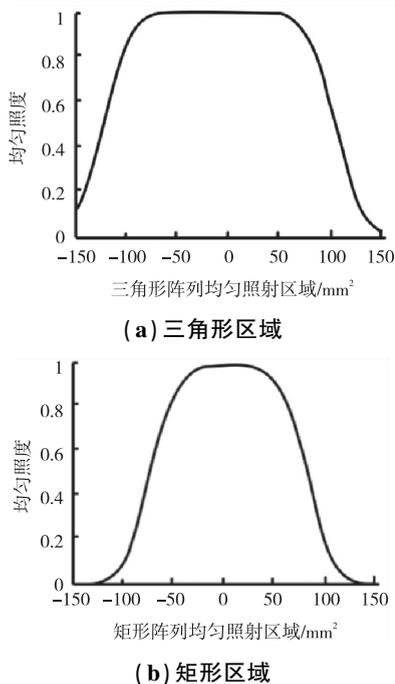


图 5 光源阵列对均匀照度的影响

3.2 目标与光源的距离关系

为了讨论光源与目标所在平面的距离对手指静脉图像采集的影响,光源采用 $N=3 \times 9$ 的三角形矩形阵列光源,设 $I_0=1 \text{ cd}$, $d=20 \text{ mm}$,照射距离 h 取值为 20 mm 、 30 mm 和 50 mm 3 种情况,研究目标

距离 h 变化对手指静脉照射强度和均匀度的影响。利用式(8)计算出目标平面内的光照峰值。分别计算可得 E_0 为 $1\ 355x$ 、 $93.7x$ 和 $632x$ 。由此可知,光照峰值随着距离目标 h 的增加而明显减少。为了采集清晰的手指静脉图像,结合手指静脉采集设备空间的限制和指型的特征参数,光源距离手指平面的高度取值为 $15 \text{ mm} \sim 25 \text{ mm}$ 。3 种高度的均匀照度如图 6 所示。

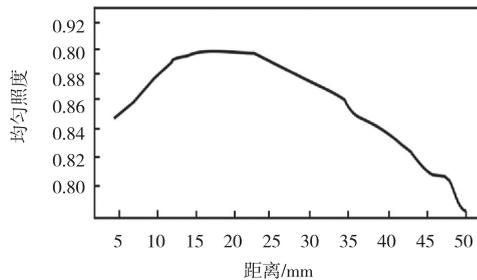


图 6 光源高度对光照均匀度的影响

Fig. 6 The influence of the height of light source on the uniformity of illumination

3.3 光源结构参数对照度影响

结构参数就是近红外 LED 光源阵列中任意相邻的两个近红外 LED 的距离。当高度一定的情况下,两个近红外 LED 的结构参数可以利用斯派罗法则求得最优结构参数值。为了对比不同结构参数对照度的影响,设计了不同结构参数的光源阵列,测量光源阵列对照度的影响,通过图 7 可以看出,在高度一定的情况下,结构参数在最优的情况下取得光照均匀度最高。

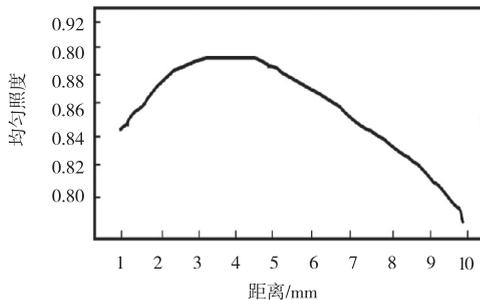


图 7 结构参数对照度均匀性的影响

Fig. 7 Influence of structural parameters on uniformity of illumination

4 实验

为了测试不同光源阵列和不同数量近红外 LED 对采集手指静脉质量的影响,考虑近红外 LED

灯的大小和手指形状结构的特征,实验室专门设计了 1×8 和 $7+8+6$ 的光源阵列,分别安装在两个同样的采集设备上,采用对比实验验证结果,光源结构体如图 8 所示。



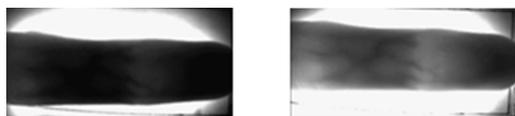
(a) 单排近红外 LED 光源 (b) 三角形阵列近红外 LED 光源

图 8 采集光源的设计

Fig. 8 The design of acquisition light source

4.1 光源阵列对手指静脉图像的影响

通过采用单行的近红外 LED 光源来采集的图像,由于光照强度不够,光照度不均匀,采集的手指静脉图像中明显存在阴影。而采用三角形近红外 LED 阵列光源,采集的手指静脉图像中的静脉纹路清晰,图像质量较高,便于后期处理和识别,如图 9 所示。



(a) 单排阵列光源采集的图像 (b) 三角阵列光源采集的图像

图 9 不同光源采集的图像对比

Fig. 9 Comparison of images from different light sources

4.2 光源高度对图像质量的影响

手指静脉采集装置采用穿透式采集图像,手指需要插入到光源和滤光片之间,考虑到手指的形状参数,给用户舒适感的采集环境,需要考虑预留足够的手指放置空间,方便用户使用。实验中设置了 h 分别为 20 mm、30mm 和 50 mm 的高度空间,供用户放置手指,然后利用手指静脉采集装置采集手指静脉图像,采集到的图像如图 10 所示。从图 10 采集到的图像对比可知,当设置光源的高度为 20 mm 时,采集到的手指静脉图像比光源高度为 30 mm 和 50 mm 采集到的图像质量高,当高度为 50 mm 的时候,采集到的手指静脉图像明显存在阴影。



(a) $h=20$ mm (b) $h=30$ mm (c) $h=50$ mm

图 10 光源高度对手指静脉图像的影响

Fig. 10 The effect of light source height on finger vein image

4.3 光源结构参数对图像质量的影响

根据斯派罗法则,可以很容易求得光源阵列的最优结构参数 d_{\max} 值,见式(10),为了验证光源阵列采用最优结构参数设计时,采集到的手指静脉图像的质量是否最优,分别设计了结构参数为 $d=0.9d_{\max}$ 和 $d=1.1d_{\max}$ 的阵列光源,然后采集 3 种结构参数下采集装置获取到的静脉图像。从图 11 可知,当光源阵列的结构参数为最优的时候,采集到手指静脉图像质量最高,而其他两种条件下,光源的照度不均,采集到的手指静脉图像有阴影,质量不够理想。



(a) $d=0.9d_{\max}$ (b) $d=d_{\max}$ (c) $d=1.16d_{\max}$

图 11 结构参数对图像质量的影响

Fig. 11 The influence of structure parameters on image quality

5 结束语

由于手指静脉在皮肤之下,手指静脉特征受指型结构的影响,要采集到高质量的手指静脉图像不容易,后期通过软件的方法来增强手指静脉质量,容易导致手指静脉的特征信息丢失,将直接影响手指静脉识别的安全性。如何设计手指静脉采集装置,采集高质量的手指静脉图像,是手指静脉识别的关键。如果采集装置的光源设计不够合理,光源可能存在光源排列形状不同、数量不够、高度过高、发散角过大,导致光照不均匀,都会影响手指静脉的采集。本文首先从单个近红外 LED 的特性出发,推导了近红外 LED 阵列的数学公式和参数,结合三角形阵列特性,推导了三角形 LED 光源阵列的数学公式,并利用了斯派罗法则求得三角形光源阵列的最优结构参数。从光源的排列形式、阵列光源的高度和光源的结构参数等方面讨论了采集装置的光源系统设计。通过对比实验发现,当三角形光源阵

列在最优参数条件下,采集到的手指静脉图像的质量最优,实验结果和理论推导值一致,为后续的手指静脉识别奠定了基础。

参考文献 (References):

- [1] ISMAIL B, MOHAMED O Z, HAMZA H, et al. Finger Vein Identification Using Deeply – Fused Convolutional Neural Network [J]. Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences, 2020; 40—43
- [2] 朱超平,秦华锋,刘启能. 手指静脉识别系统矩形阵列光源特性分析及优化设计 [J]. 计量学报, 2020, 41 (1):16—21
- ZHU C P, QIN H F, LIU Q N. Characteristic Analysis and Optimization Design of Rectangular Array Light Source for Finger Vein Recognition System [J]. Acta Metrologica Sinica, 2020, 41 (1):16—21 (in Chinese)
- [3] 黄志星. 基于卷积神经网络的嵌入式指静脉识别系统 [D]. 广州:华南理工大学, 2017
- HUANG Z X. The Embedded Finger Vein Recognition System Based on Convolutional Neural Networks [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017 (in Chinese)
- [4] 吴飞,杨广达,王凤兰,等. 手指静脉识别传感器的光源设计 [J]. 传感器与微系统, 2017, 36(04):74—77
- WU F, YANG G D, WANG F L, et al. Light Source Design of Finger Vein Recognition Sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2017, 36(4):74—77 (in Chinese)
- [5] 刘跃跃. 基于微透镜阵列超薄装置的手指静脉识别系统研究 [D]. 广州:华南理工大学, 2017
- LIU Y Y. Research on Finger Vein Recognition System Based on Micro Lens Array Ultrathin Device [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017 (in Chinese)
- [6] 罗玉祥. 多摄像头指静脉识别系统的设计与实现 [D]. 武汉:武汉理工大学, 2017
- LUO Y X. Design and Realization of Multi-camera Finger Vein Recognition System [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017 (in Chinese)
- [7] 王陈. 指静脉多曝光图像的研究 [D]. 北京:北京邮电大学, 2019
- WANG C. The Study on Multi-Exposure Image Fusion of Finger Vein [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019 (in Chinese)
- [8] 张冬梅. 低质量手指静脉图像增强 [D]. 重庆:重庆理工大学, 2010
- ZHANG D M. Low Quality Finger Vein Image Enhancement [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2010 (in Chinese)
- [9] 刘沁,刘启能. 方形 LED 阵列光斑发散特性的幂函数拟合 [J]. 光子学报, 2015, 44(4):167—171
- LIU Q, LIU Q N. Power Function Fitting Methods of Light Spot Divergence Characteristics of Led Square Array [J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44 (4): 167—171 (in Chinese)
- [10] 王宝,余荣斌,李丰果. 多颗 LED 模组系统的排列方式及参数对光照均匀性的影响 [J]. 照明工程学报, 2013, 24(5):78—83
- WANG B, YU R B, LI F G. The Influence of the Patterns and Parameters of the Arrangement of Multi-LED Module System on the Illumination Uniformity [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2013, 24 (5): 78—83 (in Chinese)
- [11] 王加文,苏宙平. LED 阵列模组化中的照度均匀性问题 [J]. 光子学报, 2014, 43(08):22—28
- WANG J W, SU Y P. Study on Uniformity of LED Array Illumination Distribution on Target Plane [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(8):22—28 (in Chinese)
- [12] ZHAO D D, MA H, YANG Z D, et al. Finger Vein Recognition Based on Lightweight CNN Combining Center Loss and Dynamic Regularization [J]. Infrared Physics and Technology, 2020, 105:103221
- [13] 耿海彪. 基于不变矩红外线指静脉图像的识别方法研究 [D]. 昆明:昆明理工大学, 2015
- GENG H B. The Study for Recognition Method of Infrared Vein Imaging Based on Invariant Moment [J]. Kunming:

- Kunming University of Science and Technology, 2015 (in Chinese)
- [14] 黄启禄. 基于均匀照明的 LED 阵列的仿真研究与设计[D]. 厦门: 华侨大学, 2011
- HUANG Q L. Simulation Research and Design of LED Array Based on Uniform Illumination [M]. Xiamen: Huaqiao University, 2011 (in Chinese)
- [15] 刘霞, 秦华锋. 基于深度置信网络的假手指静脉图像检测算法[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2018, 35(5): 33—39
- LIU X, QIN H F. Fake Finger Vein Image Detection Based on Deep Belief Network[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2018, 35(5): 33—39 (in Chinese)

Optimization Design and Application of Near Infrared Light Source for Finger Vein Device

ZHU Chao-ping^{1,2}

(1. School of Computer Science and Information Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China; 2. Chongqing Key Laboratory for Detection and Control of Integrated Systems Engineering, Chongqing 400067, China)

Abstract: In order to improve the recognition rate of finger vein, the quality of the finger vein image needs to be improved first. The key factor affecting the image quality is the finger vein collection equipment, and the near-infrared LED light source system of the collection device directly determines the quality of the finger vein imaging. However, the shape and internal structure of the human fingers are different, and the structural parameters are different. If the design of the device's near-infrared light source is unreasonable and if the structural parameters of the light source array are incorrect, it is impossible to collect the details and features inside the finger vein, which results in a decrease in the recognition rate of the finger vein. This paper proposes a light source design method for equilateral triangle arrangement of near-infrared LED arrays to optimize the structural parameters of the triangle array. The experimental results show that the improving of the quality of the collected finger vein images can help improve the recognition rate of the finger vein images identifying.

Key words: finger vein; near-infrared light; structural parameters; feature recognition

责任编辑: 罗姗姗

引用本文/Cite this paper:

朱超平. 手指静脉装置的光源优化设计及应用[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2020, 37(5): 108—135

ZHU C P. Optimization Design and Application of Near Infrared Light Source for Finger Vein Device[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2020, 37(5): 108—135