

基于多光谱成像技术的非接触式 心率检测研究

王禹^{1,2}, 任玉^{1,2*}, 李栋梁^{1,2}, 王婷婷^{1,2}, 李腾^{1,2}

¹长春理工大学物理学院, 吉林 长春

²长春理工大学吉林省光谱探测科学与技术重点实验室, 吉林 长春

收稿日期: 2024年2月22日; 录用日期: 2024年3月22日; 发布日期: 2024年3月29日

摘要

心率参数是反应人体健康状态的重要生理指标, 而成像光电容积描记法可以通过非接触式的方式进行心率检测。成像光电容积描记法利用皮肤下组织对光有吸收和反射作用, 通过检测血容量的变化导致光强度的变化来获得血流的脉动情况, 这过程中对光其主要吸收作用的是血红蛋白。目前IPPG技术使用的成像设备是RGB三通道相机, 它对血红蛋白的光谱范围只包含540 nm, 因此本文使用多光谱相机进行非接触式心率检测, 它包含了血红蛋白414 nm、540 nm和576 nm的光谱范围。本文通过使用上述两个成像设备做对比实验发现多光谱相机比RGB相机的检测误差要小, 并且符合误差标准。

关键词

图像光电容积描记法, 多光谱成像技术, 心率测量

Research on Non-Contact Heart Rate Detection Based on Multi-Spectral Imaging Technology

Yu Wang^{1,2}, Yu Ren^{1,2*}, Dongliang Li^{1,2}, Tingting Wang^{1,2}, Teng Li^{1,2}

¹School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

²Key Laboratory of Jilin Province for Spectral Detection Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Feb. 22nd, 2024; accepted: Mar. 22nd, 2024; published: Mar. 29th, 2024

*通讯作者。

文章引用: 王禹, 任玉, 李栋梁, 王婷婷, 李腾. 基于多光谱成像技术的非接触式心率检测研究[J]. 应用物理, 2024, 14(3): 123-130. DOI: 10.12677/app.2024.143015

Abstract

Heart rate parameter is an important physiological index reflecting human health, and imaging photoelectric plethysmography can detect heart rate in a non-contact way. Imaging photoelectric plethysmography uses the absorption and reflection of light by subcutaneous tissue, and obtains the pulsation of blood flow by detecting the change of light intensity caused by the change of blood volume. In this process, hemoglobin is the main absorption of light. At present, the imaging equipment used in IPPG technology is RGB three-channel camera, and its spectral range of hemoglobin only includes 540 nm, so this paper uses multi-spectral camera for non-contact heart rate detection, which includes the spectral ranges of hemoglobin of 414 nm, 540 nm and 576 nm. In this paper, by using two imaging devices to do comparative experiments, it is found that the detection error of multi-spectral camera is smaller than that of RGB camera, and it meets the error standard.

Keywords

Image Photoplethysmography, Multispectral Imaging Technology, Heart Rate Measurement

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

心率是衡量人体身心健康的重要指标，人类的心率一般是用每分钟心跳的次数(Beats Per Minute, BPM)来衡量的，它是揭示个体健康状况的一个重要参数，主要用于心血管疾病的临床研究工作，也可以用来诊断糖尿病或高胆固醇引起的疾病，甚至动脉阻塞情况[1]。

传统的心率检测方法依赖于心电图(ECG)、接触式光电容积描记法(photoplethysmography, PPG)传感器。传统的心率检测方法为了得到准确的测量结果，必须要紧贴在皮肤上并且需要做很好的遮光处理，才能得到较好信噪比的脉搏信号。但是，如果出现皮肤烧伤或者肢体残缺等情况，接触式的测量就无法实现。另外，夹持式的测量，不同的夹持力度，不同的夹持角度都会影响测量的精度，而如何控制这种接触产生的压力对测量精度的影响，目前还没有很好的方法。长时间的监测，接触式的测量会给测试者带来不适感。为了解决这个问题，需要使用不那么突兀的、非接触的测量方法。随着计算机视觉算法的发展，研究人员提出了基于成像光电容积描记法(Image Photoplethysmography, IPPG)的非接触式心率检测[2] [3] [4] [5] [6]。

IPPG 是一种利用光电技术远程检测皮肤下血管中血液容积变化的方法[7]-[12]。由于血液中的血红蛋白对光起主要吸收作用，所以需要成像设备的光谱范围包含血红蛋白可见光谱吸收峰的光谱，红蛋白的吸收光谱在 274 nm、376 nm、414 nm、540 nm、576 nm 处，414 nm 处吸收峰远高于其它吸收峰[13] [14]。

目前 IPPG 大多使用的是 RGB 三通道相机，RGB 相机光谱范围有限，只包含了血红蛋白 540 nm 的吸收峰，所拍摄的视频包含的心率信号较少[15] [16] [17]。

因此本文提出宽波段、多通道的脉搏信息获取方式，在提高信号质量的同时，增强信号的信噪比，可有效解决 RGB 相机的缺点。本文所使用的多光谱相机，拥有九个光谱通道，光谱范围包含了血红蛋白的 414 nm、540 nm、576 nm 的吸收峰。本文将利用多光谱相机和同款 CMOS 的 RGB 相机进行非接触式

心率检测，并且检测结果进行对比分析。

2. 实验方法

2.1. 实验仪器及装置

本文搭建的实验系统对志愿者进行非接触式心率检测，实验系统如图 1 所示。本文所使用的光源是色温灯，所使用成像设备是多光谱相机(光谱范围为 350 nm~950 nm) [18]以及同款 CMOS 的 RGB 相机(光谱范围为 430 nm~470 nm, 500 nm~560 nm, 620 nm~780 nm)。两个相机均以 30 帧/秒输出灰度图片，曝光时间为 30 ms，图片的分辨率为 640 × 480，位深 24 bit。多光谱相机的采集图片的通道数为 9。测试人员心率的标准值采用鱼跃的 YX306 指夹式脉搏血氧仪进行检测。血氧仪脉搏的测量范围在 25 bmp~250 bmp，测量误差为 ±1 % 或者 ±1 bmp (取两者中较大者)。

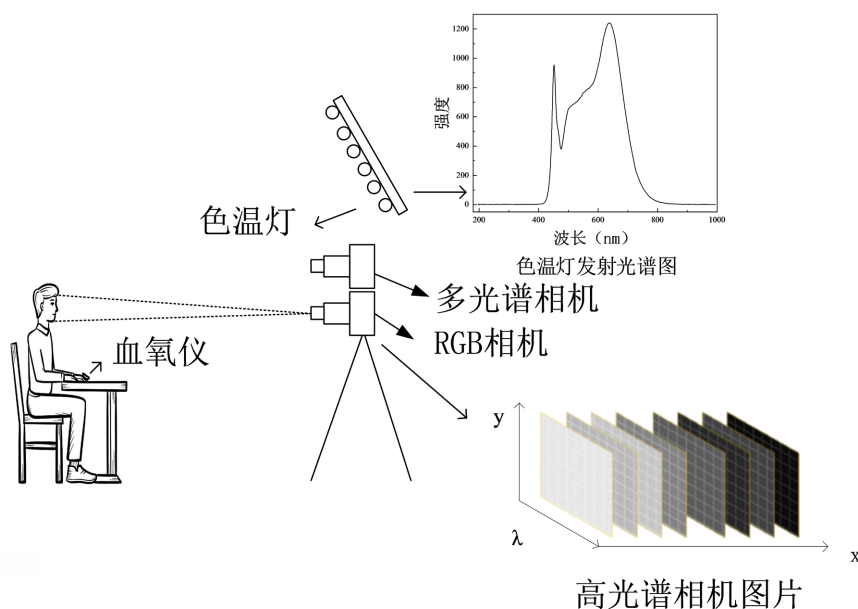


Figure 1. Experimental system diagram
图 1. 实验系统图

本文实验环境为暗室，并且确保暗室内没有各种干扰因素(如风，人的走动以及其他声音的干扰)。为保持两个相机的采集环境一致性，在实验中多光谱相机和 RGB 相机同时进行数据采集。采集时测试人员坐在两个相机的前方，光源放置在相机上方。并且在每次测试前测试人员需要休息 5 分钟使心率平静下来。在测试时测试人员需要保持静止不动，每组测量时间设置为 30 秒，一共测试 30 组。

2.2. 心率检测方法

为了获得我们所需要的心率信号，首先需要对获取的原始 raw 图片进行通道分离，接着对每个通道的图像进行人脸识别并分割。接下来为了避免眼睛、鼻孔、额头的头发的干扰，需要对分割出的人脸进行进一步的感兴趣区域选取(ROI)，本文选取的部位为鼻子上面和眼睛下方的矩形区域具体流程如图 2。接着对每一帧图像每个通道的 ROI 内像素值求空间平均值来获取原始信号(图 3)，公式如下：

$$P(t) = \frac{\sum_{x,y \in \text{ROI}} W(x,y,t)}{N} \quad (1)$$

其中, $P(t)$ 是不同通道的原始信号, $W(x, y, t)$ 是在时间 t 时像素 (x, y) 在 ROI 内的像素值, N 是 ROI 的像素总数。

人体正常的心率信号是具有周期性的, 目前, 已经得到了用于检测心率的原始数据, 从图 3 的图像数据可以看出, 数据基本上是杂乱无章的无法识别出其具有的周期性, 并不能发现其中包含的心率信息, 原因是上述的数据中包含大量的噪声, 需要对这些数据进行滤波处理, 以提高源信号的信噪比。

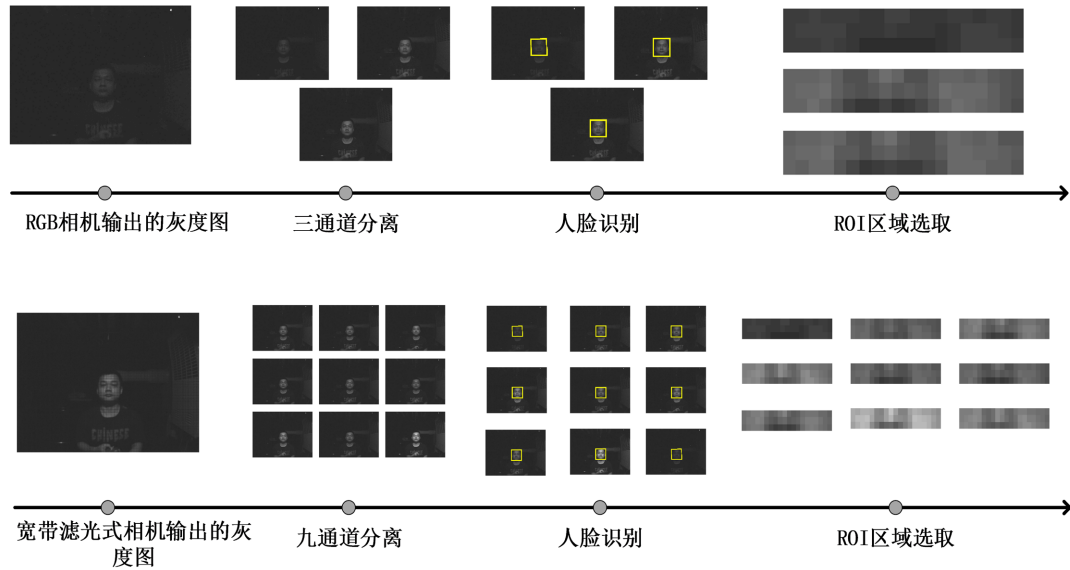


Figure 2. Face recognition and ROI region selection
图 2. 人脸识别与 ROI 区域选取

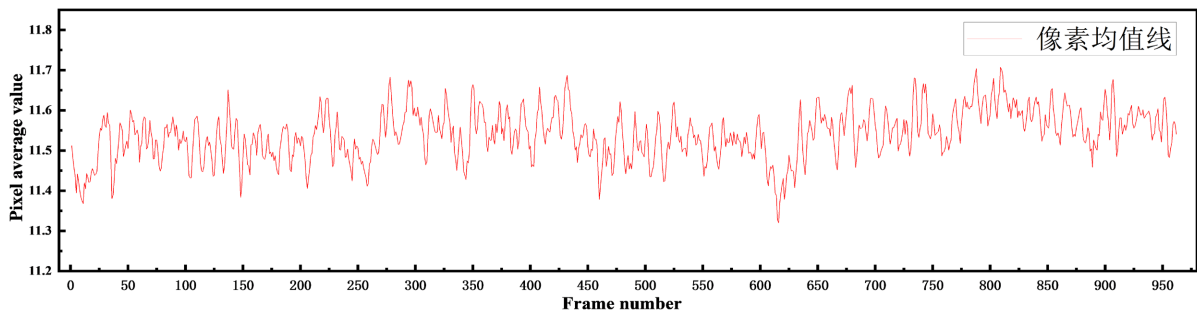


Figure 3. Original signal
图 3. 原始信号

首先需要对源心率信号进行去趋势、标准化处理, 其次将处理完的信号进行 ICA 分离[19], 获得盲源分离完后的数据(图 4)。ICA 公式如下:

$$x(t) = As(t) \tag{2}$$

$$\hat{S}(t) = Wx(t) \tag{3}$$

$x(t) = [x_1(t), x_2(t), x_3(t), \dots, x_n(t)]^T$, $s(t) = [s_1(t), s_2(t), s_3(t), \dots, s_n(t)]^T$ 分别是输入的原始信号和待分离的真实信号, A 是一个 $n \times n$ 的混合矩阵, 一般情况下不能准确求解出 $s(t)$, 所以通过混矩阵 W 来求解出 $\hat{S}(t)$, $\hat{S}(t)$ 可以作为真实源信号的近似估计值。

最后使用带通滤波器进行滤波，人体的心率范围是在 50 bpm 至 220 bpm，通过换算频率范围大概是在 0.8 Hz 到 3.8 Hz 之间，所以带通滤波器的范围设置在 0.8 Hz 到 3.8 Hz 之间。滤波后的信号如图 5。

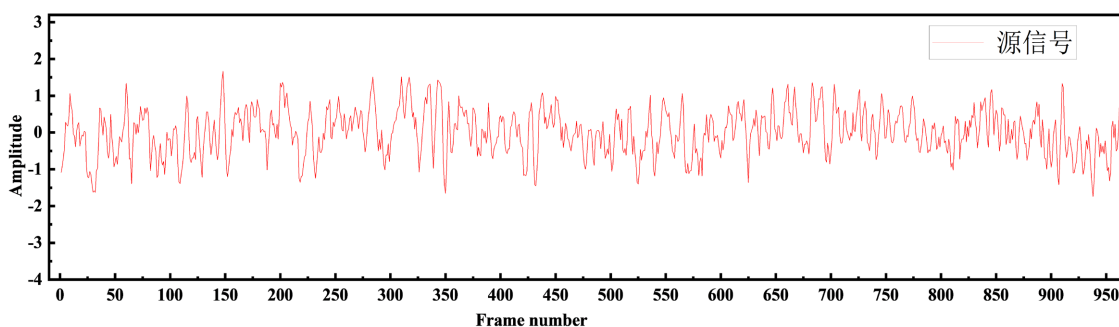


Figure 4. Signals after ICA separation

图 4. ICA 分离后的信号

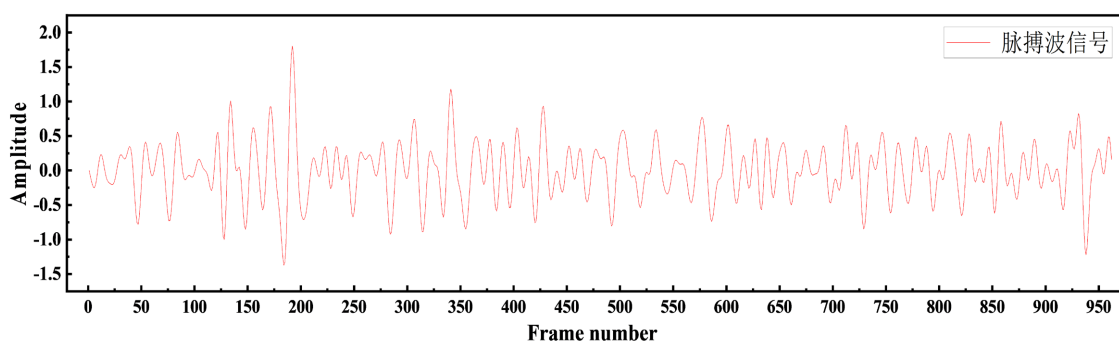


Figure 5. Filtered signal

图 5. 滤波后的信号

由于 ICA 特性，信号是以随机的顺序输出的，因此并不总是同一个输出信号具有最强的脉搏波波形。而心率信号是一个周期性信号，所以有最高峰值的频谱对应于具有最强心率的信号，所有其他源信号具有更平坦的频谱[20]。通过频谱我们得到所需要的心率信号如图 6。

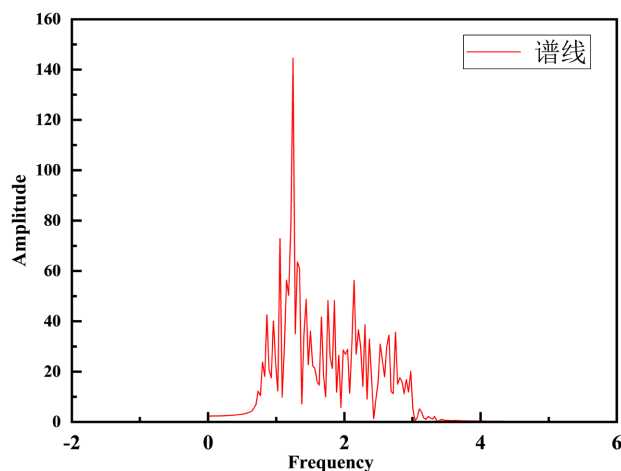


Figure 6. Spectrum diagram

图 6. 频谱图

最终为了获得心率只需要通过心率计算公式：

$$HR = f_{\max} \times 60 \quad (4)$$

式中的 HR 为真实心率， f_{\max} 为频谱中最大峰值对应的频率。

3. 实验结果分析与讨论

通过图 7 可以看出多光谱相机整体的离散程度原小于 RGB 相机，并且在静止状态下时多光谱相机没有离群值，可以看出多光谱相机的检测效果要优于 RGB 相机。

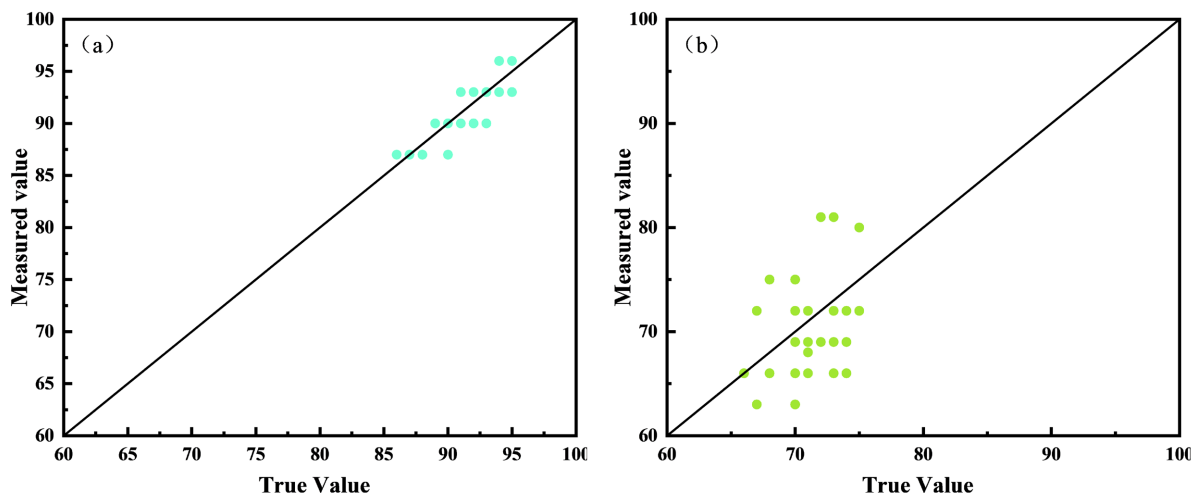


Figure 7. Heart rate values of multispectral camera and RGB Camera. (a) Multispectral; (b) RGB

图 7. 多光谱相机和 RGB 相机心率值。(a) 多光谱；(b) RGB

Table 1. Error between measured value and standard value

表 1. 测量值与标准值误差

	平均误差率 (%)	平均绝对误差 (MAE)	均方根误差 (RMSE)	标准差 (SD)
多光谱	1.1	1.033	1.304	1.326
RGB	5.3	3.767	4.461	4.457

根据医药行业规定的误差标准(误差 ≤ 5 bpm)和表 1，多光谱相机的误差均符合误差的标准，并且相比较于 RGB 相机平均误差率降低了 4.2%，平绝对误差降低了 2.734 bpm，均方根误差降低了 3.157 bpm，标准差降低了 3.131 bpm。而 RGB 相机的误差虽然符合误差标准，但是基本接近误差的标准值。

通过平均绝对误差可以看出多光谱相机测量的误差值基本和医用脉搏血氧仪的误差标准接近，相比较与 RGB 相机降低了 2.734，证明多光谱相机的效果要优于 RGB 相机，是因为多光谱相机的光谱范围比 RGB 宽，涵盖了血红蛋白 414 nm、540 nm、576 nm 波段的吸收峰。均方根误差可以看出多光谱相机并没有明显的异常值，而 RGB 相机均方根误差较大，可以推断出测量结果中有较大的异常值存在。标准差则可以看出数据的离散程度，这点和图 7(a)和图 7(b)一致，多光谱相机的离散程度要优于 RGB 相机。

4. 结论

通过本文的实验结果分析我们得出结论多光谱相机在非接触式心率检测效果比 RGB 相机更好，这是因为多光谱相机的宽谱段(350 nm~950 nm)涵盖了血红蛋白 414 nm、540 nm、576 nm 波段的吸收峰，而

RGB 相机波段(430 nm~470 nm, 500 nm~560 nm, 620 nm~780 nm)只涵盖了血红蛋白 540 nm 波段的吸收峰。多光谱相机宽波段、多通道的特点在非接触式心率检测相比较于 RGB 相机平均误差率降低了 4.2%，平绝对误差降低了 2.734 bmp，均方根误差降低了 3.157 bmp，标准差降低了 3.131 bmp。

本文的工作可以促进多光谱相机代替传统的 RGB 相机作为成像设备，通过宽波段来获得更好地脉搏波信号，扩展非接触式心率检测的在日常生活中的应用场景，提高非接触式心率检测的精准度。

参考文献

- [1] 中国心血管病风险评估和管理指南编写联合委员会. 中国心血管病风险评估和管理指南[J]. 中国循环杂志, 2019, 34(1): 4-28.
- [2] Du, J., Liu, S.Q., Zhang, B. and Yuen, P.C. (2023) Dual-Bridging with Adversarial Noise Generation for Domain Adaptive RPPG Estimation. *Proceedings of the 2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vancouver, 17-24 June 2023, 10355-10364. <https://doi.org/10.1109/CVPR52729.2023.00998>
- [3] Lokendra, B. and Puneet, G. (2022) AND-RPPG: A Novel Denoising-RPPG Network for Improving Remote Heart Rate Estimation. *Computers in Biology and Medicine*, **141**, Article ID: 105146. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2021.105146>
- [4] 戴阳, 郑婷婷, 杨雪. 基于视频放大与盲源分离的非接触式心率检测[J]. 计算机系统应用, 2021, 30(1): 228-234.
- [5] 王香荣, 王伟洁, 赵京生, 等. 基于视频的非接触式多人运动状态下心率实时检测[J]. 光学技术, 2019, 45(6): 683-689.
- [6] 吴芬, 彭力, 韩鹏, 骆开庆, 刘冬梅, 邱健. 基于自寻优归一化最小均方误差算法的非接触式心率测量方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(20): 303-310.
- [7] Wu, T., Blazek, V. and Schmitt, H.J. (2000) Photoplethysmography Imaging: A New Noninvasive and Noncontact Method for Mapping of the Dermal Perfusion Changes. *European Conference on Biomedical Optics*, Amsterdam, 1 November 2000, 62-70.
- [8] Verkruysse, W., Svaasand, L.O. and Nelson, J.S. (2008) Remote Plethysmographic Imaging Using Ambient Light. *Optics Express*, **16**, 21434-21445. <https://doi.org/10.1364/OE.16.021434>
- [9] Poh, M.Z., McDuff, D.J. and Picard, R.W. (2010) Non-Contact, Automated Cardiac Pulse Measurements Using Video Imaging and Blind Source Separation. *Optics Express*, **18**, 10762-10774. <https://doi.org/10.1364/OE.18.010762>
- [10] McDuff, D., Gontarek, S. and Picard, R.W. (2014) Improvements in Remote Cardiopulmonary Measurement Using a Five Band Digital Camera. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **61**, 2593-2601. <https://doi.org/10.1109/TBME.2014.2323695>
- [11] Zhang, Q., Zhou, Y.M., Song, S., et al. (2018) Heart Rate Extraction Based on Near-Infrared Camera: Towards Driver State Monitoring. *IEEE Access*, **6**, 33076-33087. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2845390>
- [12] Yang, Z., Wang, H. and Lu, F. (2022) Assessment of Deep Learning-Based Heart Rate Estimation Using Remote Photoplethysmography under Different Illuminations. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, **52**, 1236-1246. <https://doi.org/10.1109/THMS.2022.3207755>
- [13] 丘家杵, 阮萍, 雍军光, 等. 健康人血红蛋白紫外可见吸收光谱和 FTIR 光谱[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(5): 1425-1430.
- [14] Jihyoung, L., Matsumura, K., Yamakoshi, K.I., et al. (2013) Comparison between Red, Green and Blue Light Reflection Photoplethysmography for Heart Rate Monitoring During Motion. 2013 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Osaka, 3-7 July 2013, 1724-1727. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2013.6609852>
- [15] Schruppf, F., Frenzel, P., Aust, C., et al. (2021) Assessment of Non-Invasive Blood Pressure Prediction from PPG and rPPG Signals Using Deep Learning. *Sensors*, **21**, Article 6022. <https://doi.org/10.3390/s21186022>
- [16] Yue, Z., Ding, S., Yang, S., et al. (2021) Deep Super-Resolution Network for RPPG Information Recovery and Non-contact Heart Rate Estimation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **70**, 1-11. <https://doi.org/10.1109/TIM.2021.3109398>
- [17] Deng, Y. and Kumar, A. (2020) Standoff Heart Rate Estimation from Video: A Review. *Mobile Multimedia/Image Processing, Security, and Applications 2020*, **11399**, 16-29. <https://doi.org/10.1117/12.2560683>
- [18] 王婷婷, 蔡红星, 李霜, 等. 新型超构表面成像光谱芯片研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(11): 194-203.
- [19] Anowar, F., Sadaoui, S. and Selim, B. (2021) Conceptual and Empirical Comparison of Dimensionality Reduction AI-

- gorithms (PCA, KPCA, LDA, MDS, SVD, LLE, ISOMAP, LE, ICA, T-SNE). *Computer Science Review*, **40**, Article ID: 100378. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2021.100378>
- [20] Lucarini, S. and Segurado, J. (2019) DBFFT: A Displacement Based FFT Approach for Non-Linear Homogenization of the Mechanical Behavior. *International Journal of Engineering Science*, **144**, Article ID: 103131. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2019.103131>