光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022081201

基于双摄像头的心率测量系统的设计与改进

徐　杰，胡丹峰*，张　林，王加俊

（苏州大学 电子信息学院，江苏 苏州 215006）

摘　要： 针对在外部干扰或昏暗环境下利用图像光电容积描记（image Photoplethysmography，iPPG）技术进行心率测量时准确度较差，提出了一种自适应心率提取算法，并在嵌入式硬件平台上进行了验证。算法根据图像中人脸与背景区域的色度关系来识别不同的场景并启动合适的摄像头进行图像采集及自适应映射，接着对提取出的信号进行滤波，在信号质量评估后输出结果。上述方法在Zynq平台上进行了验证，使用双摄像头实现实时心率测量，并对结果进行可视化输出。实验结果表明：优化后的算法在光照及运动的双重干扰下的测量误差从3.36 BPM降至2.78 BPM，准确率提升了17.3%。另外，所设计的系统能够实现在极端黑暗条件下的心率采集，平均误差约为2.39 BPM。

关键词： 图像光电容积描记法；心率测量；Zynq；抗干扰；信号处理

中图分类号： TP391.41　**文章编号：** 1001－5868(2023)01－0115－07

Design and Improvement of Heart Rate Measuring System Based on Dual Camera

XU Jie，HU Danfeng，ZHANG Lin，WANG Jiajun

（School of Electronic and Information Engineering，Soochow University，Suzhou 215006，CHN）

Abstract： In order to solve the problem that the accuracy of heart rate measurement is poor under external interference or dim environment by image Photoplethysmography（iPPG），an adaptive heart rate extraction algorithm was presented and was verified on an embedded hardware platform. Different scenes could be identified by this algorithm according to the chromaticity relationship between faces and the background areas in the image. Subsequently，the appropriate camera was launched for image acquisition and adaptive mapping. Finally，the extracted signal was filtered and the result was output after the signal quality evaluation. The algorithm was implemented on the embedded Zynq system with dual cameras for real-time heat rate measurement，and the results were visualized. Experimental results show that the measurement error decreases from 3.36 BPM to 2.78 BPM under the interference of light and motion，and the accuracy is improved by 17.3%. In addition，the designed system can also achieve heart rate acquisition under extreme dark conditions，with an average error of about 2.39 BPM.

Key words： image Photoplethysmography（iPPG）；heart rate measurement；Zynq；anti-interference；signal processing

0　引言

心率是衡量健康状况的一个重要指标，它的变化与心肺功能及心脏疾病密切相关[1]。传统的测量方法如心电图等通常都需要进行皮肤接触，在长期测量下，这些方法会使受试者感到不适，而且受试者的无意识运动可能对心率的测量结果有明显的影响。基于面部视频的图像光电容积描记（image Photoplethysmography，iPPG）技术可以在没有任

收稿日期：2022－08－12.

*通信作者：胡丹峰　E-mail：hdf78@suda.edu.cn

何接触的情况下测量心率，提供了一种更舒适便捷的心率测量方法[2-3]。

iPPG 心率提取技术源于面部变化的微弱信号，在心跳时心脏会向全身进行泵血，此时面部血容量的变化会导致皮肤颜色的周期性变化。通过摄像头记录面部区域的视频，就可以获取包含潜在生命体征的 iPPG 信号。但是，采集到的 iPPG 信号易受外部光照及运动干扰且在被干扰时会降低其信噪比，难以从中提取出准确的心率信号[4-5]。传统的方法是利用颜色空间投影或信号分解来提取心率信号。文献[6]将色度信号线性组合，对图像进行白平衡来抑制干扰；文献[7]对非平稳信号采用子带法进行小波滤波等。这些方法可以消除不必要的分量，增强脉搏波信号，然而，他们都是基于某些皮肤反射模型的假设，在光线昏暗或不均匀的情况下可能表现不佳[8]。除了传统的信号处理方法外，一些方法采用了深度神经网络强大的建模能力来估计生理信号[9]，这些方法在一定程度上可以有效地抑制干扰，但是这类算法需要大量的图片数据集，算法复杂，对硬件需求较高，且也会受限于外部环境的变化。

针对现有方法中存在的问题，本文提出了一种自适应心率提取算法，包含针对图像的自适应映射算法以及针对心率提取的信号质量评估算法。该算法在心率提取准确度上高于现有算法，且复杂性远低于深度学习算法，适合在算力有限的嵌入式系统中实现。算法中首先对图像进行人脸及背景的分割并分别计算平均光强，根据光强间的关系将人脸感兴趣区域的图像映射到稳定的光强区间，保证提取出的信号在光线扰动下不会出现太大的波动。如果在黑夜环境下，普通摄像头采集到的光强过弱，系统就会调用红外摄像头进行图像的采集。随后对映射后的多帧图像进行 iPPG 信号的提取，经过小波变换(Continuous Wavelet Transform，CWT)后截取子段进行信号质量估计，通过信号频谱中峰值的关系进行信号子段的可靠性分析，最后输出估计的心率值。在硬件方面，选择了 Zynq 平台进行算法验证，依靠平台驱动双摄像头进行交替工作，移植并优化算法流程，在满足系统实时性的同时完成了心率结果的可视化输出。

1 心率提取算法的优化

1.1 算法原理

当一束光照射到含有流动血液的人体皮肤组织时，相机采集到的信息包括光源在皮肤中的镜面反射信号和漫反射信号。因此，可以将采集到的图像序列中皮肤像素的变化信号定义为一个时变函数 $C_k(t)$：

$$C_k(t)=I(t)(\overrightarrow{u_c}\cdot c_0+\overrightarrow{u_s}\cdot s(t)+\overrightarrow{u_p}\cdot p(t)) \tag{1}$$

其中，$\overrightarrow{u_c}\cdot c_0$ 表示光源镜面反射信号中的稳定分量，摄像头采集到的光照强度大多来自于此；$\overrightarrow{u_s}\cdot s(t)$ 表示因干扰而出现的不稳定的变化信号，包含光源镜面反射和漫反射中的不稳定成分；$p(t)$ 则为本文需要提取的生理信号波形。iPPG 心率提取技术就是通过视频图像来提取由心脏跳动导致的面部微小的心率变化信号。

1.2 心率提取算法整体流程

如图 1 所示，算法的整体实现流程主要包括四个阶段：(1)人脸检测；(2)判断是否开启红外摄像头；(3)对感兴趣区域使用自适应映射算法；(4)滤波及心率估计。

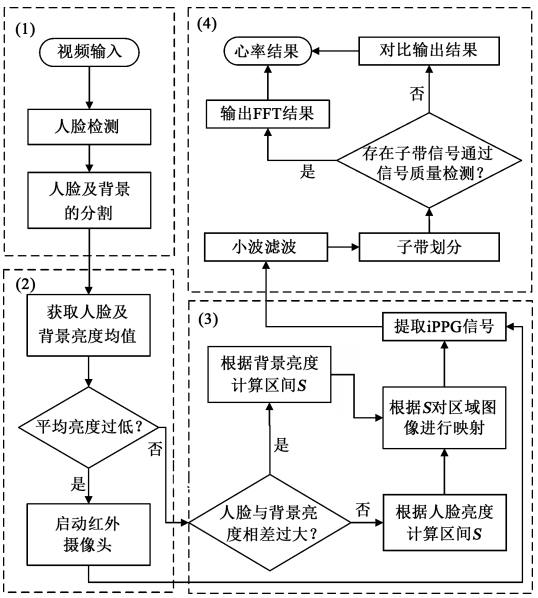


图 1 心率提取算法实现流程

在第一阶段，算法使用 SeetaFace 人脸检测器来检测人脸位置，并分割人脸与背景的图像；在第二阶段，计算人脸及背景的亮度均值并提取人脸感兴趣区域的数据，根据亮度判断是否使用红外摄像头进行数据采集；在第三阶段，使用自适应映射算法，根据面部和背景的平均亮度关系得到映射区间 S，再将感兴趣区域图像的像素映射到 S 区间中。经过多帧图像的映射处理并提取出相应的数据后，就可以得到预处理后的 iPPG 信号；第四阶段，先对得

到的信号使用 CWT 得到脉搏波，之后对整体信号截取子段进行信号质量评估，在对比中输出最终的心率结果。

1.3　人脸检测区域及算法介绍

测试者不经意的移动会导致相应区域的颜色变化。因此，为了减少运动伪影对心率测量的影响，就需要准确的人脸检测以及合理的人脸感兴趣区域。一般情况下，面部上暴露的前额区域皮肤较薄，脉搏波信息较多，因此本文选择了前额区域作为面部感兴趣的区域。

在人脸检测上，本文选择了由中科院计算所研发的人脸识别引擎 SeetaFace，代码基于 C++实现，不依赖第三方库，使用轻量化的模型及算法，并且在 C++的环境中对函数接口进行调用，加速了算法的运行，保证系统的实时性。

1.4　自适应映射算法介绍

彩色图像中的每个像素都有 R，G，B 三个颜色通道，每个颜色通道中的色度分布各不相同[10]。采集连续图像的三通道变化数据并进行相应的处理就可以得到心率值。由公式(1)可知，心率信号的获取主要依赖于数据的波动部分，处理中通常采用归一化来滤除信号的直流分量。但是，当发生由人体移动或者外部光源引起的人脸亮度变化时，归一化并不能阻止这种强度变化的影响，甚至可能会放大这种干扰。针对此类问题，本文所提出的自适应映射算法可以有效抑制因干扰而出现的信号波动，不管面部光照如何变化，信号都能保持在一段稳定的区域内。

如果分别用 R，G，B 代表一个像素中三个对应通道的像素值，那么该像素点的亮度 Y 可以表示为

$$Y=0.299R+0.587G+0.114B \tag{2}$$

其中，$0\leqslant Y\leqslant 255$，$Y=0$ 表示极暗，$Y=255$ 表示极亮。

由公式(1)可知，从面部视频采集到的信号与外部的光照强度成正相关的关系，即光照越强，采集到的生理信号波动越强，同样的，干扰噪声也就越大。同时文献[11]也提出，采集到的 iPPG 信号中的直流分量占比约 90%，而本文所需的生理信号只在占比约 10%的交流分量中。在光线不足时摄像头只能采集到微弱的漫反射信号；而在特别明亮的环境下，摄像头容易发生饱和，降低图像的采集质量，影响信号的信噪比。在多次实验中，本文发现采集图像的平均亮度在 140～160 时，根据图像信息提取出的心率结果准确率较高，因此算法会将亮度过暗或者过亮的图像映射到合适的亮度区间。另外，在采集时可能出现因外部干扰而产生的面部光照变化，但是在这个过程中，背景的亮度并不会发生显著的改变，所以算法的映射区间还取决于背景亮度。

算法使用脸部像素点的平均亮度 Y_{face} 来表示面部的光照情况，使用背景像素点的平均亮度 Y_{back} 来表示背景的光照情况，将映射后图像的亮度区间表示为 S。当背景与人脸亮度相差过大，即：

$$|Y_{face}-Y_{back}|\geqslant\frac{Y_{back}}{4} \tag{3}$$

此时区间 S 为

$$S=\begin{cases}[0.95Y_{back},1.05Y_{back}], & 140\leqslant Y_{back}\leqslant 160\\ [140,160], & \text{其他}\end{cases} \tag{4}$$

当背景与人脸亮度相差不大，即：

$$|Y_{face}-Y_{back}|<\frac{Y_{back}}{4} \tag{5}$$

此时，区间 S 为

$$S=\begin{cases}[0.75Y_{back},0.8Y_{back}], & Y_{back}>170\\ [1.3Y_{back},1.42Y_{back}], & Y_{back}<130\end{cases} \tag{6}$$

假如区间 S 的上限为 S_{max}，下限为 S_{min}，图像中提取到的原始像素数据为 Y，其中最大值为 Y_{max}，最小值为 Y_{min}，映射后输出的像素结果为 F，则对图像通道中坐标为(x,y)的像素进行映射的函数如下：

$$F(x,y)=\frac{(Y(x,y)-Y_{min})(S_{max}-S_{min})}{Y_{max}-Y_{min}}+S_{min} \tag{7}$$

使用如上的映射关系对图像进行映射操作，一方面可以保证在较亮或者较暗的均匀光照条件下，处理后的图像数据更适合进行信号的提取；更重要的是，如果在测量过程中发生因外部干扰而产生的面部亮度变化，可以从图像上减弱相关的变化，抑制因干扰而产生的较大信号波动，提高信号质量。使用算法后的效果图如图 2 所示。

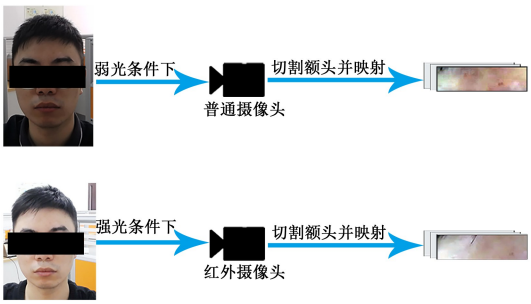


图 2　不同环境下自适应映射算法的效果图

同时，考虑到在极端昏暗条件下被采集图像的亮度趋向于0，此时人脸检测大概率会失效。即便可以正常检测并提取出感兴趣区域的变化信号，在进行如上的自适应映射之后也不能保证高信噪比的信号提取。当普通摄像头采集到光强阈值以下的图像时，系统会启动红外摄像头进行图像的采集，如公式(8)所示，其中 T 为亮度阈值。

$$Y_{face}+Y_{back}\leqslant T \tag{8}$$

此时红外摄像头接替普通摄像头进行图像采集工作，而普通摄像头作为辅助工具进行亮度的测量，每隔一段时间采集一次图像的亮度并代入公式(8)，直到亮度超出阈值，才会关闭红外摄像头，全程开启普通摄像头。这样操作可减少数据的存储和传输量，加速程序的运行。在极端黑暗的情况下使用红外摄像头的效果图如图3所示。

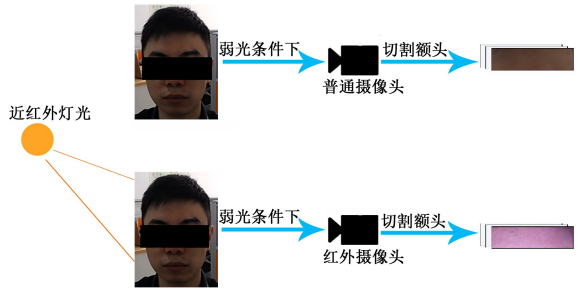


图3 黑暗环境下红外摄像头的效果图

1.5 信号质量评估算法

上述所使用的自适应映射算法可以在图像层面上抑制因干扰而产生的信号波动，但是经过相应处理后提取的iPPG信号仍会有不同频率的噪声。鉴于心率所在的频段为0.8～2.5 Hz，所以对信号进行相应频段的CWT后得到脉搏波，效果如图4。

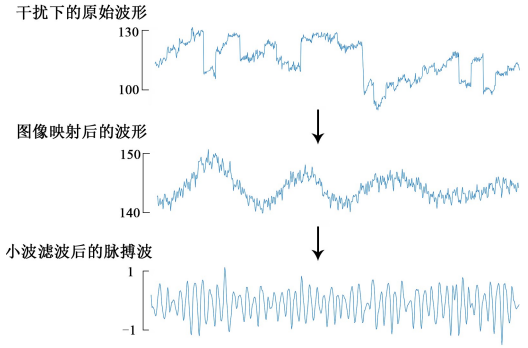


图4 自适应映射算法效果图

在经过CWT去噪后，如何稳定、准确地进行心率估计也成为本文的研究对象。通过脉搏波进行心率估计有两种方法，一是计算时域内信号峰值的个数，二是通过FFT计算出能量最大值点对应的频率值，然后将其转换为心率值。不管是那种方法，准确度都取决于信号的质量。因此，本文还提出了一种信号质量评估算法以获取合格的子带脉搏波信号，进一步提高心率提取的准确度。

首先利用FFT处理iPPG信号以得到信号的频谱，接着在脉搏波信号的频域波形中检测出两个最大能量点 P_{max1} 和 P_{max2}，分别保存为坐标(f_1，h_1)和(f_2，h_2)，如图5所示。本文通过这两个坐标来衡量信号是否合格，可以确定以下条件：

$$\begin{cases}0.8\ \text{Hz}<f_1<2.5\ \text{Hz}\\0.8\ \text{Hz}<f_2<2.5\ \text{Hz}\\h_1>h_2\end{cases} \tag{9}$$

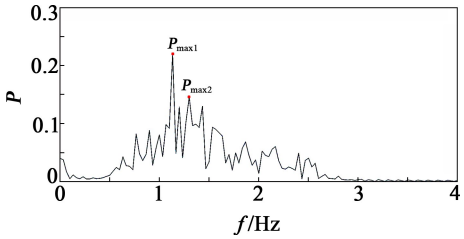


图5 对脉搏波频域信号进行质量评估

在受到干扰的情况下，频域中会存在多个峰值。如果两个最大峰的振幅差距较大，说明能量集中，可以认为干扰较弱；另外，如果两个最大峰的频率相邻，则可以认为在检测过程中测试者的心率发生了细小的变化，但结果在误差内。因此满足信号评估的条件如下所示，当信号频域中的两个最大能量点满足公式(10)中的任意条件时，算法认为该脉搏波信号通过了信号质量评估。

$$\begin{cases}h_2<0.7h_1\\|f_1-f_2|<0.8\ \text{Hz}\end{cases} \tag{10}$$

在实际测量中，检测到的数据中可能会存在干扰较大及较小的数据段，而干扰较小的数据段更可能通过信号质量评估且估计出的心率也更准确。因此，本文采用滑动窗口来获取子信号进行质量评估，滑动窗口长度为 $L/2$，其中 L 为整个数据的长度；步进长度为30，即一秒钟能够采集的数据长度。当子信号未通过质量评估时，算法会将窗口滑动到下一个子信号进行评估，直到获得一个合格的子信号。对评估合格的子信号直接使用FFT得到心率估计结果。如果原始的脉搏波信号无法提取出符合条件的子信号，算法会分别估计原始信号的FFT估计值和峰值估计值，对比输出心率的结果。算法流程图

如图 6 所示。

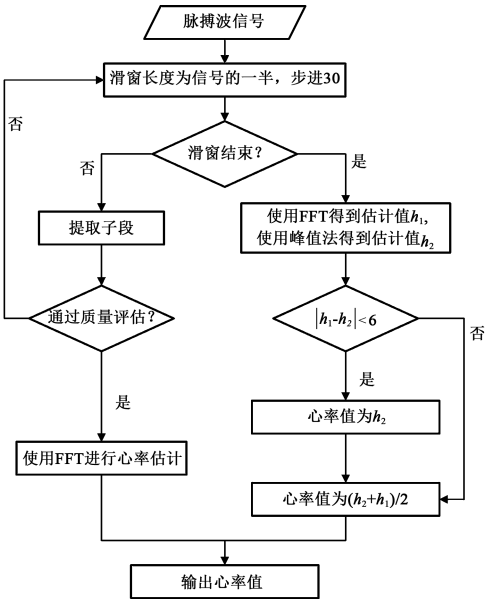


图 6　信号质量评估算法及心率估计算法流程图

2　心率测量系统的设计与实现

2.1　系统总体介绍

现有的许多心率提取算法依靠计算机强大功能对录制好的视频数据进行处理，从工程的角度来看，这导致了逻辑资源及成本的浪费；从实用性的角度来看，这样的方法操作复杂，缺乏实时性。现在许多手机上也集成了心率提取的 APP，弥补了上述的缺点，但是手机端的可拓展性低，无法连接像红外摄像头这样的额外设备，且估计出的心率结果受限于手机的性能，准确度较低，鲁棒性较差。本文所使用的嵌入式系统成本低、性能优秀、拓展性高、可剪裁性好。它可以连接多个外设，在确定了所用的设备之后就可以对系统进行功能及体积的剪裁。如果能够在该平台上实现算法相应的功能，就可以往更低成本和更小体型上进行优化[12]。因此本文搭建了一个嵌入式平台来实现所设计的心率提取算法。

该系统共分为三个模块，分别为算法处理模块、视频采集模块及显示模块，如图 7 所示。算法处理平台基于 Zynq UltraScale＋MPSoC 系统架构，具有丰富的逻辑资源，在图像处理方面具有天然的应用优势，适合本设计；视频采集模块使用双摄像头，其中普通摄像头为使用 MIPI 接口的 OV5640，红外摄像头为 USB 接口的 RMONCAM，设置两个摄像头皆为 720P 的分辨率及 30 帧/秒的帧率；显示模块使用 HLJ20 显示屏，通过 HDMI-DP 接口与开发板连接。

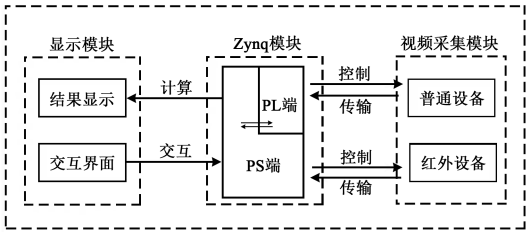
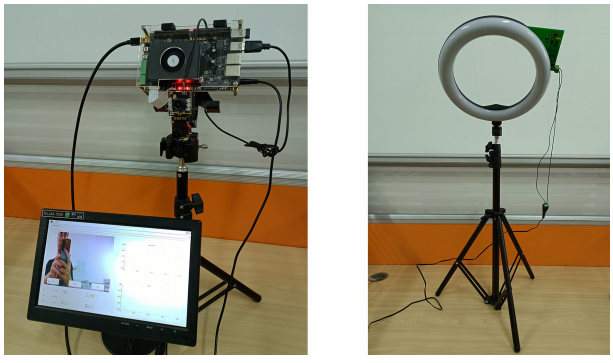


图 7　系统总体框图

板卡的可编程逻辑（Programmable Logic，PL）端主要实现普通摄像头的数据传输，使用摄像头采集人脸图像数据经过格式转换后存入 DDR4 中，之后由处理系统（Processing System，PS）端读取图像数据并进行相关的算法流程，同时 PS 端可以直接控制红外摄像头的运行状态。普通摄像头与红外摄像头占用不同的数据传输通道，保证了数据传输的可靠性。为了系统的可视化，在 Linux 端下使用 QT 制作交互界面完成了算法流程，并在板卡上移植操作系统。最后只要启动板卡便可以在显示屏上显示 QT 的人机交互界面，便捷地控制系统输出测试者的图像信息及心率变化信息。总体系统见图 8(a)，为了能够展示在不同光照干扰下算法的鲁棒性，实验中使用图 8(b)所示灯光模块添加外部的光干扰。



(a) 心率测量系统　　(b) 外部光干扰模块

图 8　整体系统实物图

2.2　算法实时性优化

在视频图像数据的实时传输和显示中，为了防止因为二者数据流速率偏差而引起的图像撕裂等问题，在进行存储时，系统将存储空间分为两个子空间进行存储。每个子空间存储一帧数据，设置标记变量判定是否存储完成，以保证各帧之间切换时无明显痕迹。

在人脸检测方面，本文使用自己编译的轻量型

引擎 SeetaFace，并且封装为函数进行调用，每次调用结束就销毁多余数据，减少冗余，提高检测速度；在数据处理时，算法开辟新的线程，主线程执行人脸识别操作及图像亮度判定，新线程负责图像的自适应映射、信号提取及质量评估工作，两者并行处理数据，加快心率提取的速度。

3 实验结果与分析

3.1 实验准备

本文共对 8 个测试者(5 名男性，3 名女性)进行心率估计的实验，测试环境选在室内，在自然灯光下且保证均匀照射人脸。摄像头模块距离人 0.3 m，外部灯光照射模块距离人 0.4 m。参与者被要求盯着摄像头，以及做到戴着接触式测量仪器 FS20E 的手部保持静止。每个实验者需要对心率参数进行连续 5 次的测量，并记录测量结果。同时将接触式测量仪器的心率结果作为相应的真值。

实验中设计了四种干扰下的场景，分别为：

场景 1：正常光照下，测试者静止，外部灯光直射人脸造成面部不正常的高亮；

场景 2：正常光照下，测试者静止，外部灯光在人脸后照射，造成面部不正常的昏暗；

场景 3：正常光照下，外部灯光在侧面照射，同时测试者间歇性的左右移动，造成面部光照变化；

场景 4：黑夜情况下，测试者静止，无外部光照。

同时作为对比，本文选择了多个现有的信号处理算法进行同样场景下的心率提取实验，分别为基于色度的图像信号映射算法(CHROM)、基于皮肤正交的图像信号映射算法(POS)以及基于面部图像信号的子带小波滤波方法(SB-CWT)。这些方法被集成到板卡上进行测量，然后将结果与接触式测量仪器进行对比，使用平均绝对误差 M(Mean Absolute Error，MAE)和均方根误差 R(Root Mean Squared Error，RMSE)作为误差衡量标准。心率测量值 y_i 和真值 y'_i 的两种误差计算公式如下：

$$M=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}|y_i-y'_i| \tag{11}$$

$$R=\sqrt{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(y_i-y'_i)^2} \tag{12}$$

3.2 实验结果

使用四种方法对八名测试者在四种场景下进行多次的心率提取实验，并将几种算法的估计结果与心率真值进行误差对比。各算法的性能结果如表 1 所示。

表 1 不同场景下各算法的性能分析

场景	方法	M/(b/m)	R/(b/m)
场景 1	CHROM	5.12	9.20
	POS	5.51	9.13
	SB-CWT	4.26	7.72
	本文	3.32	6.03
场景 2	CHROM	6.13	10.23
	POS	6.42	11.07
	SB-CWT	3.81	7.94
	本文	3.19	5.62
场景 3	CHROM	7.02	11.71
	POS	5.76	9.76
	SB-CWT	3.36	6.34
	本文	2.78	4.89
场景 4	CHROM	x	x
	POS	x	x
	SB-CWT	x	x
	本文	2.39	4.08

所有场景的测试结果分为两类，一种是在外部环境光或测试者运动的干扰情况下，对应场景 1，场景 2 和场景 3。因为出现运动伪影或光线变化时，原脉搏波信号很容易被影响且很难将干扰量分离，所以在这些变化的场景中，其他方法的鲁棒性较差。而本文所提出的算法在图像层面及心率提取算法层面抑制了相关的干扰变化，与其他算法相比有更好的性能提升。在另外的黑暗场景下，使用普通摄像头很难捕捉到测试者图像，所以其他算法也难以估计出相关的心率结果。本系统将普通摄像头与红外摄像头结合，能够正常检测到目标并且输出准确率较高的心率结果。表 1 的结果符合算法设计的预期，也很好地验证了本文算法的心率估计性能。

3.3 实时性分析

为了验证系统的实时性，对比了本文算法在嵌入式平台上与现有算法在拥有六核的 i5-10400 CPU 以及 16 GB 内存的 PC 平台上使用 Visual Studio 进行心率估计的时间对比。整段视频心率估计时间与连续心率估计时间间隔的对比结果如表 2 所示。

表 2 不同平台下算法处理情况

估计方式	处理平台	时间/s
20 s 视频估计	PC	120.81
	Zynq	20.22
连续心率估计	PC	0.17
	Zynq	0.03

结果表明，本系统通过硬件配置优化以及算法并行、数据结构优化等操作，使得两次心率结果输出间隔仅为 0.03 s，对比摄像头 30 f/s 的速率，实现了实时的心率结果输出，在实时性上优于现有算法。

4　结论

针对 iPPG 方法在现实生活中易受环境光及运动变化干扰的问题，本文提出了一种自适应心率提取算法，包含针对图像采集的自适应映射算法以及针对心率提取的信号质量评估算法，从图像和信号两方面提高了心率采集的准确度；同时算法也和近红外摄像头相结合，实现了黑暗环境下的心率提取。在此基础上，本文设计并实现了一种基于 Zynq 的双摄像头的实时心率采集系统，满足系统在多个场景下的高性能使用及可视化输出。实验结果表明，所设计的系统具有较强的抗干扰能力，能够在不同的外部条件下对测试者进行可靠的心率估计，在满足实时性、准确性的同时硬件资源消耗较少，验证了系统的正确性和实用性。

参考文献：

[1] Rouast P V, Adam M, Chiong R, et al. Remote heart rate measurement using low-cost RGB face video: a technical literature review[J]. Frontiers of Computer Science, 2018, 12(5): 858-872.

[2] Umar A H, Othman M A, Harun F K C, et al. Dielectrics for non-contact ECG bioelectrodes: A review [J]. IEEE Sensors J., 2021, 21(17): 18353-18367.

[3] 陈　辉，郑秀娟，倪宗军，等. 基于面部视频分析的生命体征检测[J]. 北京航空航天大学学报，2020，46(9)：1770-1777.
Chen Hui, Zheng Xiujuan, Ni Zongjun, et al. Vital signs detection via facial video analysis[J]. J. of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(9): 1770-1777.

[4] Berwal D, Vandana C R, Dewan S, et al. Motion artifact removal in ambulatory ECG signal for heart rate variability analysis[J]. IEEE Sensors J., 2019, 19(24): 12432-12442.

[5] Chen Xun, Cheng Juan, Song Rencheng, et al. Video-based heart rate measurement: recent advances and future prospects [J]. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(10): 3600-3615.

[6] Haan D G, Jeanne V. Robust pulse rate from chrominance-based rPPG[J]. IEEE Trans. on Biomedical Engineering, 2013, 60(10): 2878-2886.

[7] Fingar M, Podraj P. A wavelet-based decomposition method for a robust extraction of pulse rate from video recordings[J]. Peer J., 2018, 6: 1-26.

[8] Ryu J, Hong S, Liang S, et al. A new framework for robust heart rate measurement based on the head motion state estimation[J]. IEEE J. of Biomedical and Health Informatics, 2021, 25(9): 3428-3437.

[9] Li J Q, Chen Z Z, Huang L X, et al. Automatic classification of fetal heart rate based on convolutional neural network[J]. IEEE Internet of Things J., 2019, 6(2): 1394-1401.

[10] 葛润林，林珊玲，林志贤，等. 基于 FPGA 的图像自适应 AWB 系统设计与实现[J]. 半导体光电，2022，43(2)：377-382.
Ge Runlin, Lin Shanling, Lin Zhixian, et al. Design and implementation of FPGA-based image adaptive AWB system [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(2): 377-382.

[11] 万　青. 基于面部视频的非接触式心率检测研究[D]. 合肥：安徽大学，2020.
Wan Qing. Research of non-contact heart rate detection based on facial videos[D]. Hefei: Anhui University, 2020.

[12] 经　力. 基于视频的非接触式多生理参数监测系统研究[D]. 西安：西安电子科技大学，2021.
Jing Li. Research on non-contact multiple physiological parameters monitoring system based on video [D]. Xi'an: Xidian University, 2021.

作者简介：

徐　杰(1997—)，男，江苏省无锡市人，硕士研究生，2020 年于苏州大学获学士学位，主要从事嵌入式 Linux 系统的研究；

胡丹峰(1978—)，男，安徽省蚌埠市人，硕士，副教授，主要研究领域为嵌入式系统应用和生物医学信号处理。