

文章编号 1004-924X(2015)增-0652-09

## 基于面部图像的心率测量系统

吕 扬, 刘 杰\*

(吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130026)

**摘要:**研究了非接触式心率采集方法,设计了基于脸部图像处理的心率测量系统。利用该系统分两步完成了对人脸部分区域图像的视频采集和处理。第一步,对单幅图像进行处理。首先建立一个非彩色模型对原始图像进行颜色校正,去除光线带来的干扰;然后,利用直方图和脸部特征定位样本区域;在空间域和时间域上对图像进行增强,将窄带灰度输入值映射到宽带输出值,并将照射分量与反射分量分离,进一步去除光线照射不均带来的干扰;最后求出单幅图像的反射均值。第二步,采用小波变换和 Hilbert 算法对所有图像均值构成的曲线进行处理,消除波形的基线漂移,并使 R 波更容易被检测到,最后得到心率值。多条件下的实验结果表明:光线充足的情况下,测得的心率误差不大于 8%;光线较差的情况下,心率误差不大于 20%;基本上实现了通过采集人脸区域光线变化计算心率的功能要求。由于摄像头采集速率的限制,在满足信号完整性的情况下,系统的实时性为每 5 s 更新一次。

**关键词:**人脸图像;图像处理;视频采集;心率采集;算法设计;反射均值;抗干扰设计

**中图分类号:**TH773;TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152313.0652

## Heart rate acquisition system on facial image

LÜ Yang, LIU Jie\*

(College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China)

\* Corresponding author, E-mail: l\_jie@jlu.edu.cn

**Abstract:** The extent of face absorption light changing along with the heart beat rate was verified, and a heart rate acquisition system based on the facial image processing was designed. Human face images were sampled in a video form by the system and they were processed in two steps. The first step was the processing of a single image. Firstly, an achromatic color model was built to correct the color of the original image and to remove the interference from light brings. Then, the sample area was positioned using a histogram and facial features, and the image was enhanced in space and time domains. Furthermore, narrowband gray input values were mapped to the output value broadband and to separate the illumination component and the reflection component, so the interference caused by uneven light irradiation could be further erased. Finally, the mean reflection of single image was calculated. In the second step, the wavelet transform and Hilbert algorithm were used to process the mean curve consisting of all the images and to eliminate the baseline drift wave, making the R wave more likely to be detected and to get the heart rate finally. Experimental results under many conditions show that the heart rate error is no more than 8% under a good light condition, and that is no more than 20% at

收稿日期:2015-06-05;修订日期:2015-06-21.

基金项目:吉林省科技发展计划项目重大科技专项(No. 20116014)

a poor light condition. Basically, the system achieves the functional requirement of the heart rate calculation by sampling the light of some face region changes. Due to limitations of the camera sampling rate, the real-time performance of the system is updating every 5 s in the case of signal integrity ensured.

**Key words:** facial image; image processing; video acquisition; heart rate acquisition; algorithm design; mean reflection; anti-jamming design

## 1 引言

心率数据在诸多方面表现出极大价值。一般情况下测量心率采用计数方法,使用仪器测量时需要在特殊部位贴电极,这种方法在很多情况下不方便,比如对于婴幼儿、运动员在运动过程中的心率测量。因此,基于视频采集心率的研究应运而生。

国内外对视频采集心率的研究不多。麻省理工大学一位研究生提出了使用摄像头从所有光线中分辨出与心跳相关的反射光线,然后得到心血管信息,但并没有形成研究成果。Takano C 等<sup>[1]</sup>提出了一种设计方案,其用 CCD 摄像机捕捉人脸特定目标区域的时滞视频图像后,依次通过微分、低通滤波和 6 阶自回归分析等信号处理手段,在信号频谱能量最大的两个频段处获取呼吸和心率。然而,由于视频信号非常容易混入噪声,加上该算法存在局限性,最后的检测结果往往不甚理想。部分研究者将去除随机扰动<sup>[2]</sup>的思路应用于图像检测,但是如何去除摄像头带来的噪声成为限制该方法的主要障碍。也有人提出将人工智能技术中的模糊逻辑理论的生体信号分析算法<sup>[3]</sup>应用于心率检测领域,但由此建立的模型和算法更加复杂,实现更加困难。Runrastic 公司在 IOS 系统手机端开发了一款摄像头采集心率的软件,通过对录制的视频进行处理,得出心率,但是实时性较差、误差较大。

在上述研究背景下,本文提出一种移动端基于视频采集脸部皮肤图像进行心率测量的方法。本文系统设计在 PowerPC 上完成颜色校正、人脸检测算法,对图片进行初步处理后,通过 PCIe 总线将数字化之后的图像传给现场可编程门阵列(FPGA)。FPGA 的主频为 300 M,其用于完成对数变换、傅里叶变换、空间域和频率域增强、分离照射分量和反射分量算法,再将处理后的单幅

图像传回 PowerPC。PowerPC 完成最后的小波变换、Hilbert 等算法。PowerPC 端运行实时操作系统 VxWorks,与 FPGA 共同完成信号处理。系统的创新点在算法设计和硬件设计方面。

## 2 可行性与原理分析

### 2.1 血液吸收光谱分析

通过查阅血液和光谱等相关医学文章可以了解到,血液会吸收红外光谱<sup>[4]</sup>。在实验室,使用加拿大的傅立叶中红外光谱仪 MB3000 对 4 种不同血型的血液进行了光谱分析。光源为实验室自制的中红外波段可以逐步调节的光源,光探测器采用 CCD 传感器。实验结果显示,虽然血液成分不同吸收的光谱不一样,但是 4 种血液吸收光谱后形成的曲线走向大致相同。选取其中一张光谱吸收图如图 1 所示,图中横轴坐标单位为波数  $\nu$ ,纵轴表示透过率  $T$ 。

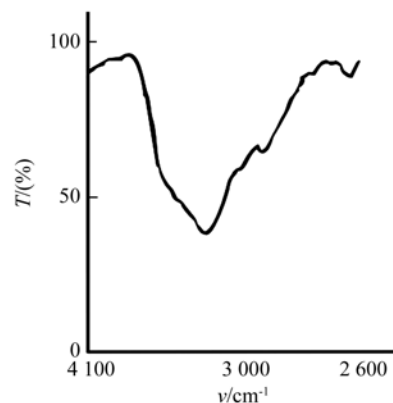


图 1 血液吸收光谱图

Fig. 1 Blood absorption spectrum

在实验结果中可以看出血液对波数在  $3\ 300\ cm^{-1}$  左右的光谱吸收较多,处于中红外光谱范围之内,而对其他波数的光谱吸收较少。心脏舒张跳动时,大量血液会经过血管流向各处,通过血管

的血液量越大,被血液吸收的光线也越多。由于人脸区域遍布毛细血管末梢,对光线吸收程度相对较大。

## 2.2 图像采集算法设计分析

用  $f(x, y)$  二维函数形式表示图像,  $x$  与  $y$  表示坐标,  $f(x, y)$  表示该坐标的值,这里定义为图像的强度。灰度级  $L_0$  等于图像的在  $(x_0, y_0)$  处的强度:

$$L_0 = f(x_0, y_0). \quad (1)$$

$f(x, y)$  正比于物理源辐射的能量<sup>[5]</sup>,本设计中主要涉及光能,由于光的散射和折射情况不容易采集和处理,并且对结果影响不大,所以不予考虑。 $f(x, y)$  的值主要由两个分量决定:(1)入射到皮肤表面的光源总量;(2)皮肤反射光的总量。亮度分量和反射率分量分别用  $i(x, y)$  和  $r(x, y)$  表示,有:

$$f(x, y) = i(x, y) \times r(x, y), \quad (2)$$

其中,  $0 < i(x, y) < \infty$ ;  $0 < r(x, y) < 1$ 。

## 3 关键算法设计

### 3.1 系统算法模型

为了得到皮肤吸收光线变化曲线,建立 XYZT 四维和 MN 二维两个坐标系。X 轴与 Y 轴定位像素的位置,Z 轴表示定位像素点的灰度级,T 轴表示时间。此模型可以描述某一像素点或者完整图像的灰度级随时间变化的规律。

根据四维坐标系获得 MN 坐标系下描述心率变化的曲线, $m$  坐标表示时间, $n$  坐标表示小范围内灰度相对变化值。

通过图像处理、信号完整性等算法设计,完成 XYZ 坐标系向 N 坐标系、T 坐标系向 M 坐标系的转换。

### 3.2 单幅图像的处理

#### 3.2.1 图像颜色校正

对于室内外场景来说,照明的光谱特性取决于物体是照射在日光下还是处于阴影中,或者晴天还是阴天,甚至是一天中不同的时间。

综合考虑使用环境和使用方法等因素后,设计的算法不需要估计照明的完整光谱,只需去掉光照变换对图像的影响即可。该方法比需要使用标准色板进行校正的方法更加方便。通过转换图像中每个像素点的 RGB 值来去除光照变换的影

响。由于摄像头的光谱分布是由反射率和光照分布产生的,所以确定一个对角矩阵,对角线上的元素分别与 R、G、B 分量成比例。

建立一个简单的模型<sup>[6]</sup>,假设平均图像是非彩色的,意味着图像中颜色的平均是灰色,则由图像中 R、G、B 分量的平均值可以得到光照颜色。通过除以平均值并且乘以比例系数确保所有像素值均在允许的范围内进行颜色校正。

$$\begin{cases} \hat{R} = kR/\mu_R \\ \hat{G} = kG/\mu_G, \\ \hat{B} = kB/\mu_B \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $\hat{R}$ 、 $\hat{G}$ 、 $\hat{B}$  是图像校正后的颜色分量,比例系数  $k$  取值为:

$$k = V \min \left\{ \frac{\mu_R}{\max_{x,y}(R)}, \frac{\mu_G}{\max_{x,y}(G)}, \frac{\mu_B}{\max_{x,y}(B)} \right\}, \quad (4)$$

其中,  $V = 2^N - 1$ ,  $0 < N < 255$ 。

#### 3.2.2 截取脸部皮肤样本

选取眼睛以下,鼻子左侧皮肤平坦区域作为图像采集目标。

设计基于直方图粗分割和奇异值特征的人脸检测方法<sup>[7]</sup>。该方法根据人脸在灰度值基本均匀的特征,首先根据平滑的直方图对图像进行粗分割,然后根据眼睛、鼻子和嘴的特征分别定位,完成采集区域的截取。

图像灰度级范围为  $[0, 255]$ ,经过数字化图像的直方图表示方法是离散函数:

$$h(r_k) = n_k, \quad (5)$$

其中,  $r_k$  是表示第  $k$  级灰度,  $n_k$  表示灰度级为  $r_k$  的像素个数。

用  $n$  表示图像像素总数,归一化的直方图表示为

$$P(r_k) = n_k/n, \quad (6)$$

其中,  $k=0, 1, \dots, 255$ 。

用高斯函数对直方图进行平滑处理,一维高斯模板为

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left\{ -\frac{x^2}{\sigma^2} \right\}. \quad (7)$$

用此模板对直方图进行卷积运算

$$\varphi(x) = h(x) * g(x), \quad (8)$$

对卷积结果按二次差分进行计算

$$\begin{aligned}\varphi' &= h(x) * \frac{dg(x)}{dx}, \\ \varphi'' &= h(x) * \frac{d^2g(x)}{dx^2}.\end{aligned}\quad (9)$$

根据结果求峰值的集合:

$$\{x_i \mid \varphi'(x) = 0, \varphi''(x) < 0\}.\quad (10)$$

根据  $\varphi(x)$  估算  $\sigma_i$  的值, 得到图像粗分割的区间:  $(x_i - 3\sigma_i, x_i + 3\sigma_i)$ ,  $i=0, 1, \dots, 255$ 。

根据眼睛区域的灰度平均值小于脸部其他区域特征的特点, 进一步定位眼睛。通过嘴唇的颜色异于其他部位, 定位嘴唇。

检测脸部轮廓和定位眼睛、嘴唇后, 左眼以下, 嘴唇以上偏左, 脸部轮廓以里的区域按照长宽比为 1:2 的比例截取图像。

### 3.2.3 空间域增强图像

由于皮肤吸收光谱变换和图像变化规律并不明显, 在图像处理过程中需要对图像进行空间域增强, 形式如下:

$$s = T(r),\quad (11)$$

其中,  $s$  和  $r$  表示输出图像和输入图像在任意点  $(x, y)$  处的灰度级。

选用对数变换方式对图像进行处理, 对数变换可以使窄带低灰度输入图像值映射为宽带输出值, 即扩展被压缩图像中的暗元素。对数变换表达式为:

$$s = c \cdot \log(L + r),\quad (12)$$

式中  $c$  是一个常数,  $r$  与  $s$  取值区间为  $[0, 255]$ ,  $L$  为灰度级别。函数曲线如图 2 所示。

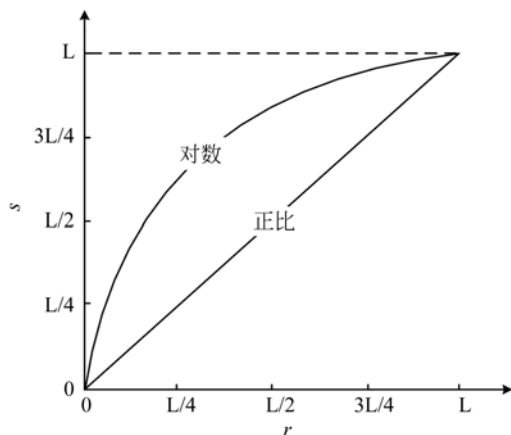


图 2 对数变换与正比变换曲线

Fig. 2 Logarithm and proportional transformation curves

### 3.2.4 频率域提取反射率分量

由式(2)可知, 一幅图像  $f(x, y)$  由反射率分量  $r(x, y)$  和亮度分量  $i(x, y)$  的乘积所得。图像直方图的波峰和波谷并不像反射函数直方图变化规律明显, 并且亮度分量易受环境变化影响。通过设置门限对反射分量和亮度分量进行分割, 可以更好地去掉干扰, 获得反射信息。

照射分量在空间域通常变化较慢, 而反射分量变化相对较快。皮肤表面图像像素点之间的反射函数是不同的, 可以用空间域反射分量的规律来描述。

直接对  $f(x, y)$  进行傅里叶变化时, 不能直接拆分两个分量。因此定义

$$z(x, y) = \ln f(x, y).\quad (13)$$

计算

$$\mathfrak{F}\{z(x, y)\} = \mathfrak{F}\{\ln f(x, y)\},\quad (14)$$

$$\mathfrak{F}\{z(x, y)\} = \mathfrak{F}\{\ln i(x, y)\} + \mathfrak{F}\{\ln r(x, y)\},\quad (15)$$

令  $Z(u, v)$ 、 $F_i(u, v)$  和  $F_r(u, v)$  分别是  $z(x, y)$ 、 $\ln i(x, y)$  和  $\ln r(x, y)$  的傅立叶变换。使用一个滤波函数  $H(u, v)$  处理  $Z(u, v)$ , 结果为  $S(u, v)$ 。

$$S(u, v) = H(u, v) Z(u, v).\quad (16)$$

滤波函数减少低频(亮度分量)成分, 将高斯型高通滤波器简单修改:

$$H(u, v) = (\gamma_H - \gamma_L)[1 - e^{-\alpha D^2(u, v)/D_0}] + \gamma_L,\quad (17)$$

其中,  $\gamma_H > 1$ ,  $\gamma_L < 1$ ,  $D(u, v)$  表示点  $(u, v)$  到图像中心点的距离,  $D_0$  表示截止频率,  $c$  为常数。

利用公式(16)在空间域中计算:

$$\begin{aligned}s(x, y) &= \mathfrak{F}^{-1}\{S(u, v)\} = \\ &\mathfrak{F}^{-1}\{H(u, v) F_i(u, v)\} + \mathfrak{F}^{-1}\{H(u, v) F_r(u, v)\}.\end{aligned}\quad (18)$$

假设有

$$i'(x, y) = \mathfrak{F}^{-1}\{H(u, v) F_i(u, v)\},\quad (19)$$

$$r'(x, y) = \mathfrak{F}^{-1}\{H(u, v) F_r(u, v)\}.\quad (20)$$

则公式(18)可以表示为:

$$s(x, y) = i'(x, y) + r'(x, y).\quad (21)$$

等式两边同时取指数, 求得符合要求的分离图像, 用  $g(x, y)$  表示处理后的图像:

$$g(x, y) = e^{s(x, y)} = e^{i'(x, y)} \times e^{r'(x, y)}.\quad (22)$$

分离之后, 反射分量为  $e^{r'(x, y)}$ 。得到反射分量之后, 依据公式、反射值和皮肤样本的像素点数求出

平均值,即反射均值。

### 3.3 连续图像的处理

#### 3.3.1 信号完整性设计

至此,基本完成了单幅图像的处理工作,接下来,需要将每帧图像连接起来,共同完成心率信号曲线。

假设心率信号类似于半个正弦信号,假设心率最快为 180 次/min,则信号周期最小为 0.33 s,为保证信号的完整性,信号每个周期采样点数应不少于 32<sup>[8]</sup>,综合考虑波形的完整性与系统的处理能力,这里选择 50 个点来保证信号的完整性。摄像头则需要每秒至少采集并传递 150 帧数据,由于摄像头采集速率在 30 frame/s 左右,故设计将 5 个周期归一,即第一秒采集的 30 帧从 150 的零点开始,第二秒采集的 30 帧从 150 的第 30 个点开始,以此类推,完成所需的 1 s 采集 150 帧的需求。因此系统的实时性表现在每 5 s 刷新一次心率数值。

#### 3.3.2 小波变换消除基线漂移

正常情况下,两个连续的 QRS 波群应当近似处在同一水平线上,但是由于人体呼吸运动、摄像头传感器温漂等因素,心电信号会发生明显的基线漂移现象。为此采用小波分解高尺度系数分解法(WTSE),即根据小波多分辨率分析特性<sup>[9-15]</sup>,将噪声信号进行高尺度分解,利用高尺度上的近似系数估计基线漂移。以 Sym10 为小波基,对连续化之后的心电信号进行 8 级分解,得到信号  $s = d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5 + d_6 + d_7 + d_8 + a_8$ 。图 3 为调用 Matlab 中 wavedec 函数进行分析。

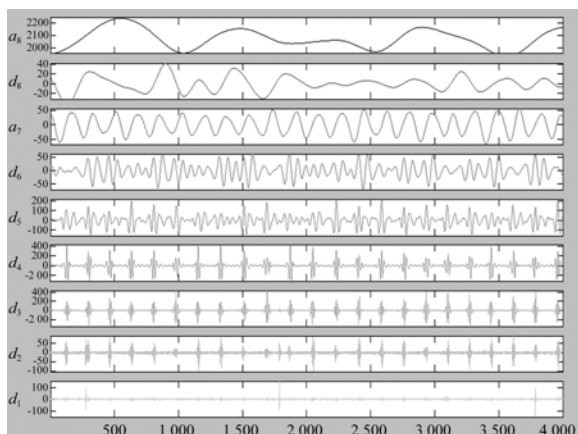


图 3 小波分解波形图

Fig. 3 Decomposition of wavelet waveform

#### 3.3.3 信号的分解与重建

通过 3.3.1 节的方式可以得到心电信号。心电信号所有的信息波段中,R 波最明显,所以通过检测每分钟内 R 波出现的次数来计算被测者的心率。

在上文进行小波分解与变换获取的心电信号  $s$  后,需要对其进行一阶差分运算:

$$y_n = x_{n+1} - x_n, (n = 1, 2, 3, \dots, N). \quad (23)$$

QRS 波具有较陡的上升、下降沿,经过差分后获得的波峰和波谷分别代表 R 波的上升沿和下降沿。而 R 波的峰值对应于峰谷之间的过零点。一阶差分相当于高通滤波器,差分之后可以进一步滤除高频等干扰信号,强化了 R 波的位置。

Hilbert 变换是一种线性变换,对于一个时域信号  $x(t)$ ,其 Hilbert 变换定义为

$$\hat{x}(t) = H[x(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \frac{1}{t-\tau} d\tau, \quad (24)$$

即  $x(t)$  与  $\frac{1}{t\pi}$  的卷积

$$\hat{x}(t) = x(t) * \frac{1}{t\pi}. \quad (25)$$

对公式(25)两边同时进行傅立叶变换:

$$F[\hat{x}(t)] = \frac{1}{\pi} F\left[\frac{1}{t}\right] F[x(t)] = -j \operatorname{sgn} \cdot F[x(t)], \quad (26)$$

其中  $\operatorname{sgn}$  为符号函数,其形式可表示为

$$\operatorname{sgn} f = \begin{cases} +1, & f > 0; \\ 0, & f = 0; \\ -1, & f < 0. \end{cases} \quad (27)$$

### 3.4 设置阈值计算心率

首先定位前 1 s 内经过变换后的信号最大值,并将其对应的采样时间作为阈值的始端,然后设置一个向后滑动的窗口,时间宽度为一个心电周期,大约为 0.4~1.2 s。经过 Hilbert 变换后对应 R 波峰值的是最明显的峰值,检测出窗口最大值的位置,即可获得 R 波所在  $m$  坐标。通过计算两个 R 波的时间间隔  $t$ ,即可获得心率值。

## 4 系统硬件设计

设计以 PowerPC 和 FPGA 为主的运行平台。PowerPC 硬件平台可以运行 VxWorks 系

统, VxWorks 系统是多任务实时操作系统, 能够同时完成控制摄像头、结果显示和数据传送。FPGA 主频可以达到 300 M, 完成复杂算法的实现。硬件系统框图如图 4 所示, 软件流程如图 5 所示。

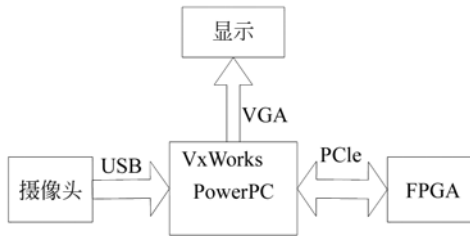


图 4 硬件系统框图  
Fig. 4 Hardware block diagram

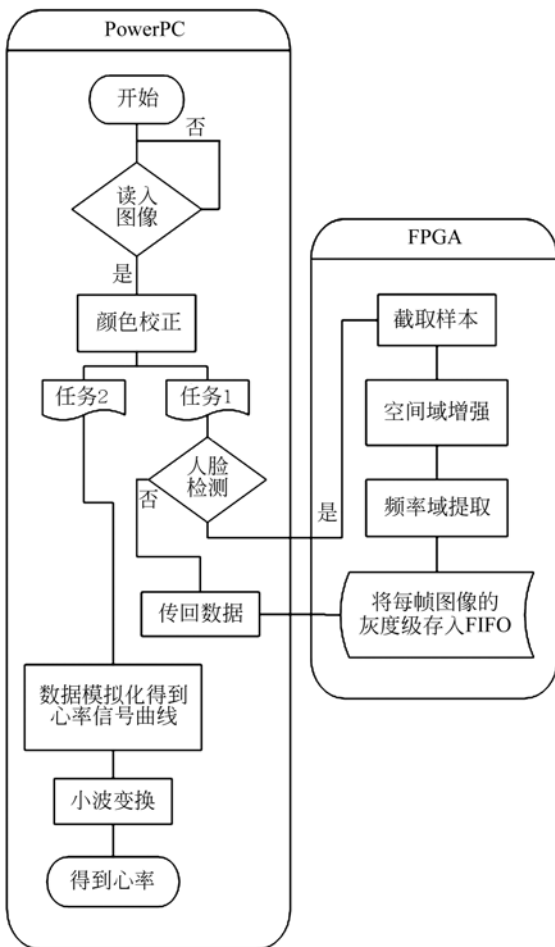


图 5 软件流程图  
Fig. 5 Software process diagram

### 5 实验过程

为了能够直观地观察结果, 并方便修改, 采用微软高清摄像头、计算机和 FPGA 图像处理板卡组建测试平台。通过 Matlab 软件完成 PowerPC 端的算法实现。

#### 5.1 算法验证试验

图 6 为使用人脸识别算法后的脸部定位和截取的样本图。

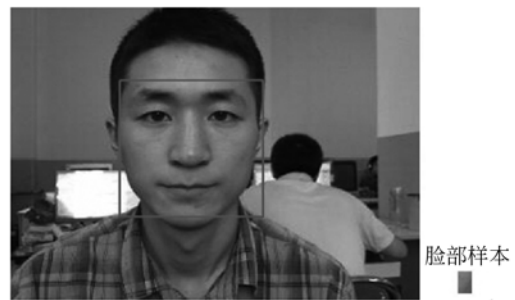


图 6 脸部定位及脸部样本  
Fig. 6 Face location and samples

为了分析算法的可行性, 在光线较好的情况下, 使用摄像头采集 20 s 视频, 由于计算机处理速度较慢, 将采集的帧数减为 0.3 倍。依据设计的算法进行处理。对未经过任何处理的 20 s 视频每一帧图像的脸部区域灰度值进行处理, 并画出曲线图, 如图 7 所示, 其中横坐标为帧数, 纵坐标为灰度值与 255 的比值。

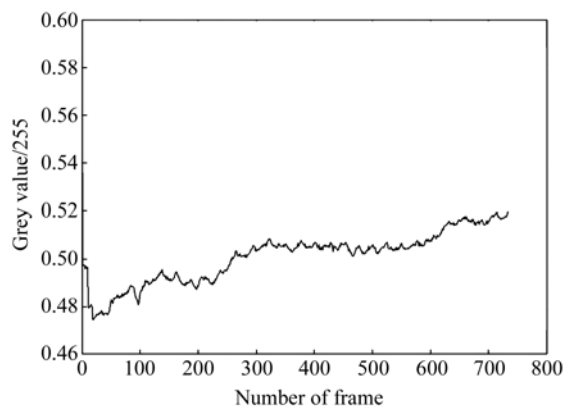


图 7 原始心率信号灰度曲线  
Fig. 7 Signal intensity curve of original heart rate

经过颜色校正后,灰度曲线变得平缓,初步去除了环境带来的干扰,曲线图如图 8 所示。

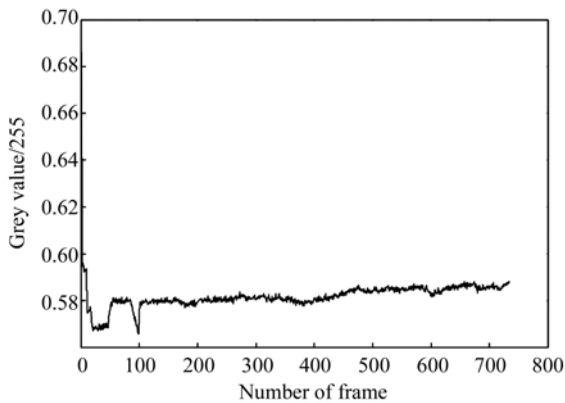


图 8 颜色校正之后的灰度曲线

Fig. 8 Signal intensity curve after color correction

使用对数方法在空间域内对图像进行增强,一定程度上压缩了图像像素值的动态范围。横坐标为帧数,纵坐标为图 7 纵坐标在 $[0, 0.6]$ 内的扩展。扩展之后信号曲线图如图 9 所示。

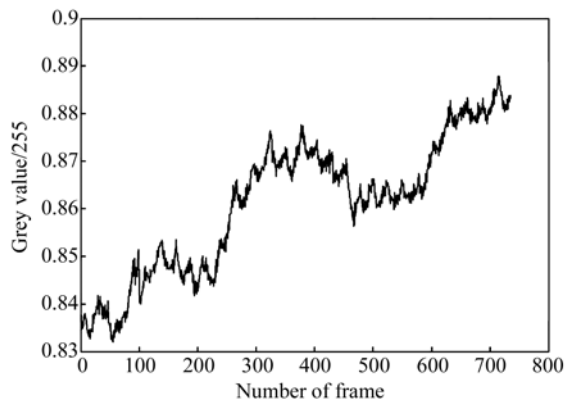


图 9 空间域增强后的信号曲线

Fig. 9 Signal curve enhanced in spatial domain

通过频率域分离照射分量和反射分量,同时进一步去除了照射不均带来的干扰。波形如图 10 所示。

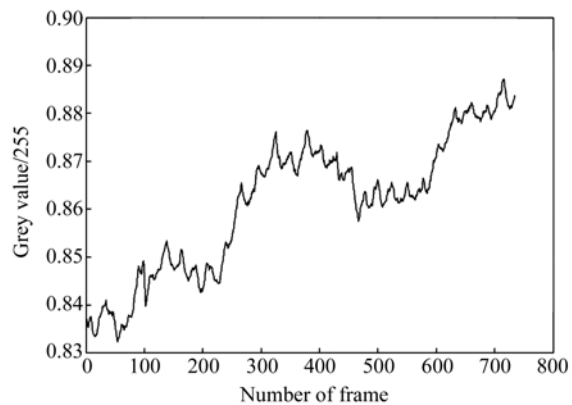


图 10 频率域提取反射分量后的信号曲线

Fig. 10 Signal curve extracted after reflection in frequency domain

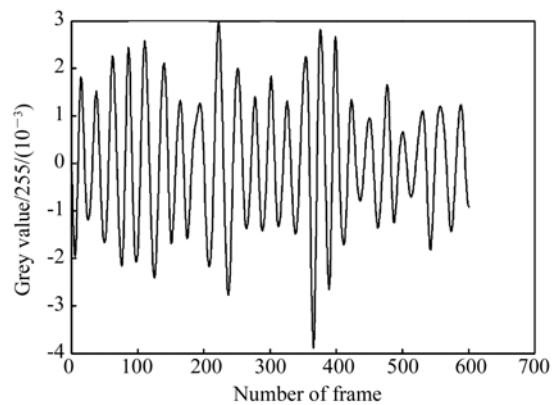


图 11 小波和 Hilbert 变换之后的信号曲线

Fig. 11 Signal curve after wavelet and Hilbert transform

人工计数得到实际测量结果,计算误差如表 1 所示。

表 1 晴天和阴天测量数据

Tab. 1 Testing datas of sunny days and cloudy days

测量结果		实际结果		误差/%	
晴天	阴天	晴天	阴天	晴天	阴天
66	75	68	70	2.9	7.1
63	55	64	65	3.1	15.3
72	66	69	70	4.3	5.7

### 5.2 多环境条件试验

分别在晴天和阴天两种情况下进行数据测量,得到每分钟的心跳次数,通过与测量过程同步

通过比较可以看出,系统在光照充足的情况下可以完成心率的测量,光照较差的情况下误差相对不理想。

## 6 结 论

本文设计了摄像头采集心率系统,可以非接触、简易地测量心率。一方面设计了一套算法,在一定程度上可以去除干扰,增强待测信号;另一方面简单介绍了系统的硬件组成,完成了向嵌入式设备、小型化设备的拓展。在计算机上实现并测试了算法的可靠性。实验结果表明,光线充足的情况下误差不大于 8%,光线差的情况下误差不大于 20%。

### 参考文献:

- [1] TAKANO C, OHTA Y. Heart rate measurement based on a time-lapse image[J]. *Medical Engineering & Physics*, 2007, 29(8): 853-857.
- [2] 张志祥. 间断动力系统的随机扰动及其在守恒律方程中的应用[D]. 北京:北京大学, 1998, 50-55.  
ZHANG ZH X. *Random Perturbations of Intermittent Dynamical Systems and its Application in Conservation Laws Equations*[D]. Beijing: Peking University, 1998, 50-55. (in Chinese)
- [3] 杨福生, 吕扬生. 生物医学信号的处理和识别[M]. 北京:中国中医药出版社, 2001.  
YANG F SH, LV Y SH. *Processing and Recognition of Biomedical Signal*[M]. Beijing: Chinese Medical Press, 2001. (in Chinese)
- [4] 王乐新, 赵志敏, 姚红兵, 等. 血液的红外吸收光谱分析及应用研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2002, 22(6): 980-982.  
WANG L X, ZHAO ZH M, YAO H B, et al.. Infrared absorption spectrum analysis and its application to blood[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*. 2002, 22(06): 980-982. (in Chinese)
- [5] GONZALEZ R C, WOODS R E. *Digital Image Processing* [M]. 2nd Edition. RUAN QQ Transl. Beijing: Electronic Industry Press, 2003.
- [6] BAILEY D G. *FPGA-based Embedded Image Processing System Design*[M]. YUAN K, HE WB, XIAO H Transl. Beijing: Electronic Industry Press, 2013.
- [7] 赵东方, 杨明, 邓世涛. 几种人脸检测算法的对比研究[J]. *内将科技*, 2011, 10: 95-99.  
ZHAO D F, YANG M, DENG SH T. Comparative study of several human face detection algorithm[J]. *Neijiang Technology*, 2011, 10: 95-99. (in Chinese)
- [8] OPPENHEIM A V, WILLSKY A S. *Signals & Systems* [M]. 2nd Edition, Beijing: Electronic Industry Press, 2011.
- [9] 陈春晓, 刘建业. 基于小波变换的心电信号去噪处理[J]. *生物医学工程学杂志*, 2004, 21(1): 89-92.  
CHEN CH X, LIU J Y. An approach based on wavelet transform to removal of noises[J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2004, 21(1): 89-92. (in Chinese)
- [10] GE ZH X, SHA W. *Wavelet Analysis Theory and MATLAB R2007 Realization*[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2007.
- [11] BURRUS C S, GOPINATH R A. *Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms*[M]. Beijing: Machinery Industry Press. 2007
- [12] PENG Y Y. *Wavelet Analysis in a One-dimensional Signal Denoising*[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010.
- [13] 王国恩, 李静, 厉春生. 小波变换在信号去噪方面的应用研究[J]. *舰船电子工程*, 2008, 28(11): 80-83.  
WANG G E, LI J, LI CH SH. Research on the application of wavelet transform in terms of denoising of signal[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2008, 28(11): 80-83. (in Chinese)
- [14] 胡俊文, 周国荣. 小波分析在振动信号去噪中的应用[J]. *机械工程与自动化*, 2010(1): 128-130.  
HU J W, ZHOU G R. Application of Wavelet analysis in vibration signal denoising [J]. *Mechanical Engineering and Automation*, 2010(1): 128-

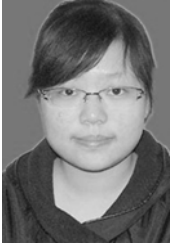
130. (in Chinese)

- [15] 曹亚君, 陈树宁. 一种基于小波分析的阈值去噪算法[J]. 无线互联科技, 2014(9):132-133.

CAO Y J, CHEN SH N. An analysis based on

wavelet threshold denoising algorithm[J]. *Wireless Internet Technology*, 2014(9):132-133. (in Chinese)

#### 作者简介:



吕 扬(1990—),女,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,2013年于吉林大学获得学士学位,主要从事近红外仪器硬件方面的研究。Email: 40530642@qq.com

#### 导师简介:



刘 杰(1969—),女,吉林长春人,副教授,1991年于吉林工业大学获得学士学位,1994年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事光电传感仪器的研究。Email: l\_jie@jlu.edu.cn