



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109793506 A

(43)申请公布日 2019.05.24

(21)申请号 201910046723.8

(22)申请日 2019.01.18

(71)申请人 合肥工业大学

地址 230009 安徽省合肥市屯溪路193号

(72)发明人 杨学志 李江山 吴秀 方帅

金兢

(74)专利代理机构 安徽合肥华信知识产权代理有限公司 34112

代理人 余成俊

(51) Int. Cl.

A61B 5/02(2006.01)

A61B 5/00(2006.01)

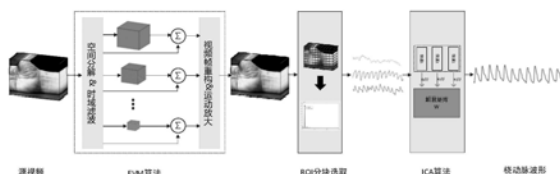
权利要求书2页 说明书5页 附图2页

(54)发明名称

一种非接触式桡动脉波形提取方法

(57)摘要

本发明公开了一种非接触式桡动脉波形提取的方法,主要解决真实场景下非接触式腕部桡动脉脉搏提取准确性和健壮性的问题,其实现过程是:(1)通过计算机控制摄像头采集30s正对着人体手腕的视频;(2)对采集的视频进行拉普拉斯金字塔,以实现空间分解,然后对金字塔分解的子带进行IIR滤波,以完成时域滤波,该过程实现视频中桡动脉搏动信号放大;(3)对放大后的视频分块处理,分析所有分块的功率谱,选取信噪比最高的区域作为感兴趣的区域;(4)选取感兴趣的区域作为输入信号,将该区域分为3个信号源,进行独立成分分析,最终得到桡动脉波形。本发明利用桡动脉的搏动特性,通过视频运动放大提取腕部桡动脉搏动信号,而后进行感兴趣区域精确选取,降低了环境噪声的干扰,同时使用独立成分分析,进一步提高了脉搏波波形的准确性。



1. 一种非接触式桡动脉波形提取方法,其特征在于,包括如下步骤:

(1) 视频采集:将摄像头固定于人的手腕上方约0.3的位置,使摄像头正对腕部区域,通过计算机控制摄像头获取一段长度约30s的mp4格式的视频;

(2) 视频预处理:读取采集的腕部视频,将视频帧图像转换成矩阵,原始视频像素点在RGB颜色空间内采用8位整型存储,取值范围为[0,255],进行归一化处理,像素点的取值范围映射到[0,1]区间,使用64位双精度类型存储,每一帧图像 F_i 到矩阵 M_i 的映射公式为:

$$M_i = \frac{1}{255} F_i \quad (1)$$

(3) 视频放大:对预处理后的视频帧序列采用欧拉视频放大方法进行处理,使视频中包含的腕部桡动脉搏动信号可视化;

a) 空间分解

使用拉普拉斯金字塔进行视频帧图像的空间分解,从高斯金字塔的底层开始为图像的原始尺寸图像 G_0 ,逐级向上为第 i 层图像 G_i ,每一级所在的图像都是在下一级图像的下采样与高斯滤波得到,即第 i 级图像;那么第 i 层拉普拉斯金字塔的定义为,第 i 层的 G_i 减去第 $i+1$ 层做过上采样的 G_{i+1} ,两者的残差即为第 i 层的拉普拉斯金字塔图像 L_i :

$$L_i = G_i - UP(G_{i+1}) \otimes g_{5 \times 5} \quad (2)$$

其中,UP表示上采样, \otimes 表示卷积运算, $g_{5 \times 5}$ 表示 5×5 的高斯滤波核,基于运算速度和滤波效果的综合考虑,选用 5×5 大小的滤波核;

b) 时域滤波

利用IIR滤波器对拉普拉斯金字塔图像分解后的图像组,进行时域滤波,以获取桡动脉搏动信号;

其中,IIR滤波器设计实现如下,IIR滤波器差分方程为:

$$Y(z) = (1-r)Y(n-1)z^{-1} + rX(z) \quad (3)$$

IIR滤波器系统函数为:

$$H(z) = r \frac{z}{z - (1-r)} \quad (4)$$

其中 $0 \leq r \leq 1$,可以看出 $(1-r)^n$ 逼近 x 轴方向,是个单边信号;两个所述IIR滤波器相减就构成带通滤波器,其对应的带通就是所要获取的桡动脉运动信号;

c) 放大与重构

对时域滤波后的信号进行放大,将R通道的幅值保持不变,G和B通道分别放大100倍,即对其通道内的每个像素点值乘以100;每一帧放大之后都扩展到原始视频帧大小,并与原始视频帧图像相加,得到放大后的视频帧,使运动信号的变化情况能被肉眼所观察到;

(4) 感兴趣区域分块选取

为了进一步选取精准的感兴趣区域ROI,对放大后的视频进行分块,分块区域大小为 20×20 分辨率, 640×480 的视频帧区域被分成768个区域,每个区域的记为 B_i ,计算并分析每个分块在时间序列上的频率谱和功率谱,并求信噪比SNR;求出每个区域的信噪比之后,选取信噪比最高的区域作为下一步待处理的ROI;运算过程描述如下:

$$ROI = \max \{0 \leq i \leq 768 | SNG(B_i)\} \quad (5)$$

其中, SNG表示求功率谱的函数;

(5) 独立成分分析获取桡动脉运动信号

在获取ROI之后,对ROI区域内的信号进一步降噪,使用独立成分分析ICA分离信号和噪声;ICA是基于信号高阶统计特性的分析方法,经ICA分解出的各信号分量之间是相互独立的;

设 $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t))^T, t=1, 2, \dots, n$,为ROI区域内的m个时间长度为n的观测信号,另设 $s(t) = (s_1(t), s_2(t), \dots, s_m(t))^T, t=1, 2, \dots, n$,为m个未知的相互独立的源信号矢量,则瞬时线性混叠盲分离混合方程如下:

$$x=As \quad (6)$$

其中, $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)^T$ 为未知时不变的 $n \times m$ 混合矩阵, $\mathbf{a}_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im}) \subset \mathbb{R}^m$;使用ICA算法从观测信号矢量 $x(t)$ 中通过矩阵运算得到源独立信号矢量 $s(t)$;当 $m=n$ 时,可以构造混合矩阵A的逆矩阵 A^{-1} 求解源信号,即:

$$y=Wx \quad (7)$$

其中, $y(t) = (y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t))^T, t=1, 2, \dots, n$ 是系统分离的信号矢量,也是源信号 $s(t)$ 的近似值,W称之为解混矩阵,即 $W=A^{-1}$ 。

一种非接触式桡动脉波形提取方法

技术领域

[0001] 本发明属于计算机视觉领域,特别涉及一种非接触式桡动脉波形提取方法。

背景技术

[0002] 近年来,随着计算机视觉技术的深入探索,越来越多的计算机视觉理论知识应用到医学领域,一定程度上推动了医学的发展。计算机视觉借助计算机和摄像头等工具作为媒介,通过相关技术,对医学领域特定问题进行建模和研究,并从计算机视觉的角度探索解决问题方案,为医学的发展提供了一个独辟蹊径的思路。

[0003] 脉搏波是伴随着心脏周期性收缩的动脉血管波动的轨迹,它综合了心脏泵血活动和压力波沿动脉树传递途中携带的各种信息。通过记录脉搏波信号,并获取信息(如周期、幅值和速度等)来评判动脉性能,是心血管疾病防治领域前沿性课题之一。脉搏波信号的准确获取,是获取人体病例信息相关的特征参数,并为临床诊断提供客观的依据的前提。因此,寻求一种简单、可靠的脉搏波检测手段十分关键。

[0004] 目前,非临床手段进行脉搏波检测的方式很多,按照位置分类,可以分为颈动脉、股动脉、指动脉和桡动脉。其中,桡动脉最容易测量也最容易获取稳定的波形。桡动脉是人体前臂主要动脉之一,也是中医切脉的主要依据。桡动脉脉搏波常用于广义传递函数转换为主动脉脉搏波,通过计算力学指标来评估动脉的相关性能。按照检测原理分类,脉搏波检测又可以分为平面张力法和光电容积描记法。平面张力法,即将压力传感器固定于表面动脉,通过传感器记录信号以此记录脉搏波波形,目前国际上常用的传感器有美国的Millar公司的 SPT-301,国内的合肥华科电子有限公司的HK-2000B应用较广。光电容积描记法常用于指尖式脉搏波信号的采集与分析,如基于指夹的脉搏波检测仪等。

[0005] 上述各种方法均能够获取桡动脉的脉搏波波形,在不同的应用场景下具有各自的优势。但是接触式的脉搏波提取方法需要在一定专业人员的指导下进行操作,使用流程较为繁琐。其中基于压力传感器的脉搏波获取方式要求与被测人员的皮肤表层亲密接触,对于某些皮肤疾病患者而言,该方式极为不便。对于光电容积描记法而言,需要辅助光管照射人体并将发射器和接收器夹紧人体手指指尖,这在一定程度上会给受测者造成不适。因此,这些方法都无法很好的解决现实场景下桡动脉波形提取的问题。

发明内容

[0006] 本发明针对以上问题,提出了一种非接触式桡动脉波形提取方法,该方法无需压力传感器接触人体,也无需辅助光源对人体进行照射,只需要借助普通摄像头捕获桡动脉视频,通过视频放大技术对桡动脉的运动信息进行获取和放大,然后通过进一步降噪处理,从而获取准确的桡动脉波形。

[0007] 本发明的技术思路是:首先使用摄像头获取一段30s的桡动脉视频,然后通过欧拉视频放大(Eulerian Video Magnification,EVM)技术对视频进行运动放大,使视频中桡动脉的搏动信号得以增强,并降低运动噪声,再通过分块筛选,选出信噪比最高的区域作为桡

动脉感兴趣的区域 (Region of interest, ROI), 最后将该区域作为待处理的信号, 使用独立成分分析 (Independent Component Analysis, ICA) 做进一步的降噪处理, 得到最终的桡动脉波形。

[0008] 本发明的采用的技术方案如下:

[0009] 一种非接触式桡动脉波形提取方法, 其特征在于, 包括如下步骤:

[0010] (1) 视频采集: 将一台普通的摄像机设备放置于正对于人的腕部0.3m位置, 将摄像机与计算机连接, 操作者利用MATLAB软件进行控制摄像头拍摄视频, 确保手的腕部桡动脉在所录制的视频帧画面以内; 所有的视频以640x480的分辨率、30帧/秒的帧率和RGB颜色空间进行采集, 视频长度为30秒, 视频编码为 MJPEG, 视频格式为MP4;

[0011] (2) 视频预处理: 读取采集的腕部视频, 将视频帧图像转换成矩阵, 原始视频像素点在RGB颜色空间内采用8位整型存储, 取值范围为[0, 255], 为了保持较高的运算精度, 进行归一化处理, 像素点的取值范围映射到[0, 1]区间, 使用64位双精度类型存储, 每一帧图像 F_i 到矩阵 M_i 的映射公式为:

$$[0012] \quad M_i = \frac{1}{255} F_i \quad (1)$$

[0013] (3) 视频放大: 对预处理后的视频帧序列采用欧拉视频放大方法进行处理, 使视频中包含的腕部桡动脉搏动信号可视化;

[0014] a) 空间分解

[0015] 使用拉普拉斯金字塔进行视频帧图像的空间分解, 拉普拉斯金字塔的理念是基于高斯金字塔建立一个多分辨率与尺度变化的图像组, 高分辨率的图像包含了图像的细节内容, 低分辨率图像表象图像的结构信息, 因此拉普拉斯金字塔可以良好地表现图像的多种信息; 从高斯金字塔的底层开始为图像的原始尺寸图像 G_0 , 逐级向上为第 i 层图像 G_i , 每一级所在的图像都是在下一级图像的下采样与高斯滤波得到, 即第 i 级图像; 那么第 i 层拉普拉斯金字塔的定义为, 第 i 层的 G_i 减去第 $i+1$ 层做过上采样的 G_{i+1} , 两者的残差即为第 i 层的拉普拉斯金字塔图像 L_i :

$$[0016] \quad L_i = G_i - UP(G_{i+1}) \otimes g_{5 \times 5} \quad (2)$$

[0017] 其中, UP表示上采样, \otimes 表示卷积运算, $g_{5 \times 5}$ 表示5x5的高斯滤波核, 基于运算速度和滤波效果的综合考虑, 选用5x5大小的滤波核;

[0018] b) 时域滤波

[0019] 利用无限脉冲 (Infinite Impulse Response, IIR) 滤波器对拉普拉斯金字塔图像分解后的图像组, 进行时域滤波, 以获取桡动脉搏动信号;

[0020] 其中, IIR滤波器设计实现如下, IIR滤波器差分方程为:

$$[0021] \quad Y(z) = (1-r)Y(n-1)z^{-1} + rX(z) \quad (3)$$

[0022] IIR滤波器系统函数为:

$$[0023] \quad H(z) = r \frac{z}{z - (1-r)} \quad (4)$$

[0024] 其中 $0 \leq r \leq 1$, 可以看出 $(1-r)^n$ 逼近x轴方向, 是个单边信号; 从频域上看, 该IIR滤波器的设计实现是一个低通滤波器, 它的传输函数, 在时域上是一个单边函数, 频域上具有

低筒滤波的特性；两个所述低通滤波器相减就构成带通滤波器，其对应的带通就是所要获取的桡动脉运动信号；

[0025] c) 放大与重构

[0026] 对时域滤波后的信号进行放大，将R通道的幅值保持不变，G和B通道分别放大100倍，即对其通道内的每个像素点值乘以100；每一帧放大之后都扩展到原始视频帧大小，并与原始视频帧图像相加，得到放大后的视频帧，使运动信号的变化情况能被肉眼所观察到；

[0027] (4) 感兴趣区域分块选取

[0028] 为了进一步选取精准的感兴趣区域 (Region Of Interest, ROI)，对放大后的视频进行分块，分块区域大小为20x20分辨率，640x480的视频帧区域被分成768个区域，每个区域的记为 B_i ，计算并分析每个分块在时间序列上的频率谱和功率谱，并求信噪比 (Signal to noise Ratio, SNR)；求出每个区域的信噪比之后，选取信噪比最高的区域作为下一步待处理的ROI；运算过程描述如下：

[0029] $ROI = \max \{0 \leq i \leq 768 | SNG(B_i)\}$ (5)

[0030] 其中，SNG表示求功率谱的函数；

[0031] (5) 独立成分分析获取桡动脉运动信号

[0032] 在获取ROI之后，对ROI区域内的信号进一步降噪，使用独立成分分析 (Independent Component Analysis, ICA) 分离信号和噪声；ICA是基于信号高阶统计特性的分析方法，经ICA分解出的各信号分量之间是相互独立的；

[0033] 设 $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t))^T, t=1, 2, \dots, n$ ，为ROI区域内的m个时间长度为n的观测信号，另设 $s(t) = (s_1(t), s_2(t), \dots, s_m(t))^T, t=1, 2, \dots, n$ ，为m个未知的相互独立的源信号矢量，则瞬时线性混叠盲分离混合方程如下：

[0034] $x = As$ (6)

[0035] 其中， $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)^T$ 为未知时不变的 $n \times m$ 混合矩阵， $a_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im}) \in \mathbb{R}^m$ ；使用ICA算法从观测信号矢量 $x(t)$ 中通过矩阵运算得到源独立信号矢量 $s(t)$ ；当 $m=n$ 时，可以构造混合矩阵A的逆矩阵 A^{-1} 求解源信号，即：

[0036] $y = Wx$ (7)

[0037] 其中， $y(t) = (y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t))^T, t=1, 2, \dots, n$ 是系统分离的信号矢量，也是源信号 $s(t)$ 的近似值，W称之为解混矩阵，即 $W = A^{-1}$ 。

[0038] 本发明与现有技术相比具有以下优点：

[0039] 1) 本发明方法无需利用传感器或者其他硬件接触人体，只借助普通摄像头即可自动获取桡动脉波形。有效地提高了测试者的舒适程度，并降低了成本；

[0040] 2) 本发明充分考虑了桡动脉提取过程中的运动噪声，通过自动选取ROI的方法，结合ICA算法，有效的提高了传统EVM算法对桡动脉脉搏运动信号提取的信噪比。

附图说明：

[0041] 图1是本发明的非接触式桡动脉波形提取方法流程图；

[0042] 图2是拉普拉斯金字塔原理示意图；

[0043] 图3是欧拉视频放大示意图；

[0044] 图4是分块选出最高信噪比区域示意图

[0045] 图5是独立成分分析算法示意图；

[0046] 图6是本发明提取的桡动脉波形示意图。

具体实施方式

[0047] 参照图1,一种非接触式桡动脉波形提取方法,实施步骤如下:

[0048] (1) 视频采集:将一台普通的摄像机设备放置于正对于人的腕部0.3m位置,同时通过USB将摄像机与计算机连接,操作者利用MATLAB软件进行控制摄像头拍摄视频,确保手的腕部桡动脉在所录制的视频帧画面以内;所有的视频以 640x480的分辨率、30帧/秒的帧率和RGB颜色空间进行采集,视频长度为30 秒,视频编码为MJPEG,视频格式为MP4;

[0049] (2) 视频预处理:读取采集的腕部视频,将视频帧图像转换成矩阵,原始视频像素点在RGB颜色空间内采用8位整型存储,取值范围为[0,255],为了保持较高的运算精度,进行归一化处理,像素点的取值范围映射到[0,1]区间,使用64位双精度类型存储,每一帧图像 F_i 到矩阵 M_i 的映射公式为:

$$[0050] \quad M_i = \frac{1}{255} F_i \quad (1)$$

[0051] (3) 视频放大:参照图1、3,对预处理后的视频帧序列采用欧拉视频放大方法进行处理,使视频中包含的腕部桡动脉搏动信号可视化;

[0052] a) 空间分解

[0053] 使用拉普拉斯金字塔进行视频帧图像的空间分解,如图2,拉普拉斯金字塔的理念是基于高斯金字塔建立一个多分辨率与尺度变化的图像组,高分辨率的图像包含了图像的细节内容,低分辨率图像表象图像的结构信息,因此拉普拉斯金字塔可以良好地表现图像的多种信息;从高斯金字塔的底层开始为图像的原始尺寸图像 G_0 ,逐级向上为第 i 层图像 G_i ,每一级所在的图像都是在下一级图像的下采样与高斯滤波得到,即第 i 级图像;那么第 i 层拉普拉斯金字塔的定义为,第 i 层的 G_i 减去第 $i+1$ 层做过上采样的 G_{i+1} ,两者的残差即为第 i 层的拉普拉斯金字塔图像 L_i :

$$[0054] \quad L_i = G_i - UP(G_{i+1}) \otimes g_{5 \times 5} \quad (2)$$

[0055] 其中,UP表示上采样, \otimes 表示卷积运算, $g_{5 \times 5}$ 表示5x5的高斯滤波核,基于运算速度和滤波效果的综合考虑,选用5x5大小的滤波核;

[0056] b) 时域滤波

[0057] 利用无限脉冲(Infinite Impulse Response,IIR)滤波器对拉普拉斯金字塔图像分解后的图像组,进行时域滤波,以获取桡动脉搏动信号;

[0058] 其中,IIR滤波器设计实现如下,IIR滤波器差分方程为:

$$[0059] \quad Y(z) = (1-r)Y(n-1)z^{-1} + rX(z) \quad (3)$$

[0060] IIR滤波器系统函数为:

$$[0061] \quad H(z) = r \frac{z}{z - (1-r)} \quad (4)$$

[0062] 其中 $0 \leq r \leq 1$,可以看出 $(1-r)^n$ 逼近x轴方向,是个单边信号;从频域上看,该IIR滤波器的设计实现是一个低通滤波器,它的传输函数,在时域上是一个单边函数,频域上具有

低筒滤波的特性;两个所述低通滤波器相减就构成带通滤波器,其对应的带通就是所要获取的桡动脉运动信号;

[0063] c)放大与重构

[0064] 对时域滤波后的信号进行放大,将R通道的幅值保持不变,G和B通道分别放大100倍,即对其通道内的每个像素点值乘以100;每一帧放大之后都扩展到原始视频帧大小,并与原始视频帧图像相加,得到放大后的视频帧,使运动信号的变化情况能被肉眼所观察到;

[0065] (4)感兴趣区域分块选取,参照图4,将视频帧序列进行分块,并计算每一块区域在时间上的功率谱,计算信噪比,选取信噪比最高的区域作为ROI;

[0066] 为了进一步选取精准的感兴趣区域(Region Of Interest,ROI),对放大后的视频进行分块,分块区域大小为20x20分辨率,640x480的视频帧区域被分成768个区域,每个区域的记为 B_i ,计算并分析每个分块在时间序列上的频率谱和功率谱,并求信噪比(Signal to noise Ratio,SNR);求出每个区域的信噪比之后,选取信噪比最高的区域作为下一步待处理的ROI;运算过程描述如下:

[0067] $ROI = \max \{0 \leq i \leq 768 | SNG(B_i)\}$ (5)

[0068] 其中,SNG表示求功率谱的函数;

[0069] (5)参照图5,独立成分分析获取桡动脉运动信号

[0070] 在获取ROI之后,对ROI区域内的信号进一步降噪,使用独立成分分析(Independent Component Analysis,ICA)分离信号和噪声;ICA是基于信号高阶统计特性的分析方法,经ICA分解出的各信号分量之间是相互独立的;

[0071] 设 $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t))^T, t=1, 2, \dots, n$,为ROI区域内的m个时间长度为n的观测信号,另设 $s(t) = (s_1(t), s_2(t), \dots, s_m(t))^T, t=1, 2, \dots, n$,为m个未知的相互独立的源信号矢量,则瞬时线性混叠盲分离混合方程如下:

[0072] $x = As$ (6)

[0073] 其中, $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)^T$ 为未知时不变的 $n \times m$ 混合矩阵, $\mathbf{a}_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im}) \in \mathbb{R}^m$;使用ICA算法从观测信号矢量 $x(t)$ 中通过矩阵运算得到源独立信号矢量 $s(t)$;当 $m=n$ 时,可以构造混合矩阵A的逆矩阵 A^{-1} 求解源信号,即:

[0074] $y = Wx$ (7)

[0075] 其中, $y(t) = (y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t))^T, t=1, 2, \dots, n$ 是系统分离的信号矢量,也是源信号 $s(t)$ 的近似值,W称之为解混矩阵,即 $W = A^{-1}$ 。

[0076] 基于以上的分析,从ROI区域中选取3个区域作为观测信号,对每个区域做像素平均,得一个平均值,该平均值作为该区域在某一时间点上的观测值。对所有视频帧序列上的该区域做像素平均,得到该区域在时间序列上的一维观测信号,该观测信号是桡动脉信号与噪声的混合。通过独立成分分析,分离出桡动脉运动信号和噪声,参照图6,得到较为纯净的桡动脉运动信号。

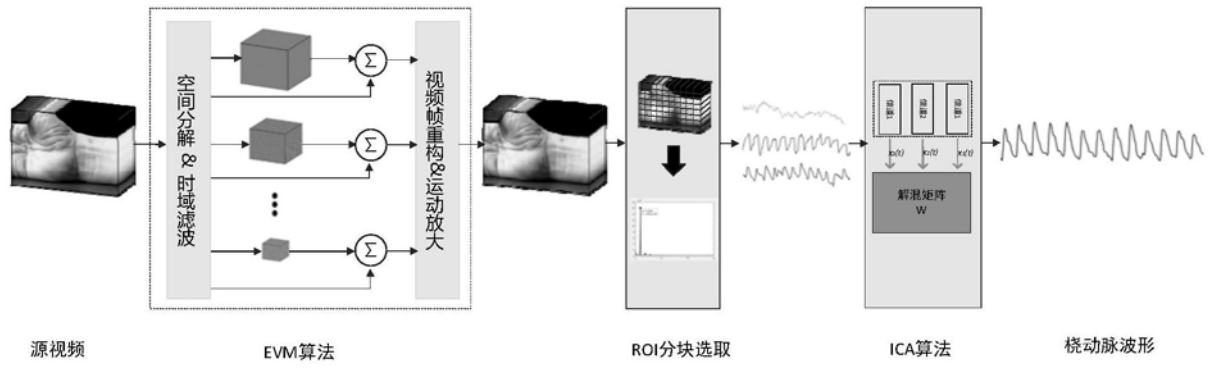


图1

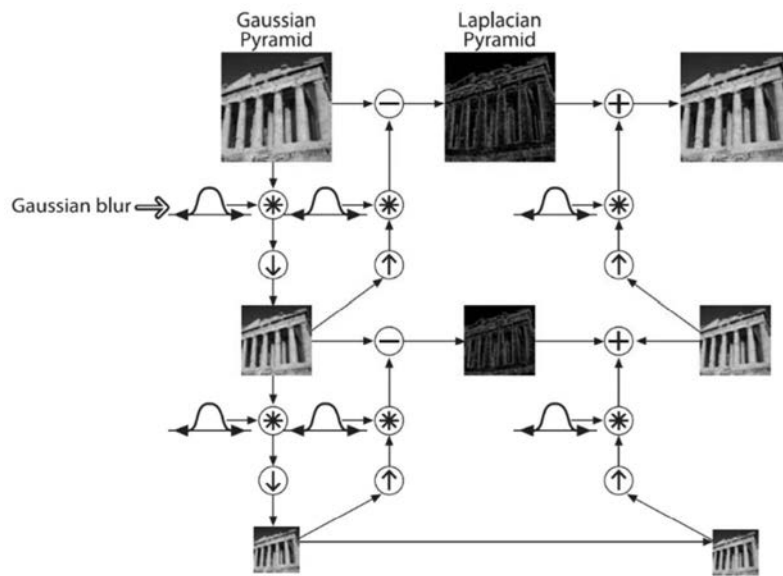


图2

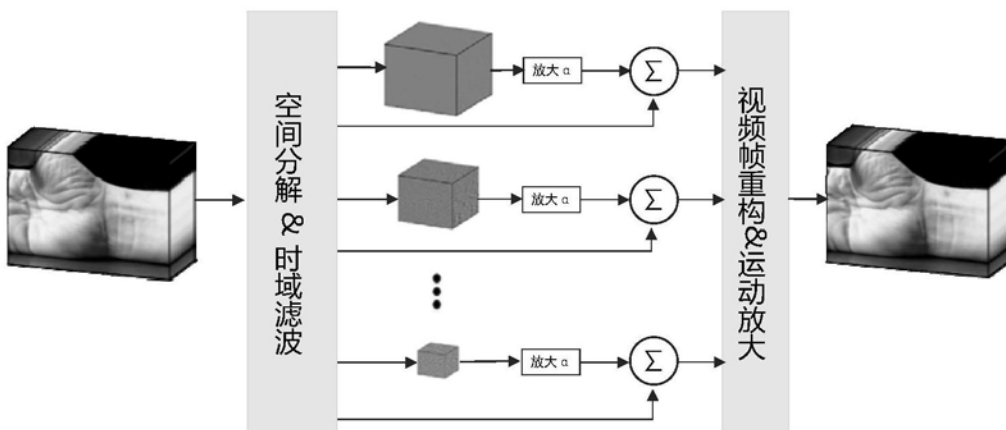


图3

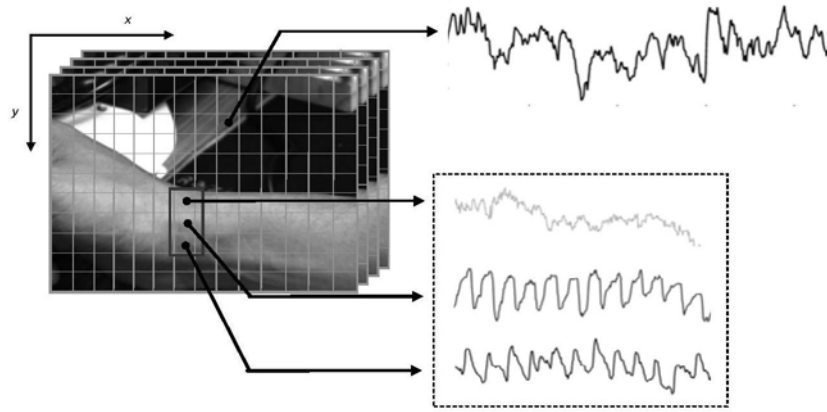


图4

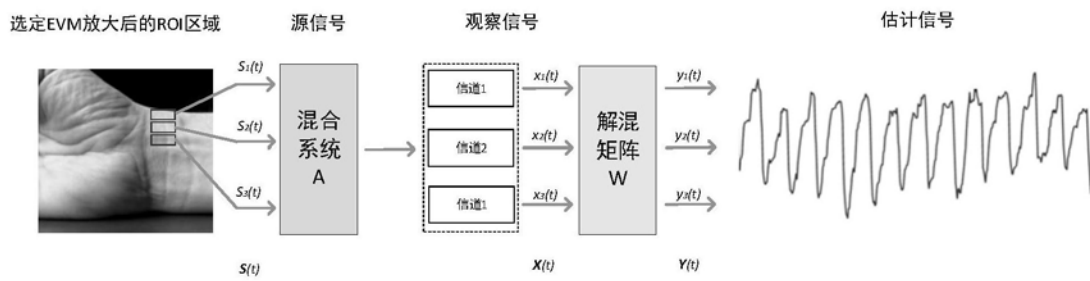


图5

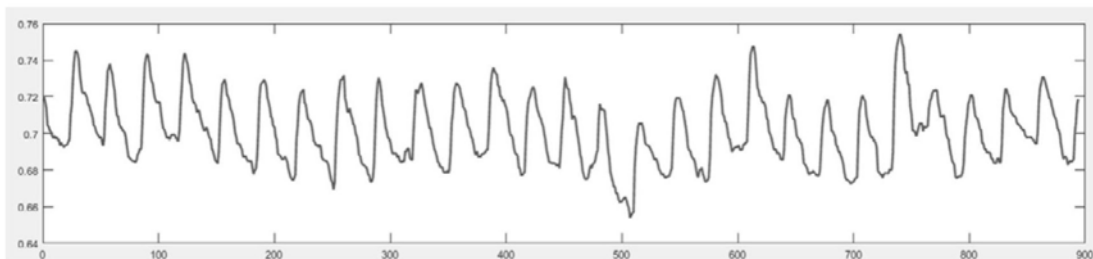


图6

专利名称(译)	一种非接触式桡动脉波形提取方法		
公开(公告)号	CN109793506A	公开(公告)日	2019-05-24
申请号	CN201910046723.8	申请日	2019-01-18
[标]申请(专利权)人(译)	合肥工业大学		
申请(专利权)人(译)	合肥工业大学		
当前申请(专利权)人(译)	合肥工业大学		
[标]发明人	杨学志 李江山 吴秀 方帅 金兢		
发明人	杨学志 李江山 吴秀 方帅 金兢		
IPC分类号	A61B5/02 A61B5/00		
外部链接	Espacenet SIPO		

摘要(译)

本发明公开了一种非接触式桡动脉波形提取的方法，主要解决真实场景下非接触式腕部桡动脉脉搏提取准确性和健壮性的问题，其实现过程是：(1)通过计算机控制摄像头采集30s正对着人体手腕的视频；(2)对采集的视频进行拉普拉斯金字塔，以实现空间分解，然后对金字塔分解的子带进行IIR滤波，以完成时域滤波，该过程实现视频中桡动脉搏动信号放大；(3)对放大后的视频分块处理，分析所有分块的功率谱，选取信噪比最高的区域作为感兴趣的区域；(4)选取感兴趣的区域作为输入信号，将该区域分为3个信号源，进行独立成分分析，最终得到桡动脉波形。本发明利用桡动脉的搏动特性，通过视频运动放大提取腕部桡动脉搏动信号，而后进行感兴趣区域精确选取，降低了环境噪声的干扰，同时使用独立成分分析，进一步提高了脉搏波波形的准确性。

