

人体皮肤彩色视频误差分析及一致性提高

闫勇刚^{1,2}, 邓小玲¹, 马祥², 欧阳健飞²

(1. 河南理工大学机械与动力工程学院, 河南焦作 454003;

2. 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 人体皮肤彩色视频测量是实现远程无创生理参数监测技术的基础和关键, 而视频图像的一致性常常决定着生理参数的测量精度。从视频人体皮肤测量误差出发, 提出了一种基于尺度不变特征变换和小波变换的视频稳定方法并应用此方法进行皮肤视频图像一致性研究。分析了影响视频一致性的误差因素, 建立了视频图像误差数学模型。在此基础上, 利用尺度不变特征变换算法提取皮肤视频图像的匹配特征点对; 并采用仿射变换进行视频全局运动参数估计, 完成了视频运动补偿。采用统计方法评估了视频稳定前后的一致性效果。结果表明, 所提出的方法能有效地改进皮肤视频图像的稳定性和一致性, 为进一步利用彩色视频准确提取人体生理参数以及研究穴位光学特性奠定基础。

关键词: 皮肤彩色视频; 非接触测量; 一致性; 尺度不变特征; 误差分析

中图分类号: TN391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.S126005

Error analysis and consistency improvement for human skin color videos

Yan Yonggang^{1,2}, Deng Xiaoling¹, Ma Xiang², Ouyang Jianfei²

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

2. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Skin color video measurements are very important in remote and non-invasive physiological monitoring, and its consistency always affects the measurement accuracy of physiological parameters like heart rate. An image-stabilization method was presented based on Scale Invariant Feature Transform (SIFT) and Wavelet Transform (WT), and was applied to improve the consistency of skin videos image. The video image error was analyzed and an error mathematical model was built. Based on that, the matched pair-points of skin video images was extracted using SIFT algorithm, and on the global motion parameter estimation was carried for the skin videos image to achieve the motion compensation. Finally, a statistics computation was used to evaluate the consistency effects. The results show that the proposed method is valid and correct for improving the consistency of skin videos image, and it lays a foundation for further physiological parameters calculation and studying the optical characteristics of the acupoints.

Key words: skin color video; noncontact measurement; consistency; SIFT; error analysis

收稿日期: 2016-02-21; 修订日期: 2016-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(61178040); 河南省高等学校重点科研项目(16A413006)

作者简介: 闫勇刚(1977-), 男, 讲师, 博士, 主要从事人体生物医学信号检测方面的研究。Email: tjzyan@tju.edu.cn

0 引言

人体皮肤视频测量在无创生理参数检测中起着越来越重要的作用,也是远程监控及医学诊断的前提和基础。通过皮肤彩色视频测量,不仅可以远距离地获取人体心率、血压、血氧、呼吸率等人体生理参数^[1-5],也可以对人体进行实时连续监测。然而,在人体皮肤视频采集过程中,视频图像易出现不稳定(抖动)现象,形成视频图像误差;这种误差有可能会降低后续时序信号的准确性以及人体生理参数的测量精度。例如,视频图像抖动会使得感兴趣区域发生偏移,导致由感兴趣区域均值化生成的一维时序信号并未真实地反映该皮肤区域的生理特性,影响后续生理信号的特性分析和研究。因此,如何定量地分析视频图像误差,采取稳定算法提高视频图像一致性是皮肤视频测量人体生理参数及研究皮肤光学特性要解决的基本关键问题。

人体皮肤图像不稳定一般可分为两类:一类是由于相机装置自身原因引起所拍摄的视频出现抖动,降低视频质量;另一类是由于受测试者自身不可控运动原因引起两者相对位置发生变化,导致视频出现不稳定现象,如帧间图像出现旋转和平移,甚至出现图像缩放问题。前者可通过提高相机硬件水平及安装平台性能等措施保证图像质量。而后者情况比较复杂且不易消除,尤其对于微小运动的活体组织来说,可通过图像处理算法减小图像抖动对检测结果的影响。一方面,Poh 等^[4]采用最大化感兴趣区域方法有效地减小了人体运动像移对结果的影响,但感兴趣区域较小时,测量结果误差就会增大。另一方面,采用视频稳定算法仍是生物医学光学检测领域的研究热点。尺度不变特征变换 (Scale Invariant Feature Transform, SIFT) 特征匹配法^[5]因匹配准确度高,在同类描述子中具有很强的鲁棒性,可用来提取局部稳定特征,适用于处理两幅图像之间发生平移、旋转、仿射变换、光照变化等情况下的匹配问题,因此,它应用非常广泛^[5-6]。林锦梅等^[7]采用 SIFT 算法进行特征提取和匹配,得到了稳定的视频输出。文献显示,对于含有微小运动的视频图像稳定问题并没进行深入研究,也没有将 SIFT 算法应用到皮肤视频图像一致性提高中。

文中首先分析影响皮肤视频图像一致性的误差因素,构建视频图像误差数学模型。然后,利用 SIFT

算法和小波分析研究视频图像稳定性问题。最后,采用统计方法评价视频稳定后的一致性效果。

1 皮肤视频误差分析

采用可见光下皮肤视频进行人体生理信息测量的关键在于处理体表漫反射的光学信号,这些光学信号被转换为彩色视频图像以用于提取生理参数。图 1 为皮肤表面漫反射光视频测量示意图。

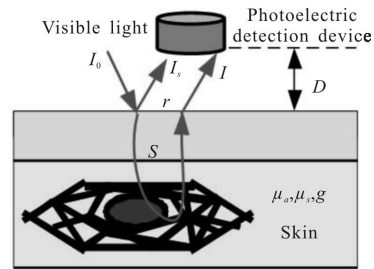


图 1 皮肤表面漫反射光测量示意图

Fig.1 Measurement principle of diffuse reflection light

依据生物组织光学理论可知,人体皮肤表面反射光强的表达式可以简单地描述^[8-9]为:

$$I=f(\lambda, I_0, \mu_a, \mu_s, g, r, S, D)+I_s \quad (1)$$

式中: I, I_0 和 I_s 分别为皮肤表面反射光强度,入射光强度以及表面直接反射光强度; λ 为入射光波长; r 为有效反射出射点与入射点的距离; S 为光在组织内走的光程; D 为测量装置与皮肤间的距离。

当被测对象和照明光源确定后,测量位置的变化将使体表出射光的光强发生变化。由公式(1)可得,产生的测量误差为:

$$\Delta I = \frac{\partial f}{\partial I_0} \Delta I_0 + \frac{\partial f}{\partial r} \Delta r + \frac{\partial f}{\partial D} \Delta D \quad (2)$$

式中: ΔI_0 为入射光强变化; Δr 为因运动引起的测量位置变化; ΔD 为因运动引起的测量距离变化,由于人体产生的微小运动位移相对于测量距离来讲,这种变化引起的出射光变化可忽略不计。

由公式(2)可知,在皮肤视频采集过程中,如果某些时刻人体产生运动位移,就会引起出射光位置 r 发生改变,也就是说,用光电传感器检测的测量区域发生了变化。此时刻计算的观测信号强度就不是同一区域的强度,产生信号误差,导致观测信号的信噪比减小,降低测量结果精度。因此,对于不可控运动引起的视频图像抖动需要采用稳定算法进行处理,提高视频图像的一致性,以保证后续处理中选定的感兴趣区域在每一帧图像中位置基本相同。

2 皮肤视频稳定性分析

2.1 图像特征点提取和匹配

用 SIFT 算法获取人体皮肤图像特征点后, 第 i 帧图像的特征点数为 81 个(图 2(a)), 第 $(i+1)$ 帧图像的特征点数为 75 个(图 2(b)). 从图 2 中可以看到, 两相邻帧图像的 SIFT 特征点多分布于腕部下侧与平台的交界处, 而且比较密集。

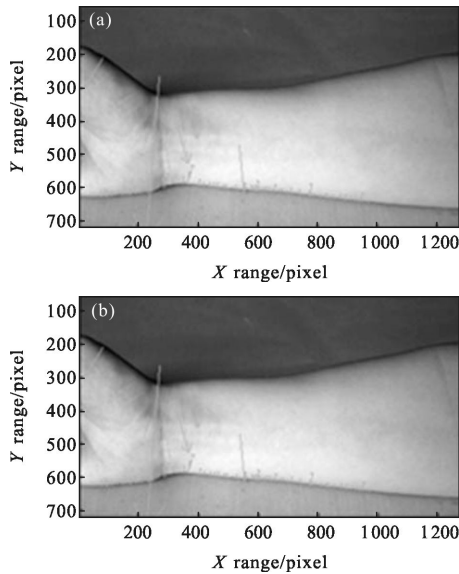


图 2 图像 SIFT 特征点提取

Fig.2 Extraction of SIFT feature points

匹配特征点多出现于对比度强烈、像素有突变的位置, 由于皮肤颜色接近, 其匹配特征点对数目就较少, 因此, 适当的保留对比度强烈的背景信息是非常有必要的, 甚至若在被测目标上设置特殊标记点(基准标记), 则匹配结果会更准确。采用欧式距离/阈值方法作为相似性判据, 进行特征向量的筛选。经阈值筛选后, 图像匹配点对数为 13 个, 其坐标如表 1 所示。

表 1 图像匹配特征点对坐标(单位: pixel)

Tab.1 Matched pair-point coordinates(Unit:pixel)

ith frame		(i+1)th frame		ith frame		(i+1)th frame	
x	y	x	y	x	y	x	y
79.9	209.4	80	209.4	337	583.9	337	583.9
272.4	266	272	266	348.7	587.1	349	587.1
374.4	342.3	374	342.2	284.9	588	285	588
319.5	367.4	320	367.3	285.8	599.3	286	599.4
540.6	472.1	540	472.1	246	611.4	246	611.4
371.9	574.6	372	574.7	671.6	612.7	672	612.7
301.3	583.7	301	583.7	-	-	-	-

2.2 皮肤视频全局运动参数估计

结合由 SIFT 算法计算得到的对应匹配点对集合 $\{(x_i, y_i)^T; (x_{i+1}, y_{i+1})^T\} (i=1, 2, \dots, n-1)$, 采用二维仿射变换模型计算运动参数:

$$\begin{bmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \end{bmatrix} = s \cdot \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Tx \\ Ty \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $s=(a^2+b^2)^{1/2}$, 表示图像缩放比例; $\alpha=\arctan(b/a)$, 表示图像绕中心逆时针旋转角度; $[Tx, Ty]^T$ 表示图像中心平移坐标。

将公式(3)写成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i & -y_i & 1 & 0 \\ y_i & x_i & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot [a \ b \ Tx \ Ty]^T \quad (4)$$

由公式(4)可计算出相邻帧图像的相对运动参数 $(a, b, Tx, Ty)^T$, 采用最小二乘法可求出每帧图像相对于前一帧的运动参量 $(s_i, \alpha_i, Tx_i, Ty_i)^T$ 。取第 1 帧图像为参考帧, 那么第 i 帧图像相对于参考帧的运动为 i 之前所有帧相对运动的叠加, 即:

$$(Tx(i), Ty(i))^T = (\sum_1^{i-1} Tx_r, \sum_1^{i-1} Ty_r)^T \quad (5)$$

于是, 获得全局运动参量曲线, 如图 3 所示。从图 3 中可以看到, 在视频采集中, 人体与相机之间发生了较大的相对运动, 且水平位移大于垂直位移; 所拍摄视频原始帧间运动较大, 水平最大位移为 14 pixel, 远大于不同皮肤区域生理参数计算及光学特性研究所需的最小感兴趣区域(6 pixel×6 pixel)。由此可见, 运动补偿是必不可少的。

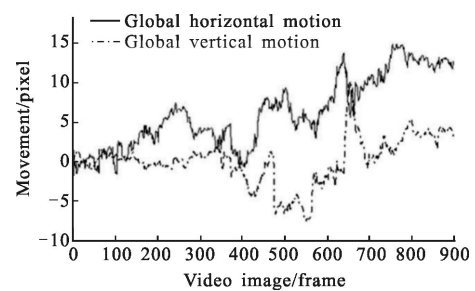
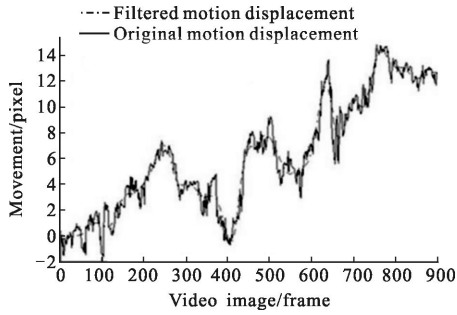


图 3 全局平移运动参量曲线

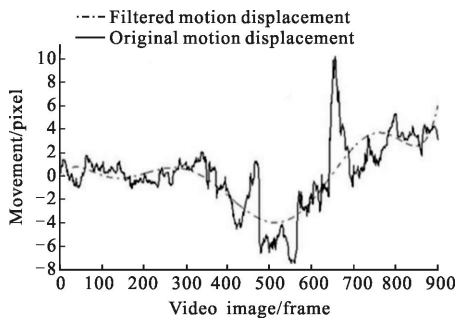
Fig.3 Global translational motion parameters

2.3 皮肤视频运动补偿

采用小波变换算法去除运动参量时间函数的高频分量; 利用最小二乘进行多项式曲线拟合后, 曲线基本保持了原运动趋势, 但帧间运动变化较为平缓, 结果如图 4 所示。



(a) 水平方向位移
(a) Horizontal direction



(b) 垂直方向位移
(b) Vertical direction

图 4 多项式拟合后运动曲线

Fig.4 Polynomial fitting curves

由滤波结果得到对各帧图像的补偿值。假设第 i 帧图像的滤波结果为 $(Tx'(i), Ty'(i))^T$, 表示图像无振动的平滑移动; 差值 $(Tx'(i) - Tx(i), Ty'(i) - Ty(i))^T$ 表示图像补偿后的振动分量; 而补偿量则为 $(-Tx'(i) - Ty'(i))^T$ 。对原始图像上每个像素点 $(x, y)^T$, 进行运动补偿后的位置为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha'(t)) & \sin(\alpha'(t)) \\ -\sin(\alpha'(t)) & \cos(\alpha'(t)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - Tx' \\ y - Ty' \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $\alpha'(t)=0$ 为各相邻帧图像间无旋转运动; $(Tx'(i), Ty'(i))^T$ 为多项式拟合后得到结果。

在此, 需要注意的是, 由于像素值仅在整数位置 (x, y) 上被定义, 所以补偿值需要进行整数化。最后通过双线性插值对图像进行补偿, 以前一帧为参考, 对后一帧进行校正补偿, 从而获得稳定后的皮肤视频图像, 以便进行生理参数如心率的计算。

3 皮肤视频图像一致性评价和讨论

为了评价视频图像一致性效果, 采用统计量——均值 E 和方差 σ^2 对稳定前后的运动曲线和视频序

列偏移进行对比^[10]。均值表示视频序列帧图像偏离主轴的程度, 方差则表示运动轨迹的平稳程度, 分别用下式表示:

$$E = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (c_{in} - c_{in-1}) \quad (7)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} (c_{in} - E)^2 \quad (8)$$

式中: $i=1, 2$ 分别表示水平方向和垂直方向参数。

根据公式(7)和公式(8), 得到稳定前后运动曲线的均值和方差如表 2 所示。

表 2 稳定前后运动曲线参数

Tab.2 Movement parameters before and after stabilization

Parameter	Horizontal direction		Vertical direction	
	E	σ^2	E	σ^2
Before stabilization	6.21	19.7	0.12	8.67
After stabilization	4.0	10.7	0.03	4.28

从表 2 中可以看到, 曲线稳定后曲线轨迹均值和方差比稳定前小, 表明滤波平滑后曲线平稳程度得到了提高, 人体视频图像的一致性得到了改善。

为了评价稳定后视频图像一致性, 采用运动参数估计方法对稳定后视频进行运动位移计算, 结果显示视频图像最大位移为 5 pixel。通过对稳定前后人体彩色视频图像分别进行三通道分离、信号生成、盲源分离、时频变换等分析, 获得心率值^[11]; 心率测量误差相较于稳定前降低了 6.3%。该结果表明, 通过提高人体皮肤视频图像的一致性可有效地提高测量精度, 也说明了皮肤视频稳定的必要性。

4 结论

针对皮肤视频图像中较小感兴趣区域的运动(稳定)问题, 提出了一种基于 SIFT 算法和小波变换的视频稳定方法并将此方法应用于皮肤视频图像的一致性研究。分析了影响皮肤表面视频采集质量的误差因素, 建立了视频图像误差数学模型。当被测位置确定后, 影响视频图像感兴趣区域测量精度的因素主要包含入射光强度和角度变化、因身体不可控运动引起的测量位置变化以及因运动引起的测量距离变化(距离较远时, 该因素可忽略), 其中, 影响感

兴趣区域的一致性最大的因素是因不可控运动引起的测量位置变化。采用 SIFT 算法进行视频稳定后统计结果显示, 所提出的方法能有效地提高皮肤视频图像的一致性和精度; 相比较于原人体皮肤视频, 稳定后视频图像心率测量误差降低了 6.3%。因此, 在感兴趣区域比较小时, 提高视频图像的一致性是不可少的。

文中将为进一步利用皮肤视频准确提取人体生理参数以及研究穴位和非穴位区域光学特性差异奠定基础。

参考文献:

- [1] Verkruyse W, Svaasand L O, Nelson J S. Remote plethysmographic imaging using ambient light [J]. *Optics Express*, 2008, 16: 21434-45.
- [2] Scully C, Lee J S, Meyer J, et al. Physiological parameter monitoring from optical recordings with a mobile phone [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2012, 59: 303-306.
- [3] Zhao F, Li M, Qian Y, et al. Remote measurements of heart and respiration rates for telemedicine [J]. *PLOS One*, 2013, 8: e71384.
- [4] Poh M Z, McDuff D J, Picard R W. Non-contact, automated cardiac pulse measurements using video imaging and blind source separation [J]. *Optics Express*, 2010, 18: 10762.
- [5] Yang Xinfeng, Teng Shuhua, Xia Dong. SIFT matching algorithm with geometry constraint [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3496-3501. (in Chinese)
- [6] Yu Jun, Wang Zengfu. Real-time and robust video stabilization system based on SIFT feature matching [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 36(2): 390-395. (in Chinese)
於俊, 汪增福. 基于 SIFT 特征匹配的实时鲁棒视频去抖系统 [J]. *系统工程与电子技术*, 2014, 36(2): 390-395.
- [7] Lin Jinmei, Zhou Fugen, Jin Ting. Stabilization algorithm based on SIFT feature for dynamic airborne video [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2552-2557. (in Chinese)
林锦梅, 周付根, 金挺. 采用 SIFT 特征的空基动态视频稳定技术 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(12): 2552-2557.
- [8] Steven L Jacques. Optical properties of biological tissues: a review [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2013, 58(11): R37-R61.
- [9] Bashkatov A N, Genina E A, Tuchin V V. Optical properties of skin, subcutaneous, and muscle tissues: a review [J]. *J Innovative Opt Health Sci*, 2011, 4(1): 9-38.
- [10] Yang Shenqi, Wolf W, Vijaykrishnan N. Power and performance analysis of motion estimation based on hardware and software realization [J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2005, 54(6): 714-726.
- [11] Yan Yonggang, Ma Xiang, Yao Lifeng, et al. Noncontact measurement of heart rate using facial video illuminated under natural light [J]. *Bio-medical Materials and Engineering*, 2015, 26: s903-s909.