

基于反射式血管容积波的心理压力测量^{*}

田媛, 荣思珂, 吕勇强, 史元春

(清华大学 信息技术研究院, 北京 100084)

通讯作者: 吕勇强, E-mail: luyq@tsinghua.edu.cn



摘要: 由于计算机对人认知与情感方面的利用将有助于未来智能生活的实现,同时研究发现,血液容积脉搏波(photo-plethysmography,简称 PPG)信号包含的心脏收缩与血管壁本身压力的效果将有助于对人体心理压力及情感测量的分析,因此介绍了通过利用反射式血氧传感器得到 PPG 波形,并采用压力血氧反应指数(stress-induced vascular responses index,简称 sVRI)模型来分析人体目前的压力值,验证反射式传感器对于人体心理压力测量方面的适用性.实验中不仅比较了传统透射式传感器与反射式传感器在双波长(红光与红外光)正常情况与压力情况下 PPG 波形的差异,同时也引入了新的波长——绿光,即利用绿光反射式传感器,通过 sVRI 模型来分析人体的压力值.通过比较与讨论,证明了反射式血氧传感器的适用性.最后,将实验结果与 sVRI 模型相结合应用于实验鼠标模型中,将反射式传感器所携带的生理信息应用于日常生活中,其佩戴更加舒适以及佩戴位置范围更广的优点适合脉搏检测的高性能医疗保健设备及可穿戴智能设备.

关键词: 光学体积描记术(PPG);反射式血氧传感器;绿光;压力血氧反应指数(sVRI);心理压力

中文引用格式: 田媛,荣思珂,吕勇强,史元春.基于反射式血管容积波的心理压力测量.软件学报,2016,27(Suppl.(2)):76-81.
http://www.jos.org.cn/1000-9825/16022.htm

英文引用格式: Tian Y, Rong SK, Lü YQ, Shi YC. Mental pressure analysis based on reflective photoplethysmogram. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2016, 27(Suppl. (2)): 76-81 (in Chinese). http://www.jos.org.cn/1000-9825/16022.htm

Mental Pressure Analysis Based on Reflective Photoplethysmogram

TIAN Yuan, RONG Si-Ke, LÜ Yong-Qiang, SHI Yuan-Chun

(Research Institute of Information Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: As the computer's use of people's cognitive load and mental stress will help the achievement of smart life in the future, meanwhile recent studies show that the PPG signal which reflects the changes of blood volume in the microvascular will help to analyze the mental stress and emotion measurement. The paper introduces a novel photoplethysmogram-based stress induced vascular index (sVRI) to measure cognitive load and stress by using a reflective PPG signal sensor. This model demonstrates the applicability of the reflective PPG signal sensor. The experiment in this paper does not only compare the waveform difference of using the transmission mode and reflective mode to acquire the PPG signal, it also uses the reflective green light compared with the red and infrared light. The mental stress is evaluated based on reflective photoplethysmogram. Based on the comparison and discussion, the applicability of the reflective PPG signal sensor is proved. At last, the paper applies the results of the experiment to the model of the mouse. It has a great influence on the individual health problems in daily life and the advantage of comfort for the individuals and the mobility convenience can expand considerably the range of wearable smart devices and high-performance medical care devices used for pulse detection system.

Key words: photoplethysmography; reflected sensor; green light; stress-induced vascular response index (sVRI); mental pressure

目前,人机交互中的一个领域便是探索计算机与人之间“情感”的沟通.随着智能生活的不断推进,人们对于

* 基金项目: 国家自然科学基金(61201357); 国家高技术研究发展计划(863)(SS2015AA020102)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61201357); National High Technology Research and Development Program of China (863) (SS2015AA020102)

收稿时间: 2015-06-01; 采用时间: 2016-01-05

心理压力以及情感分析的探索欲望也更加强烈.心理压力不仅会引发或者加重人的生理或者精神方面的健康疾病,同时也会在情感认知或者个人生活质量方面产生影响^[1].因此,测量人体的心理压力并加以分析便显得尤为关键.分析人体中的其中一个“情感”——压力,将不仅帮助人们理解日常生活中什么因素能够导致人的压力增大,同时也将有助于人们预防高血压所产生的疾病^[2].目前,现有的分析人体压力的方法有:EEG(脑电)^[3]、EDA(皮电)^[4]等,这些生理信息已成为分析压力的重要依据,但在可穿戴、移动设备的应用上,其准确性、可靠性等还存在很多问题.一些科学家发现周围血管扩张程度可以灵敏地反映心理投入和压力程度,而基于 PPG 波形振幅反应的周围血管扩张度测量方式,也被证明具有相似的效果^[5].PPG 信号获取传感器目前可以分为透射式血氧传感器与反射式血氧传感器.透射式血氧传感器目前在临床中分析 PPG 波形以得到血氧指数已经得到了普遍应用,然而透射式传感器将会引起人体佩戴的不舒服以及行动上的不方便.这些都限制了透射式传感器进一步在智能设备领域上的应用.相比较而言,反射式传感器可以避免这些问题,同时还会使佩戴者更舒服,佩戴的位置也更加灵活.本文主要通过利用反射式血氧传感器来得到 PPG 波形,并从中提取分析压力值的指数——sVRI 来分析人体压力状态.研究发现:sVRI 在研究人体压力方面具有较好的稳定性,而且采用绿光代替传统的红光与红外光作为研究,由于其受环境和静脉位置的影响更小,将更有助于脉率监护^[6],以便采取 PPG 波形分析压力值.另外,本文设计了简要的鼠标模型来体现测量人体压力值的好处.

1 理论基础

情感分析及人工智能设计一直以来都提倡利用使用者最自然的行为方式来进行建模分析设计,因此,这种人机交互的设计才能更自然,更容易去学习,并能够容纳更多使用环境下的错误^[7].而反射式传感器正是在这种不影响人们正常行为方式的前提下来进行 PPG 波形的采集.

1.1 反射式血氧传感器的原理分析

反射式血氧传感器的光检测器与发光二极管是在同一侧,入射光在通过人体组织时,经过多次散射,一部分光被人体组织吸收,另一部分光回到人体皮肤表面,整体呈现反射光的形式.由于光线在光组织中的运动具有随机性,通过反射式传感器的接收光线很难明确给出其准确方位.但是通过光子传播理论及概率统计分布可以看出,光子从发射端到接收端大致为一个弧形^[8].

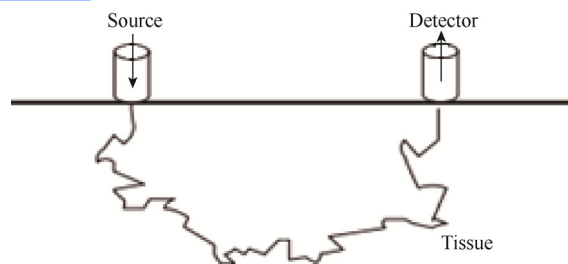


Fig.1 A random propagation path of a photon in tissue

图1 光线在发射源与接收源之间形成的随机路径

其中,光检测器与光接收器的距离在一定程度上决定了反射光的强度,但研究表明^[9],在日常生活所应用的智能设备中,其距离的设定能够达到反射光应用于 PPG 波形研究的标准.

1.2 sVRI指数与人体压力值的关联

sVRI 意为压力血氧反应指数,不同于之前对于人体压力的测量方法,sVRI 实际为 PPG 波形中相同等高线下,两个相对幅度的商.研究发现^[10],sVRI 指数对于人体压力的反应变化更灵敏,更稳定,同时相比较其他的测量方法,其波动更小.因此,利用 PPG 波形图的不同,可以反映出不同的压力指数.图3反映了人们有压力和无压力时的 PPG 波形图的变化,且从图中可以看出,当有压力时,A1 与 A2 会发生明显的变化,A2 的幅值有显著的提高.

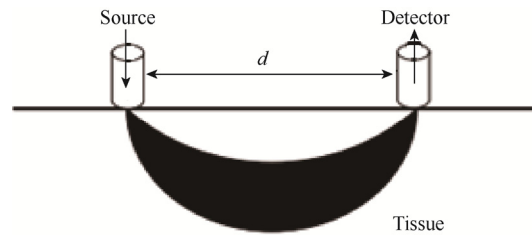


Fig.2 The banana-shaped light propagation envelop

图2 光子所形成的弧形曲线

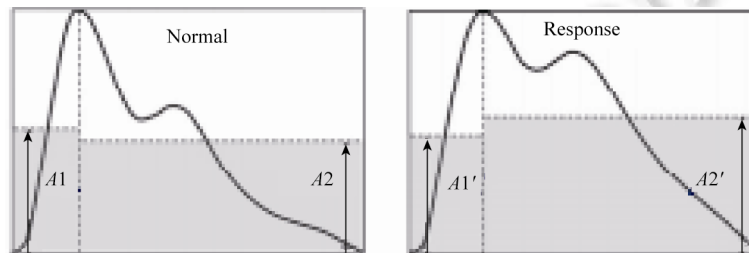


Fig.3 The PPG waveforms in normal and response situation

图3 正常情况下与有压力情况下的 PPG 波形

由于 $A1, A2$ 这种平均振幅幅值变化不够稳定,个体差异大,可用性不强,因此我们提出相对系数定义,即瞬时 sVRI 指数,如下所示:

$$sVRI = \frac{A2}{A1},$$

其中, $A1$ 与 $A2$ 是将 PPG 波形分为两个波段,分别为其平均振幅, sVRI 的值也会随着压力的增大而变大.

2 人体实验测量

该实验是利用 sVRI 的值来评估人体压力值的大小.我们设计了一个包含两种不同实验难度、3 种不同测试时期以及两种测试光波长的实验来评估本次实验.

2.1 实验环境与流程

本次实验的参与者采用具有相同计算能力的大学生,每个人之前对于实验的内容都不知道,年龄分布在 20 岁~24 岁,共有 5 名男生,5 名女生.每一个实验参与者的手指上分别戴有透射式血氧探头以及反射式血氧探头,实验时,实验参与者也佩戴压脉带,实时监测收缩压及扩张压和心率.实验所持续的时间为 6 分钟,实验压力值的提升是通过计算简单的减法来完成的.本次实验分为两种模式,分别为简单模式和困难模式.简单模式与困难模式分别为不同位数的减法运算.实验的总时长为 50 分钟,之前 20 分钟为休息时间,之后 10 分钟为在测试房间内的准备时间,并尽量保持平静.正式实验的持续时间为 6 分钟,实验结束后,实验参与者可以休息 10 分钟.

2.2 实验测试数据分析图

本次实验的数据主要用于评定实验的难度以及实验参与者的压力值.实验的数据分析主要采用 repeated-measures ANOVA 和 t 检验等统计分析方法,进行显著性水平为 0.05 的双侧检验.

本次实验首先测量显示出正常情况下反射式传感器双波长(红光与红外光)的波形,如图 4 所示,图 5 显示了在不同压力值时 PPG 波形的对比,其中,上半部分为正常情况,下半部分为有压力值时的 PPG 波形,验证了 sVRI 对于验证人体压力的可行性.其中,黄线为红外光,蓝线为红光.

之后,我们利用软件对 PPG 波形加以处理,得到最终的 sVRI 值.表 1 显示了本次实验中测试的各种生理测试数据的平均值及标准差,包括:sVRI,收缩压、舒张压以及心率.我们通过重复测量 ANOVA 来评估这些生理测试数据.表 1 中显示了不同难度以及实验区间的数值.

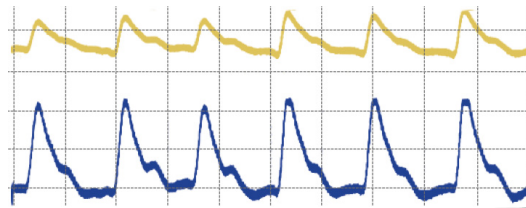


Fig.4 The PPG waveforms in normal situation of reflective PPG signal sensor

图 4 正常情况下反射式传感器 PPG 波形

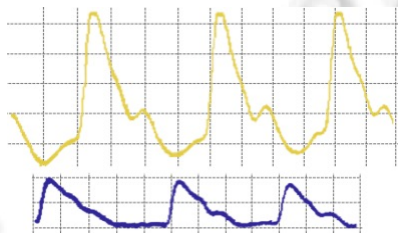


Fig.5 The PPG waveforms in different stress situation

图 5 不同压力值下 PPG 波形的显示结果

Table 1 Physiological measurement

表 1 生理测量数据

Measure	实验区间(Easy难度)			实验区间(Hard难度)		
	减法测试前(Baseline)	测试中	测试后	减法测试前(Baseline)	测试中	测试后
sVRI(反射式)	0.910±0.087	0.967±0.066	0.932±0.073	0.924±0.046	0.933±0.051	0.947±0.066
sysBP	108.3±7.4	116.8±13.2	108.3±10.0	106.2±5.9	112.2±7.2	109.8±5.7
diaBP	67.0±9.1	74.9±12.9	67.1±10.4	65.9±9.9	72.8±10.1	66.9±8.0
HR	68.0±7.6	77.3±3.1	72.1±5.6	67.8±2.5	75.2±3.2	67.9±5.1

*注:数据在不同难度以及不同测试时期完成

表 2 显示了不同生理测试数据的 p 值、 F 值与 η^2 值.由表 2 可以看出,其 p 值均小于 0.05,表明在每个实验测量期间所有的生理信号都有很明显的组间效应,sVRI、舒张压、收缩压和心率在减法测试期间较测试前的基值状态和测试后的平静状态明显上升.

Table 2 ANOVA testing results of Period effect

表 2 测试阶段(Period)效应的 ANOVA 测试结果

Measure	Periods (p)			Periods (F)		
	0.028	5.246	测试后	减法测试前(Baseline)	测试中	测试后
sVRI(反射式)	0.003	11.093	0.932±0.073	0.924±0.046	0.933±0.051	0.947±0.066
sysBP	0.003	36.308	108.3±10.0	106.2±5.9	112.2±7.2	109.8±5.7
diaBP	0.000	16.567	67.1±10.4	65.9±9.9	72.8±10.1	66.9±8.0
HR	0.001	72.1±5.6	67.8±2.5	75.2±3.2	67.9±5.1	

为了验证反射式传感器的适用性,表 3 显示了反射式与透射式 sVRI 数据的对比情况.其中, $p>0.05$,即说明透射式 sVRI 数据和反射式 sVRI 数据之间不存在统计学差异,亦即反射式 PPG 传感器可以代替透射式 PPG 传

传感器.

Table 3 The comparison of reflective and transmission sVRI data

表 3 反射式 sVRI 数据与透射式 sVRI 数据对比

源	III型平方和	df	均方	F	Sig.	η^2
截距	76.718	1	76.718	2 230.074	0.000	0.994
No	0.014	1	0.014	0.396	0.539	0.027
误差	0.482	14	0.034			

*注:表 3 为主体间效应的检验,转换的变量为平均值

表 4 显示了反射式与透射式传感器对于 sVRI 检测值的对比.由表 4 中数据可以看出,二者均可以反映不同时期的变化.并且,反射式传感器的标准差比透射式的标准差更小,验证了反射式传感器比透射式传感器具有更高的准确性,由此验证了可以将其应用于智能可穿戴设备,同时也证明了反射式传感器的适用性.

如图 6 所示,由反射式传感器和透射式传感器采集的 PPG 信号得到的 sVRI 值均随测量区间的改变而改变,都符合在减法测试前低→减法测试中升高→减法测试后下降这一规律.综上所述,由反射式传感器得到的 sVRI 更能准确、灵敏地反映用户的心理变化.

Table 4 The comparison of reflective and transmission standard deviation

表 4 反射式与透射式传感器标准差对比

	反映测试阶段变化	测试者标准差(%)	数据采样时间(s)	获取数据类型
sVRI(反射式)	Yes	6.93	1	Pulse
sVRI(透射式)	Yes	9.88	1	Pulse

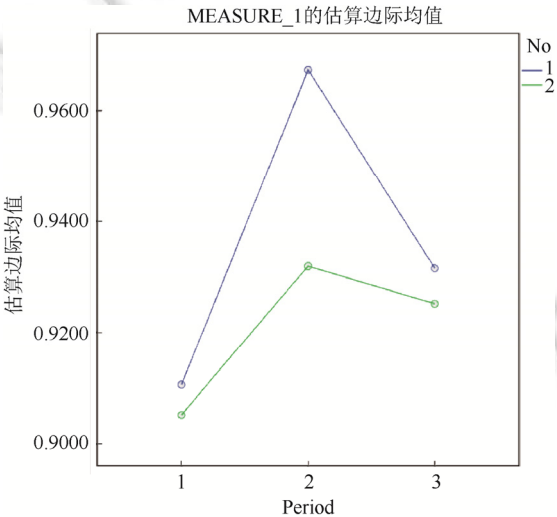


Fig.6 The value distribution of reflective (Group 1, blue) and transmission (Group 2, green) sVRI data

图 6 反射式(Group 1 蓝线)和透射式(Group 2 绿线)sVRI 数据在各测量区间的取值分布图

2.3 实验应用:鼠标模型

由于本次实验的结论验证了反射式传感器的可行性以及绿光应用于反射式传感器的前景,我们设想之后反射式传感器应用在鼠标上的理论模型,将反射式传感器置于人体正常使用鼠标的大拇指处.由于大拇指不会经常移动,将更有利于实验所得数据的稳定性与准确性.利用鼠标的 USB 供电设备,将有利于反射式传感器能耗方面问题的解决.

3 结束语

本文实验通过引入 sVRI 模型测量方法,将反射式传感器与透射式传感器进行了对比,验证了反射式传感器的可行性。同时实验对比了不同波长的反射式传感器的 PPG 波形效果,发现绿光相比较红光与红外光具有更好的稳定性,受环境因素的影响更小。实验最后提出了将反射式传感器应用于鼠标的设想,将实验结论应用于智能设备中,有利于人们今后健康生活的理念,具有更好的发展前景。

References:

- [1] Sun D, Paredes P, Canny J. MouStress: Aetecting stress from mouse motion. In: Proc. of the CHI 2014. ACM, 2014. 61–70. <http://dx.doi.org/10.1145/2556288.2557243>
- [2] Hernandez J, Paredes P, Roseway A, Czerwinski M. Under pressure: Sensing stress of computer users. In: Proc. of the CHI 2014. ACM, 2014. 51–60. <http://dx.doi.org/10.1145/2556288.2557165>
- [3] Sulaiman N, Taib MN, Lias S, Murat ZH, Aris SAM, Mustafa M, Rashid NA, Hamid NHA. Intelligent system for assessing human stress using EEG signals and psychoanalysis tests. IEEE Computer Society, 2011. 363–367. [doi 10.1109/CICSyN.2011.82]
- [4] Setz C, Arnrich B, Schumm J, La Marca R, Troster G, Ehlert U. Discriminating stress from cognitive load using a wearable EDA device. IEEE Trans. on Information Technology in Biomedicine, 2010, 410–417.
- [5] Iani C, Gopher D, Lavie P. Effects of task difficulty and invested mental effort on peripheral vasoconstriction. Psychophysiology, 2004,41(5):789–798. [doi: 10.1111/j.0048-5772.2004.200.x]
- [6] Maeda Y, Sekine M, Tamura T. The advantages of wearable green reflected photoplethysmography. In: Proc. of the LLC 2010. Springer Science+Business Media, 2010. 830–832. [doi 10.1007/s10916-010-9506-z]
- [7] Oviatt S. Human-Centered design meets cognitive load theory: Designing interfaces that help people think. In: Proc. of the ACM Int'l Conf. on Multimedia. 2006. 871–880.
- [8] Peng FL, Wang WD, Liu HY. Development of a reflective PPG signal sensor. In: Proc. of the BMEI. 2014. 612–616.
- [9] Chigira H, Maeda A, Kobayashi M. Area-Based photo-plethysmographic sensing method for the surfaces of handheld devices. In: Proc. of the UIST 2011. ACM, 2011. 499–506.
- [10] Lü YQ, Luo XM, Zhou J, Yu C, Miao CC, Wang T, Shi YC, Kameyama KI. Measuring photoplethysmogram-based stress-induced vascular response index to assess cognitive load and stress. In: Proc. of the CHI 2015. 2015. 857–866. <http://dx.doi.org/10.1145/2702123.2702399>



田媛(1994—),女,辽宁沈阳人,学士,主要研究领域为机器学习。



荣思珂(1994—),女,学士,主要研究领域为交互设计。



吕勇强(1979—),男,博士,助理研究员,CCF专业会员,主要研究领域为系统可用性与安全。



史元春(1967—),女,博士,教授,博士生导师,CCF杰出会员,主要研究领域为人机交互,普适计算。