

文章编号 1004-924X(2017)06-1410-08

## 激光散斑血流成像对中医理疗功效的检测

贾亚威<sup>1</sup>, 杨 晖<sup>1\*</sup>, 李 然<sup>1</sup>, 刘宏业<sup>1</sup>, 范彦平<sup>1</sup>, 郑 刚<sup>2</sup>

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

2. 上海理工大学 医疗器械与食品学院, 上海 200093)

**摘要:**为了获得更加准确的中医理疗功效检测结果,根据中医经络的气血和人体皮肤微循环密切相关的理论,提出了一种基于散斑血流成像的检测方法。对检测过程中由于被测对象身体抖动等因素产生的图像信噪比下降问题进行研究和改进,并通过软管模拟实验对成像系统的稳定性进行验证。然后,对 10 名健康志愿者的内关穴或外关穴进行艾灸实验,以血流灌注指数为检测指标,采用散斑血流成像系统对手部不同经络的穴位及非穴位检测点进行检测。实验结果表明:艾灸后,在艾灸点所在经络上的穴位检测到的血流灌注指数增加比其它穴位点高 20%。激光散斑血流成像系统能够对理疗过程中皮肤血流变化予以大视角的成像,此方法在中医理疗功效检测中具有有效性。

**关键词:**激光技术;激光散斑血流成像;理疗;血流灌注指数;艾灸

中图分类号:TN247 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20172506.1410

## Measurement of physical therapy efficiency of traditional Chinese medicine by laser speckle blood flow imaging

JIA Ya-wei<sup>1\*</sup>, YANG Hui<sup>1\*</sup>, LI Ran<sup>1</sup>, LIU Hong-ye<sup>1</sup>, FAN Yan-ping<sup>1</sup>, ZHENG Gang<sup>2</sup>

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering,

University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

\* Corresponding author, E-mail: yanghui@usst.edu.cn

**Abstract:** In order to accurately evaluate curative effect of traditional Chinese medicine therapy, a detection method based on Laser Speckle Blood Flow Imaging (LSBFI) was proposed according to relative theories of qi and blood and human skin microcirculation in traditional Chinese medical meridians. The degradation of image signal to noise ratio attribute to body shaking and other factors of detected object in the process of detection was researched and improved, and the stability of imaging system was verified through flexible pipe simulation experiments. Then, the moxibustion on neiguan point and the waiguan points of 10 healthy volunteers were performed experimentally. Regarding the blood Perfusion Index (PI) as detection index, the LSBFI system was used to detect acupoint and non-acupoint detection points of different hand meridians and collaterals. The experimental result shows that after moxibustion, PI

收稿日期:2017-02-17;修订日期:2017-03-20.

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No. 11572201)

detected on acupoint of meridians and collaterals on the moxibustion is increased by 20% than that of other acupoints. Given large visual angle of imaging on skin blood flow change in the process of physical therapy, the LSBFI system enables effective detection of physical therapy efficacy for traditional Chinese medicine.

**Key words:** laser techniques; laser speckle blood flow imaging; physical therapy; blood perfusion index; moxibustion

## 1 引言

近年来,针灸、火罐、艾灸、推拿等中医理疗法被越来越多的国家认可和接受。为了适应现代科学医疗技术的要求,迫切需要一种量化评估中医理疗效果的手段。另一方面,中医理疗法开始进入寻常百姓的生活,但未受过专业训练的普通人很可能寻错穴位,因此亟需一种理疗功效评估方法,以帮助普通人控制理疗效果。中医经络理论是中医理疗方法的理论基础,临床和实验发现皮肤微循环和中医经络的气血理疗密切相关,皮肤微循环直接参与组织、细胞的物质、信息、能量等的传递<sup>[1]</sup>,这种生理作用与经络理论中的通经络、行气血极为相似。因此,通过检测人体经络的微循环特性,可以有效地发现同一经络上穴位点的气血变化,从而对理疗效果进行有效的评估。

早在20世纪80年代,便有学者使用微循环显微镜技术研究针灸与微循环的关系,如李传杰等<sup>[2]</sup>使用微循环显微镜观测针刺对左心功能微循环的影响。90年代,激光多普勒逐渐成为研究针灸与微循环的主要技术。穆祥等<sup>[3]</sup>使用激光多普勒技术研究经络对微循环的影响。张栋等<sup>[4]</sup>运用激光多普勒血流成像仪在微循环与经穴的关系方面进行了深入研究。然而,微循环显微镜技术的小视场观测和激光多普勒技术单点扫描造成的低分辨率在理疗检测应用上造成了诸多不便。

近年来,激光散斑血流成像(Laser Speckle Blood Flow Imaging, LSBFI)技术在国际上兴起并不断发展<sup>[5-8]</sup>,目前已被应用于各类临床检测和实验研究中。在视网膜成像检测方面,Naoki<sup>[9]</sup>等利用 LSBFI 技术发现青光眼患者的神经乳头周围的大血管区域血流速度低于正常人。在脑皮层血管血流监测方面,Nils<sup>[10]</sup>等在手术中成功使用 LSBFI 技术实时监测人脑局部缺血,并预测最终会梗塞的脑组织范围。在皮肤血流灌注成像方面,Mirdell<sup>[11]</sup>等将 LSBFI 技术用于监测儿童烫

伤伤口恢复过程中血流灌注的差异,发现此差异直接与伤口的痊愈时间相关。LSBFI 技术具有检测面积大、分辨率高、耗时短且变异性低等优势,所以正逐渐取代激光多普勒技术成为研究皮肤微循环的新兴工具。

在中医理疗方面,国内学者使用 LSBFI 技术对皮肤血流进行了研究。田宇瑛等<sup>[12]</sup>采用 LSBFI 技术观察针灸治疗中手针与激光针刺刺激合谷穴对面部血流的影响,证明了不同针刺方法刺激合谷穴对面部微循环的调节作用存在差异。杨李健等<sup>[13]</sup>使用 LSBFI 技术研究针灸对穴区皮内微血管舒缩振幅的影响,从微循环角度初步了解了针灸的循经传导效应。朴盛爱等<sup>[14]</sup>应用 LSBFI 技术研究了刺络疗法对神经根型颈椎病患者局部血流灌注量的影响,发现治疗前后颈椎皮肤血流灌注量存在差异。这些研究大都以针灸操作为主,近年来艾灸理疗方法以其操作简单、使用方便和独特的物理、药物双重效果等优点逐渐流行起来,并在美容、保健、理疗等领域得到了广泛的应用,但是由于传统粗状艾灸的热辐射作用会同时影响多个穴位,致使其理疗效果在成像上不如针灸明显,以及使用 LSBFI 技术检测时,人体呼吸和心跳等轻微抖动会导致运动伪影,从而使图像质量下降,因此相关研究还未见报道。

为了探究 LSBFI 技术在艾灸效果评估方面的应用价值,本文在 LSBFI 系统的基础上,以相对灌注指数(Perfusion Index, PI)为主要指标,测量和研究了艾灸前后手背和手掌的血流量分布。同时,针对长时间理疗过程中人体抖动等因素导致的图像质量下降问题,设计了一种自动配准算法。该算法消除了抖动造成的伪影,有效提高了散斑对比度计算的准确性,保证了检测精度。

## 2 激光散斑血流成像理论和系统

### 2.1 基本原理

LSBFI 系统如图 1 所示,激光器发出激光经

过扩束照射在生物组织表面,不同光程的反射光和散射光之间会相互干涉形成散斑<sup>[15]</sup>。如果组织内散射介质(血红细胞)发生相对运动时,CCD拍摄的图像将会产生随时间变化的动态散斑图样,该图样在时间和空间上的强度变化包含着散射介质的运动信息。通过分析散斑强度在时空上的变化可获得相应的流速信息<sup>[16]</sup>。为了提高图像内容的可辨识度,运用灰度区分法将原始散斑图像转换为伪彩色图,这样可以更直观地观察流速的变化。

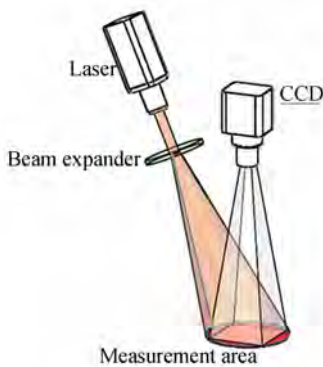


图 1 激光散斑血流成像系统

Fig. 1 Schematic diagram of laser speckle imaging system

为了定量表述散斑的模糊程度,Briers等<sup>[17]</sup>根据散斑图像的空间特性使用统计学方法推导出散斑对比度  $K$ ,它定义为光强标准差  $\sigma_I$  和光强平均值的比值:

$$K = \frac{\sigma_I}{I}. \quad (1)$$

理想状态下, $K$  值在  $0 \sim 1$ ,当散射介质静止时,不存在散斑模糊效应,散斑对比度为 1;当散射介质快速运动造成散斑图样模糊时,散斑对比度接近于 0,且速度越快,其散斑对比度越小<sup>[18]</sup>。

Duncan等<sup>[19]</sup>认为毛细血管中血红细胞的速度分布近似于洛仑兹分布,用散斑图像波动的去相关时间  $\tau$  和相机的曝光时间  $T$  的函数表示对比度,即有:

$$K = \frac{\sigma_I}{I} = \left\{ \beta \left[ \frac{\tau}{T} + \frac{\tau^2}{2T^2} \left[ \exp\left(\frac{-2T}{\tau}\right) - 1 \right] \right] \right\}^{1/2}, \quad (2)$$

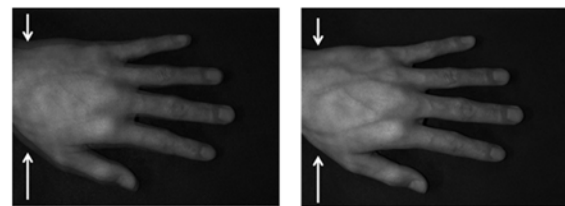
其中<sup>[20]</sup> $\beta$ 为仪器相关常数,可用于补偿探测器与散斑的尺寸比值的相关损失项。令  $x = T/\tau$ ,式(2)可化为:

$$K = \frac{\sigma_I}{I} = \left\{ \beta \frac{\exp(-2x) + 2x - 1}{2x^2} \right\}^{1/2}, \quad (3)$$

式中  $x$  为血流灌注指数 PI。PI 值越大,血流速度越大;反之,速度越小。PI 值变化可反映毛细血管中血液流动的快慢。

## 2.2 抖动噪声的消除

在理疗过程中志愿者的呼吸不均匀、心跳缓急不同以及理疗刺激等因素会引发肌体抖动,此外,长时间保持姿势的稳定也会导致肌肉僵硬而产生轻微位移,这些抖动噪声将改变散斑的统计特性,从而增大对比度数据的误差,并进一步影响血流速度估计和统计特性分析<sup>[21]</sup>。针对上述问题,本实验采用  $3 \times 3$  卷积核,归一化的相关度量和三次 B 样条插值相结合的自动配准技术,以实现原始散斑图像的精确配准,进而消除手臂抖动带来的影响。由于原始的散斑图像难以找到一个稳定的特征区域用来配准,传统的配准方法均无法完成散斑图像的配准,因此本实验先对原始散斑图像进行预处理。在预处理中使用一个  $3 \times 3$  卷积核与原始散斑图像进行卷积,以获得每个像素的空间标准差。卷积后的图像只会造成图像边缘位置信息的损失,空间分辨率损失非常小。然后配准所需的刚性唯一参数,通过相关性度量指标(归一化的相关度量函数)对预处理后的图像进行迭代优化。选择归一化的相关度量函数是因为这个度量函数的计算代价最小,而且具有稳定的极值特性。最后,利用计算得到的配准参数和三次 B 样条插值方法完成原始散斑图像配准。相比其它插值方法,三次 B 样条插值函数具有平滑、连续、有界等良好的特性<sup>[22]</sup>,能够很好地完成插值重采样的工作。配准效果如图 2 所示,配准前因手部抖动造成了伪影(图 2(a)),自动配准后伪影消失(图 2(b))。



(a) 配准前

(b) 配准后

(a) Before registration

(b) After registration

图 2 图像配准效果图

Fig. 2 Effect of image registration

### 3 实验系统和方法

#### 3.1 激光散斑血流成像系统装置

在本研究中,LSBFI 系统使用半导体激光器(波长为 785 nm,10 mW)作为光源;激光光束经扩束镜扩束后均匀照射在被测皮肤上,光斑区域直径为 10~20 cm(可调节);图像采集系统为近红外 CCD 相机(VLG CCD,Baumer, 瑞士),图像分辨率为 1 392×1 040 像素,像素尺寸为 6.45  $\mu\text{m}$ ×6.45  $\mu\text{m}$ 。

#### 3.2 模拟实验

根据国际上常用的模拟实验<sup>[23]</sup>,这里设置了软管实验,用以确定 LSBFI 系统的稳定性。软管实验实物图如图 3 所示,图中管 1 与管 2 的内径均为 3 mm,管 3 的内径为 1 mm,由慢到快调节微型泵的速度控制管内液体流速。液体为碳素墨水。

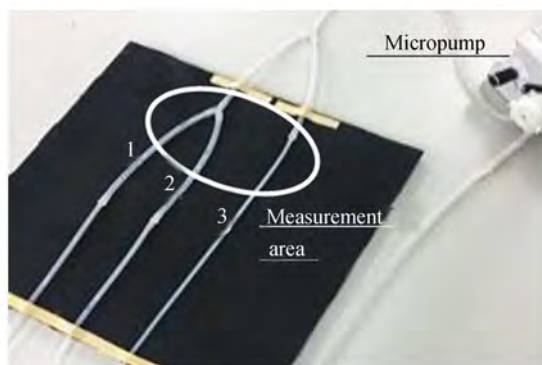
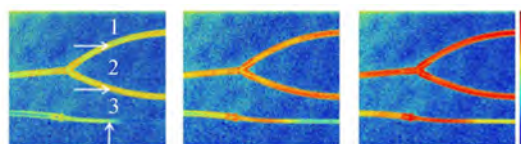


图 3 软管实验实物图  
Fig. 3 Photo of hose test

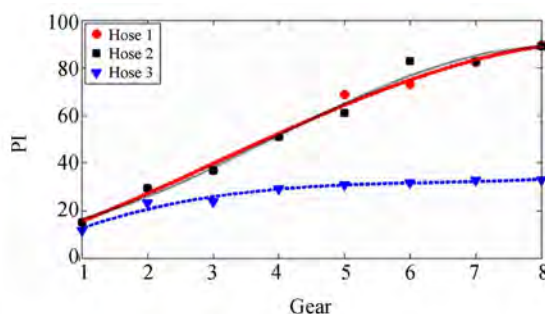
调节微型泵的档位,从低速档位逐渐到高速档位。在这一过程中,软管中液体流速逐渐增大,其伪彩色图像呈现出一个由蓝色到黄色再到红色的变化过程。图 4 为该过程 3 个不同档位下软管内液体流速变化的伪彩色图(彩图见期刊电子版)。1、2 两管的管径相同且从同一主管分流,其内液体流速相同,伪彩色显示也相同,3 管管径较 1、2 更细,液体流速较慢,伪彩色显示也比 1、2 更浅。由实验可知:流速越快,管内颜色越趋向红色;流速越慢,管内颜色越趋向蓝色。

图 4(a)中箭头指向 1,2,3 三根软管上选取的测量点,以测量点为中心取 30 pixel×30 pixel 的区域代表该点,计算该区域的 PI 值。图 4(d)

为上述 3 个测量点在不同档位时的 PI 值及其最佳拟合曲线。1,2 两管测量点的 PI 拟合曲线趋势一致,且 PI 值明显高于 3 管。



(a)低速 (b)中速 (c)高速  
(a)Low gear (b)Medium gear (c)High gear



(d)不同软管的 PI 曲线  
(d)PI curves of different hoses

图 4 软管实验伪彩色图及测量点 PI 值

图 4 Pseudo-color maps in hose test and PI values of interest points

#### 3.3 临床实验

##### 3.3.1 实验环境和对象

实验环境温度在 24.0~27.0  $^{\circ}\text{C}$ ,室内无阳光直射且空气保持明显对流。

实验对象为 10 例健康成年志愿者,年龄为 20~65 岁;体重在 50-75 kg。全部志愿者均在知情同意情况下进行本实验。由于心理、新陈代谢、神经反映等诸多因素都会对皮肤血流产生较大影响,测试开始前实验对象需静坐 15 min。

实验由本校医务室外聘理疗医师操作,为减小常规粗状艾灸条燃烧对皮肤大范围的影响,本实验选用了灸点较小的艾草线香(直径为 1.8 mm);艾灸温度以受试者能耐受为宜。所用穴位为内关穴(手厥阴心包经穴)或外关穴(手少阳三焦经穴),如图 5 所示。内关穴和外关穴选自同一位受试者同一侧手臂,且二者不能同时进行艾灸,实验间隔需超过 24 h。设置自然状态(不艾灸)测试实验为对照组,观察 10 例受试者 30 min 内手背血流的自然变化情况,用以与艾灸组进行对照。

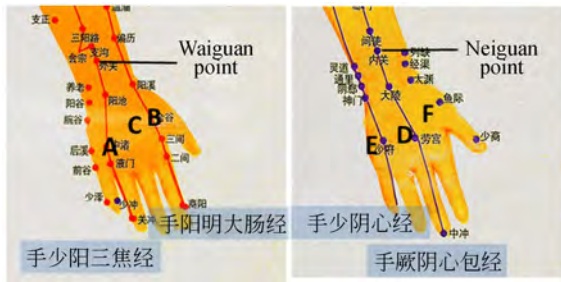


图 5 内关穴与外关穴穴位图

Fig. 5 Positions of Waiguan and Neiguan points

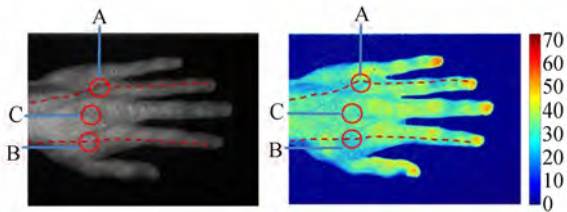
3.3.2 实验方法

将检测部位(手掌或手背)置于测量区域内,首先采集艾灸前被测部位的自然状态图像,时间为 30 min,此后分别进行艾灸内关穴或外关穴,并取艾灸过程中(5, 10, 15 min、停灸后 5, 10, 15 min)数次图像和数据记录,存储图像用以分析。最后将 10 位志愿者的 PI 数据以(平均数±标准差( $\bar{x} \pm s$ ))的形式进行统计学处理。

4 实验结果及讨论

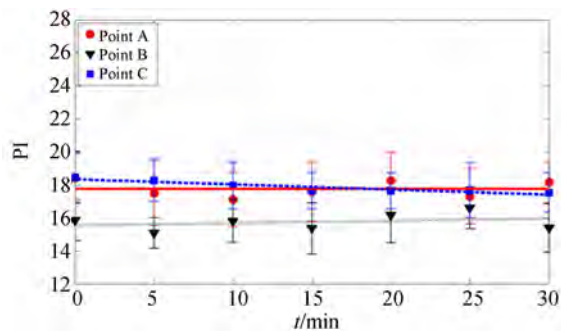
4.1 自然状态手背测试

图 6 所示为自然状态下的手背,虚线为经络



(a)激光散斑图像 (b)伪彩色图像

(a)Image of laser speckle (b)Image of pseudo color



(c)自然状态下手背的 PI 曲线

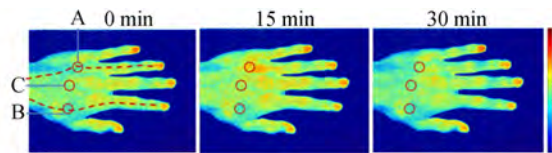
(c)PI of hand back in natural state

图 6 自然状态手背的血流分布图像及测量点 PI 值 Fig. 6 Distribution of blood flow and PI of interest points on back of hand in nature state

线,选取 A,B,C 3 个点作为 PI 值测量点,PI 值计算方式同软管实验。A 点为液门穴,所处经络为手少阳三焦经;B 为合谷穴,所处经络为手阳明大肠经;C 点为非穴位对照点。30 min 内,手背血流伪彩色图的颜色变化不明显,其各测量点的 PI 值波动较小。这说明人体在安静状态下手部皮肤的血流流速较为稳定,但不同位置的流速又略有差异。

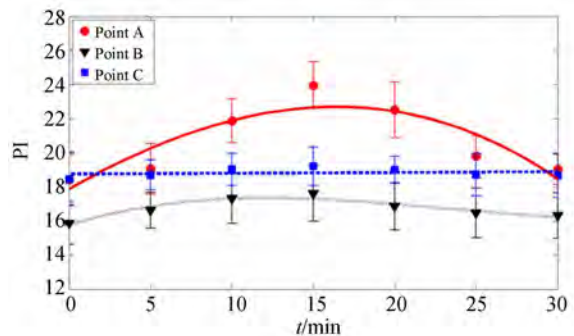
4.2 外关穴艾灸实验

图 7 所示为艾灸外关穴(与 A 点同经络)后的手背,在 15 min 艾灸结束后,A 点周围及其所在的手少阴三焦经沿线颜色由浅变深,变化最为明显,B 点周围及其所在的手阳明大肠经沿线和非穴位对照点 C 点周围的颜色变化不明显。停灸后,A 点所在经络的颜色逐渐变淡,整个手背的颜色在停灸 15 min 后趋于稳定。



(a)艾灸前 (b)艾灸中 (c)艾灸后

(a)Before moxibustion (b)In moxibustion (c)After moxibustion



(c)艾灸过程中手背的 PI 曲线

(c)PI of back of hand in moxibustion state

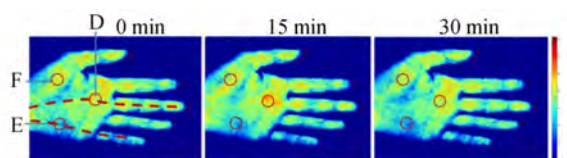
图 7 艾灸外关穴手背血流伪彩色图及测量点 PI 值 Fig. 7 Distribution of blood flow and PI of interest points on back of hand for moxibustion at Waiguan point

根据 A,B,C 3 个检测点的 PI 值统计处理结果,拟合得出艾灸过程中 PI 值的变化曲线,如图 7(c)所示。30 min 内 A 点液门穴的 PI 值较 0 时刻最大升高 30.07%, B 点合谷穴最大升高 10.94%,而 C 点非穴位的 PI 值则几乎没有变化。A 点与艾灸穴位点同处一条经络,其艾灸后

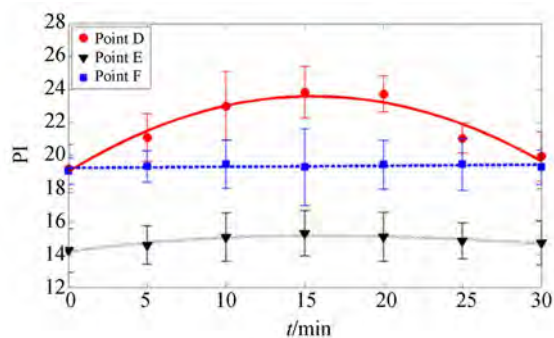
的变化也最为明显;B 点所在经络受艾灸少量热辐射影响,PI 值略有起伏;C 点既不是穴位点也不处于经络之上,几乎不受艾灸的影响。

### 4.3 内关穴艾灸实验

图 8 所示为艾灸内关穴(与 D 点同经络)后的手掌,图中虚线为经络线。选取 D,E,F 3 个点作为 PI 值测量点,D 点为劳宫穴,所处经络为手厥阴心包经;E 为少府穴,所处经络为手少阴心经;F 点为非穴位对照点。在 15 min 艾灸结束后,D 点周围及其所在的手厥阴心包经沿线颜色由浅变深,变化最为明显,E 点周围及其所在的手少阴心经沿线和非穴位对照点 F 点周围的颜色变化不明显。停灸后,D 点所在经络的颜色逐渐变淡,整个手背的颜色在停灸 15 min 后趋于稳定。



(a) 艾灸前 (b) 艾灸中 (c) 停灸后  
(a) Before moxibustion (b) In moxibustion (c) After moxibustion



(c) 艾灸时手掌 PI 值的变化曲线  
(c) PI of palm in moxibustion state

图 8 艾灸内关穴手掌血流伪彩色图及测量点 PI 值  
Fig. 8 Distribution of blood flow and PI of interest points on palm for moxibustion at Neiguan point

根据 D,E,F 3 个检测点的 PI 值统计处理结果,拟合得出艾灸过程 PI 的变化曲线,如图 8(c) 所示。由图可知,D 点劳宫穴的 PI 值较 0 时刻最大升高 26.81%,E 点少府穴最大升高 9.71%,而 F 点非穴位点没有明显变化。D 点与艾灸穴位点同处一条经络,其艾灸后的变化也最为明显;E 点所在经络受艾灸少量热辐射影响,PI 值略有起

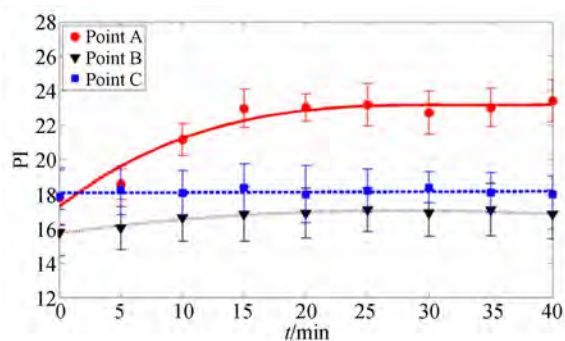
伏;F 点既不是穴位点也不处于经络之上,因此受到艾灸的影响较小。D,E,F 3 点的 PI 值变化规律与上述手背 A,B,C 3 点的变化一致,因所处经络和位置不同各点受到艾灸的影响也不同。

上述两组实验中,C 点和 F 点作为背景参考点,其 PI 值稳定,这表明使用小直径线香艾灸对手部非穴位点的温度影响可以忽略,同时也证明其它检测点的 PI 变化有效。

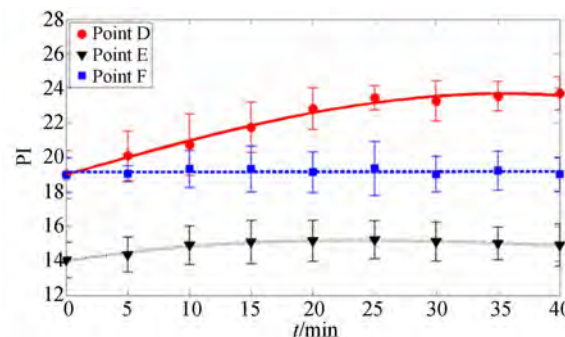
### 4.4 艾灸时长对艾灸效果的影响

为探究艾灸时长对其效果的影响,将前述实验的艾灸时间由原来的 15 min 延长至 40 min 重新进行实验。图 9(a)为 40 min 时手背各检测点的 PI 变化曲线,图 9(b)为 40 min 时手掌各检测点的 PI 变化曲线。从图中可以看出,手背检测点的 PI 值在 20 min 时趋于稳定,手掌检测点 PI 值约在 25 min 左右开始趋于稳定,随艾灸时间的延长,手部血流呈现出一个较为稳定的状态。

目前,缺乏对艾灸时长(灸量)的统一标准,在中医理疗过程中,医生更多依靠医学典籍记载,加



(a) 手背的 PI 值变化曲线  
(a) PI of back of hand



(b) 手掌的 PI 变化曲线  
(b) PI of palm of hand

图 9 艾灸内关穴或外关穴 40 min 各测量点 PI 值变化  
Fig. 9 PI of interest points when moxibustion at Neiguan point or Waiguan point for 40 min

之自身经验,再根据病症特点、穴位特点以及医治对象的身体状况等多种因素确定灸治时长。多数医学文献中的实验则是以 15~30 min 为参考时长<sup>[12,14,24]</sup>,本实验证明了此艾灸时长的合理性。

## 5 结 论

本文应用 LSBFI 技术检测了 10 例健康志愿者外关穴(手少阳三焦经)和内关穴(手厥阴心包经)艾灸前后的血流变化,发现不同循经线上的经穴的功能作用存在差异,得到了艾灸后手背或手

掌的血流分布变化。当艾灸外关穴或内关穴时,该穴位所在经络上其它经穴(如液门穴或劳宫穴)的 PI 值变化明显,相比之下,其它经络上的经穴和非穴位点的 PI 值受艾灸的影响较小。艾灸可以改变机体一定部位的微循环,增强机体的新陈代谢,这是艾灸治疗疾病的机理之一,使用 LSBFI 技术可以观察到这一现象。通过检测艾灸后手部的血流分布图变化,能够了解 LSBFI 技术在艾灸效应检测中的使用效果,从大范围体表循环的角度探讨艾灸的作用和效果,从而为该技术在中医疗效检测中的应用奠定了基础。

## 参考文献:

- [1] 田牛. 微循环概念的探讨[J]. 微循环学杂志, 1994, 4(1): 4-6.  
TIAN N. Approching on concept of microcirculation [J]. *Chinese Journal of Microcirculation*, 1994, 4(1): 4-6. (in Chinese)
- [2] 李传杰, 毕力格, 朱柏君, 等. 针刺对急性心肌梗病人左心功能微循环及 CAMP 和 CGMP 的影响[J]. 中国针灸, 1983, 3(2): 1-4.  
LI CH J, BI L G, ZHU B J, *et al.*. Effect of acupuncture on left ventricular function microcirculation, CAMP and CGMP in patients with acute myocardial infarction[J]. *Chinese Acupuncture & Moxibustion*, 1983, 3(2): 1-4. (in Chinese)
- [3] 穆祥, 段慧琴, 张涛, 等. 经线区皮内微血管网络自律运动有序性的研究[J]. 中国中医基础医学杂志, 2005, 11(1): 55-60.  
MU X, DUAN H Q, ZHANG T, *et al.*. Research on the physiological characteristic of the meshwork of microcirculation in meridian areas inside skin [J]. *Chinese Journal of Basic Medicine in Traditional Chinese Medicine*, 2005, 11(1): 55-60. (in Chinese)
- [4] 张栋, 李顺月, 王淑友, 等. 运用激光多普勒血流成像仪探讨针灸作用原理的初步研究[J]. 中国针灸, 2004, 24(7): 499-502.  
ZHANG D, LI SH Y, WANG SH Y, *et al.*. Preliminary study on mechanisms of acupuncture and moxibustion by laser Doppler perfusion imaging[J]. *Chinese Acupuncture & Moxibustion*, 2004, 24(7): 499-502. (in Chinese)
- [5] KHALIL A, HUMEAU-HEURTIER A, ABRAHAM P, *et al.*. Microvascular blood flow with laser speckle contrast imaging: Analysis of static scatterers effect through modelling and simulation [C]. *Proceedings of European Modelling Symposium, IEEE*, 2014: 82-86.
- [6] 张红艳. 面向临床应用的激光散斑血流成像系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学博士论文, 2012: 20-28.  
ZHANG H Y. *Research on Laser Speckle Blood Flow Imaging System for Clinical Application* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012: 20-28. (in Chinese)
- [7] 宋磊磊, 孔平, 于小强, 等. 一种用于研究激光散斑血流成像方法的测试系统[J]. 光学仪器, 2015, 37(2): 107-110, 115.  
SONG L L, KONG P, YU X Q, *et al.*. A measurement system to study the technique of laser speckle flowgraphy[J]. *Optical Instruments*, 2015, 37(2): 107-110, 115. (in Chinese)
- [8] HUMEAU-HEURTIER A, ABRAHAM P, MAH G. Analysis of laser speckle contrast images variability using a novel empirical mode decomposition: comparison of results with laser Doppler flowmetry signals variability[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2015, 34(2): 618-627.
- [9] KIYOTA N, SHIGA Y, TAKAHASHI H, *et al.*. Large vessel area of the optic nerve head, measured with laser speckle flowgraphy, is significantly reduced in eyes with preperimetric glaucoma [J]. *Clinical & Experimental Ophthalmology*, 2015, 43(9): 841-843.
- [10] HECHT N, MULLER M M, SANDOW N, *et al.*. Infarct prediction by intraoperative laser speckle imaging in patients with malignant hemispheric stroke [J]. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, 2016, 36(6): 1022-1032.

- [11] MIRDELL R, IREDAHL F, SJBERG F, *et al.*. Microvascular blood flow in scalds in children and its relation to duration of wound healing: A study using laser speckle contrast imaging[J]. *Burns*, 2016, 42(3): 648-654.
- [12] TIAN Y Y, HUANG T, LITSCHER G, *et al.*. Comparison of acupuncture Hegu (LI4) by metal or laser needle on facial blood perfusion using laser speckle technique[J]. *Journal of Acupuncture and Meridian Studies*, 2011, 4(3): 187-192.
- [13] 杨李健, 张涛, 黄涛, 等. 针对穴区皮内微血管舒缩振幅的影响[J]. *微循环学杂志*, 2012, 22(3): 30-31.
- YANG L J, ZHANG T, HUANG T, *et al.*. Effect of acupuncture and moxibustion on intracerebral microvascular systolic and shrinking amplitude[J]. *Chinese Journal of Microcirculation*, 2012, 22(3): 30-31. (in Chinese)
- [14] 朴盛爱, 孟向文, 朱成慧, 等. 刺络疗法对神经根型颈椎病患者局部血流灌注量的影响[J]. *天津中医药*, 2014, 31(11): 656-659.
- PIAO SH A, MENG X W, ZHU CH H, *et al.*. Influence of collateral puncture on local blood perfusion in patients with cervical spondylosis of nerve root type[J]. *Tianjin Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2014, 31(11): 656-659. (in Chinese)
- [15] RIGDEN J D, GORDON E I. The granularity of scattered optical maser light[J]. *Proceedings of IRE*, 1962, 50: 2367-2368.
- [16] FERCHER A F, BRIERS J D. Flow visualization by means of single-exposure speckle photography[J]. *Optics Communications*, 1981, 37(5): 326-330.
- [17] BRIERS J D, WEBSTER S. Laser speckle contrast analysis (LASCA): a non-scanning, full-field technique for monitoring capillary blood flow[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 1996, 1(2): 174-179.
- [18] BRIERS J D. Laser speckle contrast imaging for measuring blood flow [J]. *Optica Applicata*, 2007, 37(1-2): 139-152.
- [19] DUNCAN D D, KIRKPATRICK S J. Can laser speckle flowmetry be made a quantitative tool[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2008, 25(8): 2088-2094.
- [20] 孔平, 杨晖, 郑刚, 等. 激光散斑血流成像技术研究新进展[J]. *光学技术*, 2014, 40(1): 21-26.
- KONG P, YANG H, ZHENG G, *et al.*. Advances in laser speckle flowgraphy technique[J]. *Optical Technique*, 2014, 40(1): 21-26. (in Chinese)
- [21] 苗鹏. 高分辨率激光散斑血流成像技术及其应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2011: 34-38.
- MIAO P. *High Resolution Laser Speckle Imaging of Blood Flow: Methods and applications* [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011: 34-38. (in Chinese)
- [22] PARKER J A, KENYON R V, TROXEL D E. Comparison of interpolating methods for image resampling[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 1983, 2(1): 31-39.
- [23] JAKOBSSON A, NILSSON G E. Prediction of sampling depth and photon pathlength in laser Doppler flowmetry[J]. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 1993, 31(3): 301-307.
- [24] 黄阳, 邱莲娜, 陈海芬. 不同艾灸时间对脑卒中后睡眠功能障碍影响的随机对照研究[J]. *山西中医*, 2016, 32(10): 19-22.
- HUANG Y, QIU L N, CHEN H F. Randomized controlled research on effect of different moxibustion times on sleep disorders after stroke [J]. *Shanxi Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2016, 32(10): 19-22. (in Chinese)

#### 作者简介:



贾亚威(1991—),男,山东滨州人,博士研究生,主要从事光电精密测试技术方面的研究。E-mail: jialdian@foxmail.com

#### 导师简介:



杨晖(1981—),男,上海人,博士,副教授,博士生导师,2003年、2006年、2009年于上海理工大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事光电精密测试技术、激光测量、颗粒技术等方面的研究。E-mail: yanghui@usst.edu.cn