

文章编号: 1005-5630(2015)02-0107-04

一种用于研究激光散斑血流成像方法的测试系统

宋磊磊¹, 孔平², 于小强¹, 李然¹, 杨晖¹

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093; 2. 医疗器械高等专科学校 基础部, 上海 200093)

摘要: 激光散斑血流成像(laser speckle flowgraphy, LSFG)技术也称激光散斑衬比分析(laser speckle contrast analysis, LSCA)技术, 该技术采用一种无需扫描的全场光学成像方法, 可对血流变化进行定量分析。激光散斑衬比分析方法可分为空间衬比、时间衬比及时空联合衬比三种分析方法, 但已有研究中缺乏对三种不同衬比分析方法的应用范围及处理结果准确性等因素的综合分析。通过采用含有TiO₂悬浮颗粒的液体流经软管模拟生物体血液流动变化的实验, 介绍了激光散斑成像技术原理, 并对空间、时间及时空联合衬比分析方法进行了对比分析, 实现对不同速度之间各种衬比运算结果的比较。实验结果表明, 时空联合衬比分析方法相比于单纯的空间衬比或单纯的时间衬比测试范围广, 在保证较高的时间分辨率和空间分辨率的同时, 减少了数据处理的运算量, 提高了散斑衬比的准确性。

关键词: 激光散斑; 血流成像; 时空联合; 衬比分析

中图分类号: O 436 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2015.02.004

A measurement system to study the technique of laser speckle flowgraphy

SONG Leilei¹, KONG Ping², YU Xiaoqiang¹, LI Ran¹, YANG Hui¹

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for
Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Foundation Department, Shanghai Medical Instrumentation College, Shanghai 200093, China)

Abstract: Laser speckle flowgraphy (LSFG) technique, also known as laser speckle contrast analysis (LSCA), is a full field optical imaging method without scanning, which can quantitatively analyze the change of blood flow. LSCA method is commonly used in space, time and the ratio of contrast lining spatial-temporal speckle contrast analysis method. We analyze the applications and the accuracy of the previous researches, in which the analysis methods lack of three different contrast factors. Through the use of TiO₂ containing suspended particles in the fluid through a hose simulated biological changes in the blood flow, we introduce the principle of LSFG technique, and compare the methods of space, time and spatial and temporal contrast analysis. We implement the various different speeds to compare the results of various contrast analysis methods. The experimental results show that the spatial-temporal contrast analysis method compared to the simple spatial contrast or the simple time contrast test range can guarantee the time resolution and high spatial resolution at the same time, reduce the

收稿日期: 2014-09-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61007002); 上海市研究生教育创新计划项目(SHGEUSST1301)

作者简介: 宋磊磊(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事光电仪器及血流检测研究。E-mail: sll-1987@163.com

通信作者: 杨晖(1981—), 男, 副教授, 主要从事光电检测及颗粒测试技术研究。E-mail: yanghui313@126.com

computation of data processing, and improve the accuracy of the speckle contrast.

Keywords: laser speckle; flowgraphy; spatial-temporal; contrast analysis

引 言

如何进行血流监测一直是生物医学领域研究的热点,研究一种能对区域性血流速度进行实时监测的技术是这个领域的发展趋势。现有的血流监测手段,如功能核磁共振成像和正电子发射断层成像,受限于较低的时间分辨率(秒量级)和空间分辨率(毫米量级),并且设备价格昂贵。X射线血管造影和荧光血管造影技术均需向被测者体内注射造影剂,不利于其推广。目前应用相对广泛的激光多普勒血流测量技术属单点测量,若要进一步实现二维血流成像则需要结合机械扫描装置,这会降低时间分辨率和空间分辨率^[1]。相比传统的血流监测技术,激光散斑血流成像技术能够实现对区域性血流速度分布信息进行实时监测,并且具有较高的时间分辨率(几十毫秒)和空间分辨率(数微米)的特点,近年来日益受到人们的重视^[2]。

1 激光散斑血流成像技术基本原理

激光散斑血流成像(laser speckle flowgraphy, LSFG)技术也称激光散斑衬比分析(laser speckle contrast analysis, LSCA)技术,该技术的原理是利用血管中红细胞运动产生的后向动态散斑对比度值来获取血流速度信息。通过散斑成像的方式就可获得全场的二维血流分布图像,可进行长时间连续的血流监测,真正实现了实时高分辨率血流成像。

在1960年早期,伴随激光器的发明和使用,人们发现,当激光照射在粗糙物体表面时,在接收面会观察到光强随机分布的高对比度颗粒状图像,这种现象被称为“散斑”。散射粒子的运动会引起散斑图案的模糊,并且随着散射粒子运动速率的增大,模糊程度越显著。为描述散斑图像的统计特性和模糊程度,Goodman利用散斑强度的一阶统计特性引入“衬比”^[4]的概念,其定义为散斑图像灰度变化的标准偏差与其均值之比

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

式中: K 为散斑衬比; σ_I 为散斑图像灰度变化的标准偏差; \bar{I} 为其灰度均值。

根据Fercher等的工作,散斑衬比与散射粒子运动速率之间的关系^[5]为

$$K = \sqrt{\frac{e^{-2x} - 1 + 2x}{2x^2}} \quad (2)$$

式中 x 为散射粒子运动速率, $x = T/\tau_c$,其中 T 为CCD相机的曝光时间, τ_c 为电场去相关时间。 τ_c 反映了电场强度波动的快慢,而散射粒子的运动速度决定了电场的波动。综上可知,通过计算散斑图像的衬比可以得到散射粒子的运动信息。

激光散斑血流成像技术是利用激光散斑图像提取被观测物体的二维流速分布信息。在数据分析过程中,现有散斑图像的衬比计算方法主要有空间衬比分析(laser speckle spatial contrast analysis, LSSCA)方法、时间衬比分析(laser speckle temporal contrast analysis, LSTCA)方法以及在此基础上衍生出的时空联合衬比分析(laser speckle spatial-temporal contrast analysis, LSSTCA)方法。如图1(a)所示,LSSCA方法是通过计算 $N_s \times N_s$ (其中 N_s 为空间滑动窗口的像素数)大小的空间滑动窗内的像素衬比,将其作为中心像素衬比,利用此方法绘制整幅图像的空间衬比图。图中 R 、 C 为CCD接收面长宽方向上的像素数。如图1(b)所示,LSTCA方法是通过连续采集多帧图像,计算它们相同位置处像素灰度的衬比并将其赋值给相应位置,得到整幅图像的时间衬比图。两种衬比计算方法各有优劣:LSSCA方法对单帧散斑图像进行计算,保留了原始图像的时间分辨率,但由于采用 $N_s \times N_s$ 空间滑动窗,因此导致空间分辨率下降;而LSTCA方法未使用空间滑动窗,具有很高的空间分辨率,但由于需要采集多帧图像,因此导致时间分辨率下降。如图1(c)所示,LSSTCA方法是利用计算 $N_s \times N_s \times N_t$ (其中 N_t 为时间滑动窗口的

图像帧数)的时空窗内像素灰度的衬比,绘制整幅图像的时空衬比图。由于 LSSTCA 方法所用的滑动窗维数小于单纯空间域上分析的 LSSCA 方法,时间轴上的帧数小于单纯时间域上 LSTCA 方法,所以具有较好的时间分辨率与空间分辨率^[3]。

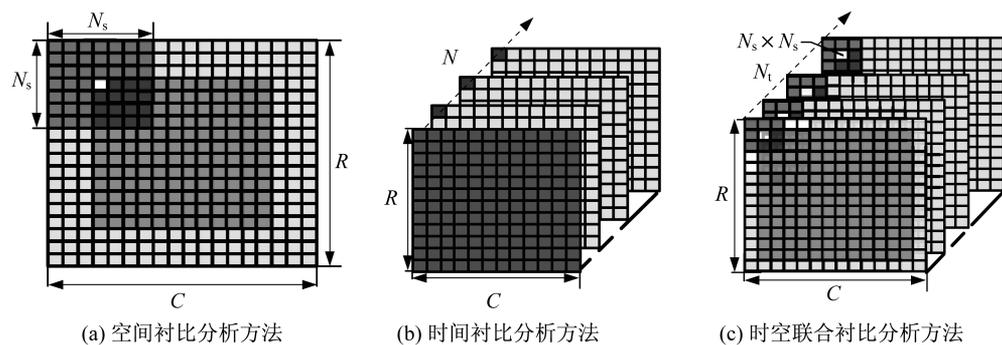


图1 激光散斑血流成像衬比分析方法

Fig. 1 Laser speckle flowgraphy contrast analysis

本实验针对3种不同分析方法进行了分析对比,采用含有 TiO_2 的悬浮颗粒的液体流经软管实验模型模拟生物体血液流动的变化。通过观察实验模型中不同流速处的衬比结果之间的关系,验证激光散斑血流成像3种不同衬比分析方法的应用范围及处理结果的准确性。

虽然 Fercher 等通过推导建立了散斑衬比与散射粒子运动速率之间的联系,但是在生物样品中,我们无法准确判断血流的速率,因此,我们无法利用生物样品进行判断散斑衬比与散射粒子运动速率之间的联系。本文通过测试含有 TiO_2 悬浮颗粒的溶液在不同速率下流动的实验来模拟生物血流的变化,验证散斑衬比与散射粒子运动速率之间的关系^[6]。

2 实验装置及方法

2.1 实验装置

典型的激光散斑衬比成像系统如图2所示,主要包括激光光源模块、成像模块与图像采集模块3个组成部分。本实验系统采用含有 TiO_2 悬浮颗粒的液体流经透明软管搭建的实验模型,测试装置3D模型图如图3所示,其中a、b两处软管分叉部分表示软管由一支管分成两个大小、直径均相同的分支,目的是使流经几处软管的颗粒数量相同,保证图中 C_1 与 C_2 以及 C_2 与 C_3 之间的颗粒速度为倍数关系。通过监测不同区域血流的变化,并重点对图中选取的成倍速率 C_1 、 C_2 及 C_3 处的衬比值进行分析,以此来验证不同激光散斑衬比分析方法的准确性。曝光时间固定为 10 ms,通过采集不同速度区域内的图像进行衬比计算,判断激光散斑衬比计算方法与流速的关系。

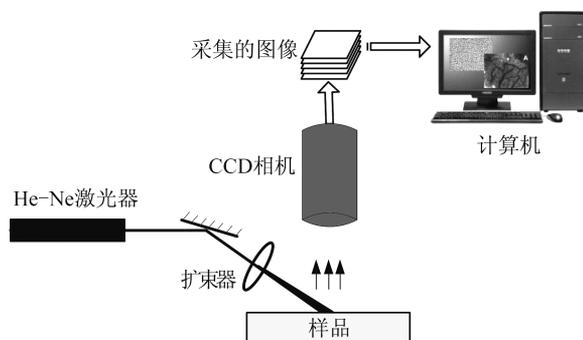


图2 系统组成结构图

Fig. 2 The system structure diagram

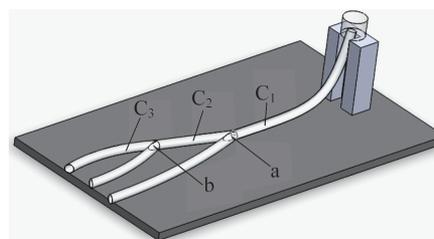


图3 实验测试装置3D模型图

Fig. 3 Schematic diagram of the experiment equipment

2.2 实验原理及数据分析

在每种流速下采集 30 幅原始序列散斑图像。分别选取 C_1 、 C_2 和 C_3 处区域,并利用空间、时间以及时空联合衬比方法计算散斑衬比图像。

Parthasarathy 等^[7]给出散斑衬比 K 和 τ_c 的方程关系式为

$$K(T, \tau_c) = \left[\beta \rho^2 \frac{e^{-2x} - 1 + 2x}{2x^2} + 4\beta \rho(1 - \rho) \frac{e^{-x} - 1 + x}{x^2} + (1 - \rho)^2 \right]^{1/2} + C_{\text{noise}} \quad (3)$$

式中: ρ 为经过移动光学散射的激光分量; C_{noise} 为常数代表噪声; β 为与散斑大小、偏振、光源相干性等系统参数有关的系统因子。在忽略静态光散射($\rho \rightarrow 1$)和噪声($C_{\text{noise}} \rightarrow 0$)的情况下,式(3)可简化为

$$K(T, \tau_c) = \left[\beta \frac{e^{-2x} - 1 + 2x}{2x^2} \right]^{1/2} \quad (4)$$

当 CCD 曝光时间 T 固定且 $T \gg \tau_c$ 时, $1/\tau_c$ 与散射粒子的平均速率 v 呈正比。LSFG 中散斑衬比可以近似为

$$K = av^{-1/2} \quad (5)$$

式中 a 为比例常数。在文献[8]中作者提出 τ_c 为微秒量级,本实验中,曝光时间固定采用 10 ms,远大于 τ_c ,因此可以满足式(5)近似条件。

3 实验结果及分析

图 4 为不同 N 值下 C_1 处激光散斑衬比值与实际流速的关系, N 为散斑像素大小。本实验主要针对动态散斑进行衬比分析计算,对实验数据分析可得,激光散斑衬比取决于散斑图的空间抽样。式(5)适用于所有 N 值进行的激光散斑衬比分析。

实验数据证明,在一定范围内的 N 值(0.39~6.25)和流动速度($20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)下,LSFG 的相对变化是一致的(见图 5)。不同 N 值下 C_1 和 C_2 处之间的 LSFG 方法的比值接近 2,这一结果与两处流速的相对比值是一致的。

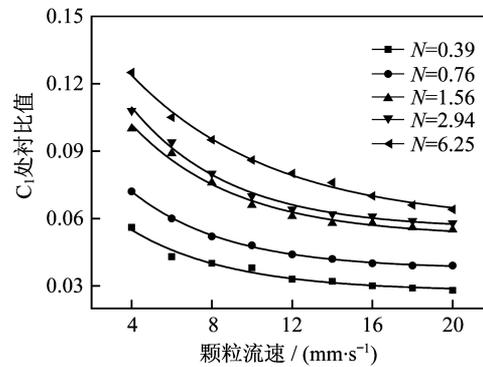


图 4 不同颗粒大小情况下,激光散斑衬比值随颗粒流速的变化情况

Fig. 4 Laser speckle contrast with the variation of particle velocity for different particle sizes

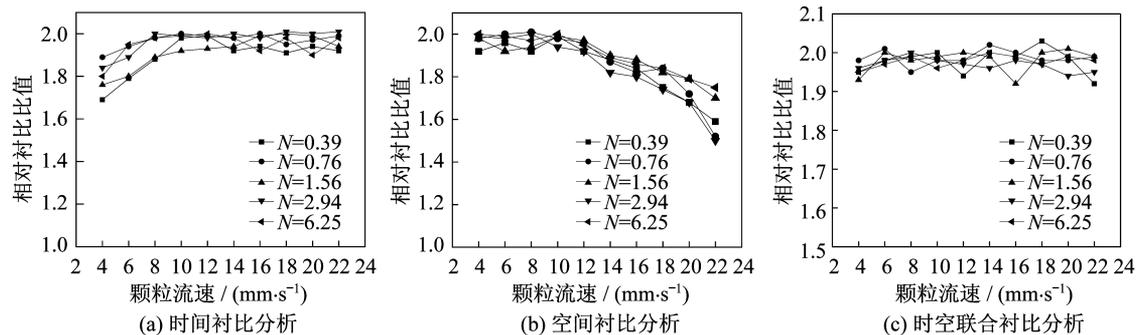


图 5 固定散斑大小时对应 C_1 与 C_3 处衬比值与颗粒流动速度的关系

Fig. 5 The values of contrast at C_1 and C_3 with respect to the relative flow speed when the speckle size is fixed

参考文献:

- [1] HAN L F, TANG W Y, WANG J, et al. Measurement of involute profile with small clamping eccentricity in a gear measuring center [J]. *Strojnicki Vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 59(4):269-278.
- [2] LAZOPOULOS A. Error estimates in Monte Carlo and Quasi-Monte Carlo integration[J]. *Acta Physica Polonica Series B*, 2004, 35(11):2617-2632.
- [3] TAKEOKA F, KOMORI M, TAKAHASHI M, et al. Gear checker analysis and evaluation using a virtual gear checker [J]. *Measurement Science & Technology*, 2009, 20(4):1-12.
- [4] 孙光宇,李平. CNC 齿轮测量中心标准中齿廓倾斜偏差测量不确定度参数的确定[J]. *工具技术*, 2009, 43(9):97-99.
- [5] 王阔,马勇. 改进后的 CNC 齿轮测量中心 Mahr891E 螺旋线偏差测量系统测量不确定度评定[J]. *工具技术*, 2008, 42(6):91-94.
- [6] 石照耀. 复杂螺旋曲面特征线测量的理论与技术研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2001.
- [7] 潘建根,丁鹏飞,沈海平,等. LED 在线测试中的 PLF 测量不确定度分析[J]. *光学仪器*, 2008, 30(3):8-12.
- [8] 黄美发,景晖,匡兵,等. 基于拟蒙特卡罗方法的测量不确定度评定[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(1):120-125.
- [9] 邵明省. 基于蒙特卡罗方法的 LED 灯光子运动研究[J]. *光学仪器*, 2010, 32(1):59-62.
- [10] 石照耀,张宇,张白. 三坐标机测量齿轮齿廓的不确定度评价[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(4):766-771.

(编辑:程爱婕)

=====

(上接第 110 页)

值得注意的是,使用时空联合衬比分析(图 5(c))比单纯的时间衬比分析(图 5(a))或单纯的空间衬比分析(图 5(b))所得 C_1 和 C_2 处的 K 值之比更接近 2。利用时间衬比分析方法在低速下比值偏差比较大,利用空间衬比方法时在高速下相对速度比值要小于 2,而使用时空联合衬比分析方法时相对流速一直保持在 2 左右。

同样在 C_1 与 C_3 处所得结果相同,利用时间衬比分析方法时相对衬比值仍然保持在一个略低于 4 的值,而空间衬比方法却呈线性衰减。这一结果在不同滑动窗大小(5 pixel×5 pixel, 7 pixel×7 pixel 和 9 pixel×9 pixel)下观察时均得到相同的体现。

4 结 论

通过观察 TiO_2 悬浊液的动态散斑实验,可以证明散斑衬比值随着像素与散斑大小的比值的增大而增大。使用时空联合衬比分析方法要比单纯的时间衬比分析方法或单纯的空间衬比分析方法更准确,可以很好地评估相对血流量的变化,尤其是在较快或较慢的流速条件下。

参考文献:

- [1] 王珍,刘庆莹. 高时空分辨的脑功能光学成像研究进展[J]. *生物化学与生物物理进展*, 2008, 35(5):488-495.
- [2] 郑刚,申晋,孙国强,等. 对动态光散射颗粒测量技术中几个问题的讨论[J]. *上海理工大学学报*, 2002, 24(4):313-318.
- [3] 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, 2012.
- [4] GOODMAN J W. *Speckle phenomena in optics; theory and application*[M]. Berlin:Roberts and Company, 2006.
- [5] FERCHER A F, BRIERS J D. Flow visualization by means of single-exposure speckle photography[J]. *Optics Communications*, 1981, 37(5):326-330.
- [6] 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):21-24.
- [7] PARTHASARATHY A B, TOM W J, GOPAL A, et al. Robust flow measurement with multi-exposure speckle imaging[J]. *Optics Express*, 2008, 16(3):1975-1989.
- [8] 杜述松,王咏梅,王英鉴. 空间应用干涉成像光谱仪的研究[J]. *光学仪器*, 2008, 30(3):77-82.

(编辑:程爱婕)