

文章编号: 0258-7025(2006)11-1477-04

飞秒激光散斑相关法

刘文军^{1,2}, 周常河¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 利用飞秒激光散斑的信息, 可以得知散射体的空间运动信息。为此提出了飞秒激光散斑相关测量技术, 将散射体变化或移动前后的飞秒散斑场分别用 CCD 探测器记录下来并储存于计算机中, 对移动前的飞秒散斑场和移动后的飞秒散斑场进行相关性运算, 就可以确定出散射体的有关特性或移动量, 实现对飞秒散斑场移动实时测量。结果表明, 实验中散射体的位移量与用相关算法得到散射体的移动量相吻合, 证实了飞秒散斑相关法测量的可行性。

关键词 超快光学; 飞秒激光; 散斑; 互相关; 自相关

中图分类号 TN 247 **文献标识码** A

Femtosecond Laser Speckle Cross-Correlation Technique

LIU Wen-jun^{1,2}, ZHOU Chang-he¹

¹ *Information Optics Laboratory, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*
² *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*

Abstract Displacement of the scattering media from speckle information can be obtained. So a novel femtosecond laser speckle technique was proposed. For measuring the displacement of a scattering object by using two images which are taken before and after the object moved. Since the two images are recorded by a charge coupled device (CCD) camera and stored on separate frames in computer, it is possible to use a cross-correlation algorithm to determine the displacement field in real-time. In experiment, displacement of the scattering media is in agreement with the result obtained by cross-correlation algorithm. It is shown that femtosecond laser speckle cross-correlation technique should be a useful for measuring the movement of a scattering object under femtosecond laser illumination.

Key words ultrafast optics; femtosecond laser; speckle; cross-correlation; autocorrelation

1 引言

飞秒激光被广泛应用于物理、化学、生物学等领域^[1~3], 它与分子、生物体相互作用导致散斑的产生是常见的现象。最近提出了飞秒激光散斑的概念^[4], 详细研究了飞秒散斑的空间特性。激光散斑属于散射干涉现象, 它普遍存在于激光成像过程中。散斑携带了物体的许多信息, 例如用散斑的对比度测量反射表面的粗糙度, 利用散斑的动态情况测量物体运动的速度, 利用散斑进行光学信息处理

等^[5~10]。利用飞秒激光散斑的信息, 同样可以得知散射体的变化特性或空间运动信息。激光散斑可以用曝光的办法进行测量, 而利用 CCD 和计算机技术可以避免显影和定影的过程, 从而实现实时测量的目的。

散斑相关法是一种用于测量物体移动场的技术^[11~14], 物体变化或移动前后的散斑场分别用 CCD 探测器记录下来并储存于计算机中, 对移动前的散斑场和移动后的散斑场进行相关性运算, 就可以确定出场的移动量, 它不需要进行条纹分析, 也不

收稿日期: 2006-04-05; 收到修改稿日期: 2006-05-15

作者简介: 刘文军(1968—), 男, 中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生, 主要从事飞秒激光测量和传输特性及飞秒激光加工等方面的研究。E-mail: liuwenjun68@siom.ac.cn

导师简介: 周常河(1966—), 男, 浙江人, 中国科学院上海光学精密机械研究所研究员, 博士生导师, 目前研究方向为微结构光学与飞秒信息处理技术。E-mail: chazhou@mail.shcnc.ac.cn

需要对照相干板做处理,比传统的散斑干涉条纹法操作简单。本文对飞秒激光照射散射体产生的散斑相关测量技术进行了研究,这种技术利用了飞秒激光照射下散射体的散射信息,具有重要的应用前景。

2 原 理

用飞秒激光光源照射到粗糙物体的表面,用 CCD 探测器记录下物体移动前和移动后的散斑场,实验装置如图 1 所示。移动前的散斑场作为参考场

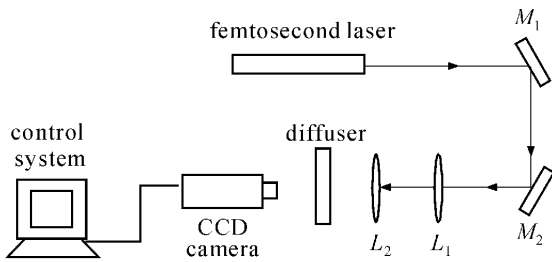


图 1 拍摄飞秒激光散斑及进行相关性运算的装置示意图

M_1, M_2 : 反射镜; L_1, L_2 : 会聚透镜

Fig. 1 Schematic of recording and disposing femtosecond laser speckles

M_1, M_2 : reflecting mirror; L_1, L_2 : converging lens

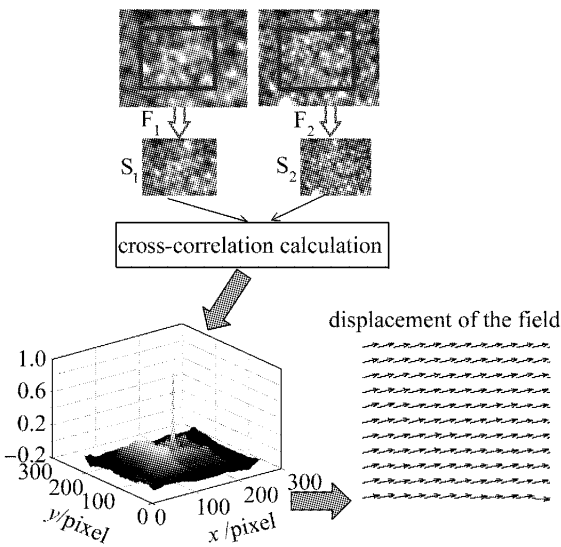


图 2 飞秒散斑相关法原理图

Fig. 2 Principle of the femtosecond speckle correlation technique

F_1 , 物体移动后的散斑场作为移动场 F_2 , 如图 2 所示。从 F_1 和 F_2 中分别截取一个子图像 S_1 和 S_2 , 对子图像 S_1 进行自相关运算, 飞秒散斑场的自相关函数为

$$G(x_1, y_1; x_2, y_2) = \langle I(x_1, y_1)I(x_2, y_2) \rangle, \quad (1)$$

式中 $I(x_1, y_1)$ 为观察面上任一点 Q_1 上的散斑光强, $I(x_2, y_2)$ 为观察面上另一点 Q_2 上的散斑光强,

$\langle \rangle$ 为统计平均值。光强的计算公式为

$$I(x_1, y_1) = U(x_1, y_1)U^*(x_1, y_1), \quad (2)$$

$$I(x_2, y_2) = U(x_2, y_2)U^*(x_2, y_2), \quad (3)$$

式中 $U(x, y)$ 为光场的复振幅, 将(2)和(3)式代入(1)式可以得到

$$G(x_1, y_1; x_2, y_2) = \langle I(x_1, y_1) \rangle \langle I(x_2, y_2) \rangle + |U(x_1, y_1)U^*(x_2, y_2)|^2 = \langle I \rangle^2 [1 + \mu(x_1, y_1; x_2, y_2)], \quad (4)$$

在(4)式的推导过程中使用了散斑场强度平均值的统计特性 $\langle I(x_1, y_1) \rangle = \langle I(x_2, y_2) \rangle = \langle I \rangle$, $\langle I \rangle$ 为散斑场强度的平均值, $\mu(x_1, y_1; x_2, y_2) = |\langle U(x_1, y_1)U^*(x_2, y_2) \rangle|^2 / \langle I \rangle^2$ 称作复相干系数, 表示为

$$\mu(x_1, y_1; x_2, y_2) = \exp[-(\Delta x^2 + \Delta y^2) / S^2], \quad (5)$$

式中 $\Delta x = (x_2 - x_1)$, $\Delta y = (y_2 - y_1)$, S 为散斑的平均半径。将(5)式代入(4)式可以得到

$$G(x_1, y_1; x_2, y_2) = \langle I \rangle^2 [1 + \mu(x_1, y_1; x_2, y_2)] = \langle I \rangle^2 \{1 + \exp[-(\Delta x^2 + \Delta y^2) / S^2]\}, \quad (6)$$

对(6)式进行归一化处理, 得到归一化的自相关函数为

$$g(\Delta x, \Delta y) = G(\Delta x, \Delta y) = 1 + \exp[-(\Delta x^2 + \Delta y^2) / S^2]. \quad (7)$$

自相关运算的峰值 (X, Y) 对应于散斑场的初始位置。

用互相关算法计算子图像 S_1 和 S_2 之间统计特性的近似性, 类似于用参考场 S_1 对移动场 S_2 进行扫描, 当扫描到 S_2 中某区域的统计特性与参考场 S_1 的统计特性相同时, 这一区域就是子图像 S_1 移动后的场 S'_1 。飞秒激光散斑场分布的互相关函数为

$$G_C(x_1, y_1; x_2, y_2) = \langle I(x_1, y_1)I'(x_2, y_2) \rangle, \quad (8)$$

当散射体发生一个微小的平移 $d = (\xi + \eta)^{1/2}$ 后, 观察面上任意一点 Q_2 的散斑光强分布为 $I'(x_2, y_2)$, 光强

$$I(x_1, y_1) = U(x_1, y_1)U^*(x_1, y_1), \quad (9)$$

$$I'(x_2, y_2) = U'(x_2, y_2)U'^*(x_2, y_2), \quad (10)$$

将(9)和(10)式代入(8)式, 可以得到

$$G_C(x_1, y_1; x_2, y_2) = \langle I'(x_1, y_1) \rangle \langle I(x_2, y_2) \rangle + |U'(x_1, y_1)U^*(x_2, y_2)|^2 = \langle I \rangle^2 [1 + \mu_C(x_1, y_1; x_2, y_2)], \quad (11)$$

式中

$$\mu_C(x_1, y_1; x_2, y_2) = |\langle U'(x_1, y_1)U^*(x_2, y_2) \rangle|^2 / \langle I \rangle^2$$

称作复互相关系数,表示为

$$\mu_c(x_1, y_1; x_2, y_2) = \exp\left[-\frac{\Delta x + \xi(1 + D/\rho)}{S^2}\right] \times \exp\left[-\frac{\Delta y + \eta(1 + D/\rho)}{S^2}\right], \quad (12)$$

式中 $\Delta x = (x_2 - x_1)$, $\Delta y = (y_2 - y_1)$, D 为散射体与 CCD 探测器之间的距离, ρ 为光束在散射体处的波面曲率半径。对(12)式进行归一化,可以得到

$$g_c(\Delta x, \Delta y) = 1 + \exp\left[-\frac{\Delta x + \xi(1 + D/\rho)}{S^2}\right] \times \exp\left[-\frac{\Delta y + \eta(1 + D/\rho)}{S^2}\right]. \quad (13)$$

互相关运算的峰值位置就是子图像 S_1 从 (X, Y) 移动到 $S'_1(X + \Delta X, Y + \Delta Y)$ 所发生的位移。

3 实 验

实验装置如图 1 所示,飞秒激光器(中心波长为 818 nm,重复频率为 76 MHz,脉宽为 74 fs,谱宽为 20 nm,带宽积为 0.59329)^[15] 的光束依次穿过各个元件通光口径的中心,因透镜 L_1 与 L_2 之间的距离为 2 倍焦距,所以 L_2 的出射光束为平行光。将经透镜扩展后的平行光束投射到散射体上,散射体固定在二维微调平台(最小移动距离为 1 μm)上。CCD 摄像机将接收到的数字图像在计算机屏幕上显示,并存入计算机硬盘以便于数据处理。拍摄的散射体的飞秒散斑图像如图 3 所示,图像的大小为 100 pixel \times 80 pixel。

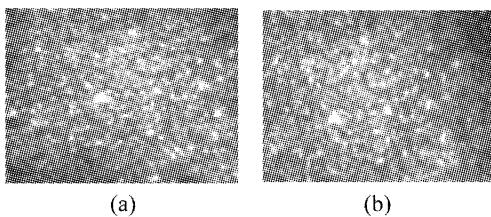


图 3 散射体的飞秒散斑图像

(a) 位移前;(b) 位移后

Fig. 3 Pictures of femtosecond laser speckle

(a) before displacement; (b) after displacement

从计算机中调出数据,用编写的相关性运算程序对散射体发生位移前的飞秒散斑图像进行自相关运算,对散射体发生位移前的散斑图像和移动后的散斑场进行互相关运算,只需要几秒钟即可以得到运算结果,如图 4 所示。自相关运算峰值坐标为 $(54.4, 37.6)$,它的位置表示散斑场的初始位置;互

相关运算峰值坐标为 $(66.2, 18.2)$,它的位置表示散斑场移动后的位置。因此,散斑场的移动量坐标为 $(11.8, -19.4)$,所用 CCD 照相机的像素大小为 7 μm ,则散射体的移动量为 $\Delta x = 82.6 \mu\text{m}$, $\Delta y = -135.8 \mu\text{m}$ 。二维微调平台的位移值为 $\Delta x' = 82 \mu\text{m}$, $\Delta y' = -137 \mu\text{m}$,两者测量的结果相吻合,证实飞秒散斑相关法测量的可行性。

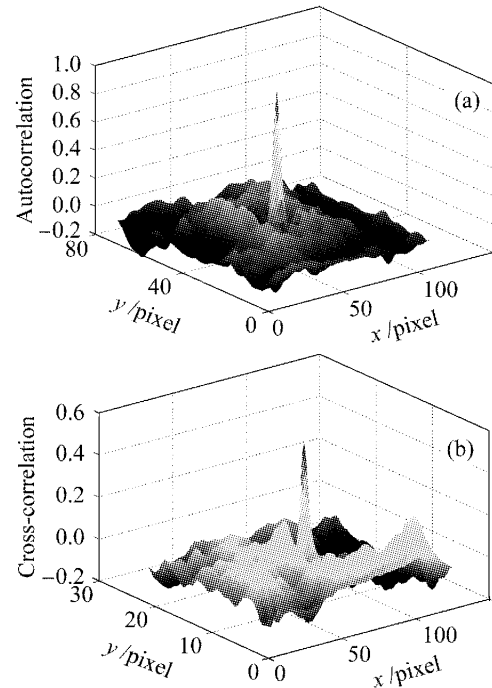


图 4

(a) 散射体移动前飞秒散斑场的归一化自相关函数图像;
(b) 散射体移动前后两个飞秒散斑场的归一化互相关函数图像

Fig. 4

(a) normalized autocorrelation of speckle field before diffuser displacement; (b) normalized cross-correlation of speckle field before and after diffuser displacement

4 结 论

提出飞秒激光散斑相关法对移动场的测定,将散射体变化或移动前后的飞秒散斑场分别记录下来并储存于计算机中,对移动前的飞秒散斑场和移动后的飞秒散斑场进行相关性运算,就可以确定出散射体的有关特性或移动量。实验中测得的散射体的位移量为 $\Delta x' = 82 \mu\text{m}$, $\Delta y' = -137 \mu\text{m}$,用相关算法得到散射体的移动量为 $\Delta x = 82.6 \mu\text{m}$, $\Delta y = -135.8 \mu\text{m}$,实验结果与测量结果相吻合,证实了飞秒散斑相关法测量的可行性。该方法可对飞秒散斑场移动进行实时测量,可精确到亚像素,这对于微小位移的测量较为精确。但对于更为复杂的微小三维移动或转动,该方法只能给出部分信息,还需要对

这一方法进行完善和发展。

参 考 文 献

- 1 T. Feurer, J. C. Vaughan, K. A. Nelson. Spatiotemporal coherent control of lattice vibrational wave [J]. *Science*, 2003, **299**(5605):374~377
- 2 Herschel Rabitz. Shaped laser pulse as reagents [J]. *Science*, 2003, **299**(5606):525~527
- 3 P. Tian, D. Keusters, Y. Suzuki *et al.*. Femtosecond phase-coherent two-dimensional spectroscopy [J]. *Science*, 2003, **300**(5625):1553~1555
- 4 Wenjun Liu, Changhe Zhou. Femtosecond laser speckles [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(30):6506~6510
- 5 J. C. Dainty. *Laser Speckle and Related Phenomena* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1984
- 6 Zhou Changhe, Chen Mingyi, Mo Yulong. Electronic speckle pattern normalized cross-correlation method for displacement measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 1992, **12**(5):431~435
周常河,陈明仪,莫玉龙. 电子散斑归一化互相关法测位移[J]. *光学学报*, 1992, **12**(5):431~435
- 7 Cao Liangcai, Ouyang Chuan, He Qingsheng *et al.*. Improvement of correlation veracity of the volume holographic correlator based on the speckle modulation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2):244~247
曹良才,欧阳川,何庆声等. 散斑调制用于提高体全息相关器的识别率 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(2):244~247
- 8 Zhang Zhi, Lu Yang, Quan Renfu. Application of holographical-speckle method for intervertebral disc measurement in orientation of the lumbar facet [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2):257~261
张之,鲁阳,全仁夫. 激光全息-散斑法分析腰椎内固定装置稳定性[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2):257~261
- 9 Chen Siying, Huang Chenguang, Duan Zhuping. Digital speckle correlation method and its application on impact deformation measurement [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6):735~739
陈思颖,黄晨光,段祝平. 数字散斑相关法在高速变形测量中的应用[J]. *中国激光*, 2004, **31**(6):735~739
- 10 Cheng Haiying, Zhu Dan, Luo Qingming *et al.*. Optical monitoring of the dynamic change of blood perfusion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(7):668~672
程海英,朱 , 骆清铭等. 血液灌注率动态变化的光学监测 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(7):668~672
- 11 T. F. Begemann, K. D. Hinsch. Measurement of random processes at rough surfaces with digital speckle correlation [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2004, **21**(2):252~262
- 12 L. I. Muravskii, N. V. Fit'o. Estimating the displacements of the surfaces of deformable objects and of solid bodies by an optical speckle-correlation technique [J]. *J. Opt. Technol.*, 2005, **72**(5):410~414
- 13 T. Fricke-Begemann. Three-dimensional deformation field measurement with digital speckle correlation [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(34):6783~6796
- 14 R. Feiel, P. Wilksch. High-resolution laser speckle correlation for displacement and strain measurement [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(1):54~60
- 15 Enwen Dai, Changhe Zhou, Guowei Li. Dammann SHG-FROG for characterization of the ultrashort optical pulses [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(16):6145~6152