

文章编号: 0253-2239(2001)02-211-04

激光散斑相关性和位移的关系研究

龚浩瀚 刘 诚* 陈大庆 王海凤 姜锦虎
(苏州大学理学院物理系, 苏州 215006)

摘要: 用统计理论研究激光散斑的相关性与位移的关系, 并对此关系进行了实验研究。理论和实验结果对于数字散斑相关测量具有一定的指导意义。

关键词: 相关性; 散斑; 位移

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A

1 引 言

将散斑颗粒作为信息载体, 利用数字相关方法^[1~5]测量物体的位移及位移场。这种方法借助光电子技术、图像处理技术和计算机实现了信息记录和提取的高速自动化, 实现了以像元为基本单位的测量, 避免了传统方法对条纹提取、分析的繁冗过程。数字散斑相关测量是基于物体变形前后两幅数字散斑灰度图像进行相关运算。对于物体仅发生平移的情况, 如果散斑颗粒的灰度形貌没发生变化, 进行相关搜索, 其相关系数 $C_{\max} = 1$; 如果散斑颗粒形貌发生变化, 则相关系数的最大值 $C_{\max} < 1$, 相关搜索测得的位移精度变差, 引入误差。理论上相关插值精度公认可达 0.01 像元。然而由于种种原因, 散斑灰度形貌发生变化, 相关测量精度达不到 0.01 像元, 甚至远大于该值。众所周知, 对于人工散斑, 灰度形貌基本不变; 而对于激光散斑, 物体平移时, 其形貌将发生变化, 影响测量精度。本文用统计理论讨论了物体位移对细激光束照明漫射体产生的空间散斑灰度形貌的影响。

2 空间散斑相关测量测位移方法的误差来源

细激光束照明漫射体, 在物前方空间形成空间散斑场。CCD 靶面平行物平面, CCD 将光强信号转换为电信号, 再经图像卡数字化后形成灰度信号存储在帧存储器中。当物体发生位移 (u, v, w) 时, 空间散斑颗粒也发生位移 (U, V, W), 散斑的空间运

动规律由文献[6]给出, 如果采用准直光照明和垂直观测且物体仅发生平移, 则位移关系由下式给出:

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}. \quad (1)$$

由上式可知, 如果物体仅发生面内位移, 则空间散斑在 CCD 靶面上也发生同样的位移, 在帧存储器中分别记录下物体位移前后的空间散斑图。在位移前散斑图上, 取包含某散斑颗粒的子区, 将其在位移后的数字散斑图上进行相关搜索, 由相关系数的最大值求出位移值。从理论上讲这种方法不存在任何近似, 但在实际测量中, 往往会有较大误差。误差的原因很多, 主要起因在于 (1) 式所描述的关系, 要求物体在位移前后被照明区域没有发生变化, 即要求照明物体的同一部分。当用细激光束照明被测物时 (如文献[1]的情况), 如图 1 所示, 实线和虚线所包围的区域分别表示位移 u 前后的被照明区域。位移

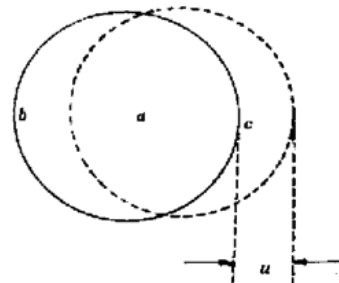


Fig. 1 Illuminated area before and after displacement

前为 $a + b$, 位移后为 $a + c$, a 是两个光斑中相同的部分, 但在位移前后发生了位移 u 。因此, 由 a 所形成的散斑将严格按 (1) 式的规律随物体移动, 由它所形成散斑颗粒的灰度分布 $I_a(x, y)$ 或复振幅分布 $U_a(x, y)$ 在位移前后不变。而 b 和 c 由于是物上不同区域, 由它们形成的两个散斑场没有联系, 所以

* 现通讯地址: 徐州师范大学物理系, 邮编: 221009。

收稿日期: 1999-09-22; 收到修改稿日期: 1999-11-04

当物体发生位移时, 散斑颗粒由 P 点移至 P' 点时, 散斑颗粒的灰度形貌发生变化, 使相关系数下降, 测量位移的精度下降, 给测量带来误差。

3 位移对灰度值影响的统计描述

设物平面坐标为 x_0, y_0 , 观察面坐标为 x, y , 如图 2 所示, 细激光束照明物体, 在观察面上形成散斑场, P 点的光波复振幅 $U_P(x, y)$ 为物上 a 和 b 两部分在 P 点形成的光波复振幅 $U_a(x, y)$ 和 $U_b(x, y)$ 的相干叠加, 物发生位移后, 散斑由 P 点移至 P' 点, $P'(x, y)$ 点的复振幅 $U_{P'}(x, y)$ 为 a 和 c 两部分在 P' 点复振幅 $U_a(x - u, y)$ 和 $U_c(x - u, y)$ 的相干叠加, 即

$$\left. \begin{aligned} U_P(x, y) &= U_a(x, y) + U_b(x, y), \\ U_{P'}(x - u, y) &= U_a(x - u, y) + U_c(x - u, y). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$



Fig. 2 Speckle's move after displacement

设被照明物体的粗糙度均匀, 被照明光斑内散射基元的总数为 N , a 部分的为 N_1 , 则 b, c 部分均为 $N - N_1$ 。又根据统计光学^[7] 知, $U_{bi}(x, y)e^{j\varphi_{bi}(x, y)}, U_{ci}(x - u, y)e^{j\varphi_{ci}(x - u, y)}$ 为圆形复值高斯随机变量, 其实部方差等于虚部方差, 即

$$\sigma^2 = \sigma_1^2 = \sigma_R^2 = (N - N_1) \langle |U_{bi}|^2 \rangle / 2. \quad (4)$$

(3) 式为一个常数相幅矢量和大量随机相幅矢量之和, 令 U_a 的模为 S_0 , U_P 和 $U_{P'}$ 的模为 S , 则 U_P 和 $U_{P'}$ 的模的概率密度分布函数为

$$P(S) = \frac{S}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{S^2 + S_0^2}{2\sigma^2}\right] I_0 \frac{SS_0}{\sigma^2}, \quad (5)$$

式中 $I_0(SS_0/\sigma^2)$ 为零阶第一类修正贝塞尔函数。

令 ΔU 为 U_P 和 $U_{P'}$ 之差, 有

$$\frac{\Delta U}{S_0} = \frac{\sum_b U_{bi}(x, y)e^{j\varphi_{bi}(x, y)}}{S_0} - \frac{\sum_c U_{ci}(x - u, y)e^{j\varphi_{ci}(x - u, y)}}{S_0}. \quad (6)$$

上式说明 S_0 越大, ΔU 对散斑场的影响越小。 S_0 越

(2) 式可改写为

$$\left. \begin{aligned} U_P(x, y) &= U_a(x, y) + \sum_b U_{bi}(x, y) \times \\ &\quad \exp[j\varphi_{bi}(x, y)], \\ U_{P'}(x - u, y) &= U_a(x - u, y) + \\ &\quad \sum_c U_{ci}(x - u, y) \exp[j\varphi_{ci}(x - u, y)]. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$U_{bi}(x, y) \exp[j\varphi_{bi}(x, y)]$ 分别为区域 b 内第 i 个散射基元在 $P(x, y)$ 产生光波复振幅的振幅和相位。 $U_{ci}(x - u, y) \exp[j\varphi_{ci}(x - u, y)]$ 分别为区域 c 内第 i 个散射基元在 $P'(x - u, y)$ 产生光波复振幅的振幅和相位。 $U_a(x, y), U_a(x - u, y)$ 为由物上同一区域 a 平移前后分别在 P 和 P' 点形成的光波复振幅, 由散斑空间运动规律知 $U_a(x, y) = U_a(x - u, y)$ 。

大, 对应的散斑的亮度越高, 这表明亮散斑灰度形貌受位移的影响较暗散斑小。这跟下节所述实验事实相符合。

当 S_0 足够大时, (3) 式就变为一个强相幅矢量与一个弱相幅矢量之和。根据统计光学理论知, (5) 式便转化为

$$P(S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(S - S_0)^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (7)$$

S 的期望值 $S = S_0$, 方差 $\sigma_s^2 = \sigma^2$ 。可用 $\alpha = \sigma_s^2 / S_0^2$ 来表示各点散斑光强在统计条件下受影响的程度, S_0 代表 U_a 模的统计平均, 由(4) 式得

$$\alpha = \frac{\sigma_s^2}{S_0^2} = \frac{[(N - N_1)/2] \langle |U_{bi}|^2 \rangle}{S_0^2}. \quad (8)$$

区域 a 在 P 点形成的光强为:

$$I_a = S_0^2 = 2\sigma_a^2 = N_1 \langle |U_{bi}|^2 \rangle. \quad (9)$$

设漫射体粗糙度均匀, 各散射元在 P 点贡献的复振幅之振幅看作相等, 即

$$|U_{ai}| = |U_{bi}|,$$

则

$$\alpha = \frac{N - N_1}{2N_1}. \quad (10)$$

若当光斑为矩形时, N 反映了光斑的大小, $N - N_1$ 反映了位移大小, 令 $\Delta N = N - N_1$, 则(10) 式可以改写为

$$\alpha = \frac{\Delta N}{N - \Delta N} \quad (11)$$

(11) 式表明:

1) ΔN 越小, 即物体的位移越小, 对散斑颗粒灰度值影响就越小, 相关系数越大。

2) ΔN 不变时, N 越大, 即同样位移条件下, 物体被照明面积越大, 则对散斑颗粒灰度值影响就越小, 相关系数越大。

又因 $|U_a|$ 表示区域 a 在 P 点和 P' 点产生光振动模, 在物体位移较小时, 它基本决定了 P 点和 P' 点的光强大小, 所以选择散斑图上的亮点作为相关测量的散斑, 即 $|U_a|$ 较大时, 相关系数受物体位移

的影响较选择亮度低的散斑小。

4 实验研究

1) 位移对不同亮度散斑形貌的影响

当物体发生位移时, 散斑颗粒也发生位移。我们分别跟踪高亮度散斑(最大灰度为 180) 和低亮度散斑(最大灰度为 80), 观察它们的灰度形貌的变化。图 3(a) 、图 3(b) 和图 3(c) 是位移分别为 $dx = 0.02 \text{ mm}$ 、 0.04 mm 时高亮度散斑的灰度形貌图; 图 3(d) 、图 3(e) 和图 3(f) 则为低亮度散斑的灰度形貌图。由图可见, 由细激光束照明物体形成的空间散斑, 其灰度形貌随位移增大而变化, 高亮度散斑的灰度形貌变化小, 低亮度散斑的形貌变化大。即亮散斑灰度形貌受位移的影响较暗散斑小。

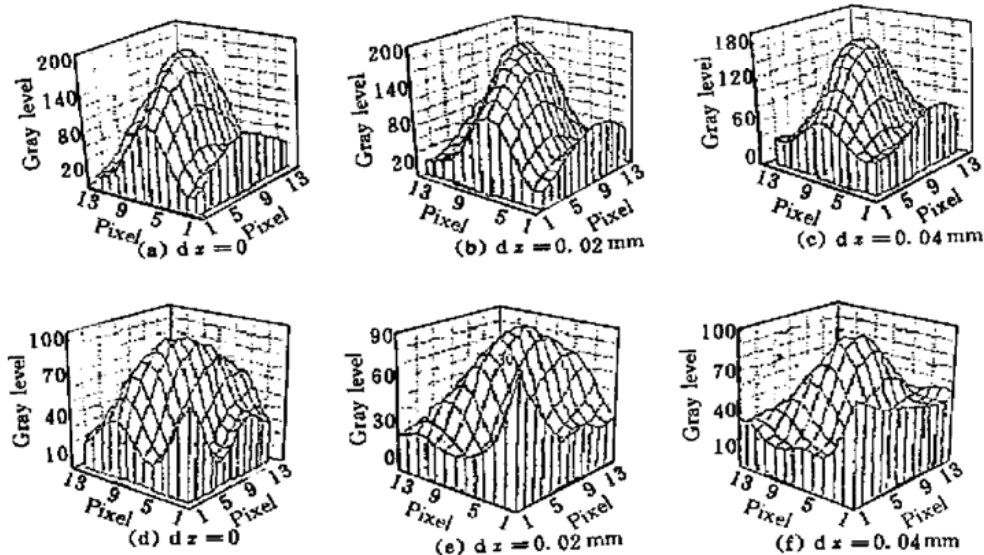


Fig. 3 Gray level figure of different brightness speckles under dissimilar displacement. (a), (b), (c): Marimum gray level= 180; (d), (e), (f): Marimum gray level= 80

2) 位移和散斑亮度对相关系数 C 的影响

采集物体在不同位移时的数帧散斑图。第一帧为位移为零的散斑图。在该帧散斑图上任选三个不同灰度的散斑颗粒, 例如最大灰度分别为 180、110 和 80。然后分别在其余各帧散斑图(对应物体不同位移时的散斑图)上分别对上述三个散斑进行相关搜索, 获得最大相关系数。图 4(a) 给出了这三个散斑颗粒的相关系数最大值 C_{max} 随位移变化的曲线。由图显见, 散斑亮度越高, 相关系数-位移曲线越平坦; 对同一散斑, 位移越大, 相关系数越小。

3) 位移和激光照明面积对相关系数的影响

相关系数随位移的增大而下降的速率跟激光的照明面积相关, 照明面积越大, 下降越慢, 如图 4(b) 所示。曲线 1 和曲线 2 对应的激光束宽度分别为

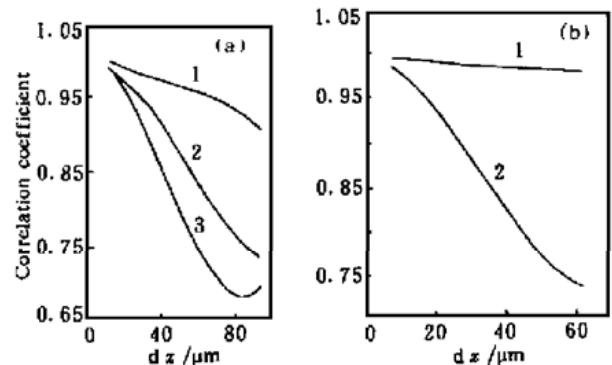


Fig. 4 Correlation coefficient-displacement curve. (a) Curve 1、2、3 respectively correspond to speckles which gray level are 180、110、80; (b) The area which is corresponded by curve 1 is greater than curve 2's

6 mm 和 2 mm。选取的散斑颗粒的最大灰度均为 180。

4) 对于非相干散斑, 物体平移时, 因成像系统是线性空不变系统, 散斑颗粒形貌不变, 故既适用于小位移测量, 又适用于大位移测量。

数十次的测试, 每次结果均符合上述定性结果。

结论 以上实验和理论分析完全符合, 细激光束照明物体产生的空间散斑用于相关测量时, 其相关性具有下述规律:

1) 在同样位移条件下, 亮度高的散斑比亮度低的散斑相关系数大, 测量误差小。

2) 同一散斑颗粒, 其灰度形貌随位移增大, 差异增大, 相关系数降低。

3) 被照明面积越大, 相关系数-位移曲线就越平坦。

正由于上述规律, 在物体发生平移时, 对散斑场中不同区域进行相关搜索, 测得的位移值有较大的离散。因此在用激光散斑进行位移测量时: 1) 只

能用于微小位移; 2) 应选择亮散斑进行相关; 3) 应使照明面积尽可能大; 4) 应用中, 应以非相干散斑作为首选。

参 考 文 献

- [1] Yamaguchi. Advances in the laser speckle gauge. *Opt. Engng.*, 1988, **27**(3): 214~ 218
- [2] Peters W H, Rason W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis. *Opt. Engng.*, 1982, **21**(3): 427~ 431
- [3] 高建新, 周辛庚. 变形测量中的数字散斑相关搜索方法. *实验力学*, 1991, **6**(4): 333~ 339
- [4] 芮嘉白, 金观昌, 徐秉业等. 一种新的数字散斑相关方法及其应用. *力学学报*, 1994, **26**(5): 599~ 607
- [5] 姜锦虎, 肖金标, 沈永昭等. 显微数字散斑相关测量技术及应用研究. *上海力学*, 1996, **17**(增刊): 105~ 109
- [6] 伍小平, 何世平, 李志超等. 空间散斑的运动规律. *物理学报*, 1980, **29**(9): 1142~ 1150
- [7] 戚康男, 秦克诚, 程 路编著. *统计光学导论*. 天津: 南开大学出版社. 1987. 166~ 175

Relationship between Laser Speckle Correlation and Displacement

Gong haohan Liu Cheng Chen Daqing Wang Haifeng Jiang Jinhu
 (Physics Department, Institute of Science, Suzhou University, Suzhou 215006)
 (Received 22 September 1999; revised 4 November 1999)

Abstract: The relationship between laser speckle correlation and displacement is studied by the statistic theory and experiment. The theoretical and experimental results agree well. The results offer a guide to the speckle correlation measurement.

Key words: correlation; speckle; displacement