

文章编号: 0253-2239(2008)03-0467-05

数字散斑相关方法实现鼠标定位原理

闫海涛 王 鸣

(南京师范大学物理科学与技术学院江苏省光电技术重点实验室, 江苏 南京 210097)

摘要 在激光鼠标工作原理的基础上,利用数字散斑相关方法对激光鼠标的定位原理进行了研究。设计实验得到散斑场并用数码相机拍摄。用图像采集卡采集 CCD 扫描散斑图像得到的图像,将图像数字化,分析数据得到了图像最优采样的像素单元和图像位移两个参量。基于两个参量,实验采集散斑图像在一定的轨迹运动下的散斑场,用 Matlab 软件模拟,并比较分析了实验和模拟结果。结果表明,用数字散斑相关方法可以实现激光鼠标的定位功能,并且分辨力可达到 $1\ \mu\text{m}$,远高于市场上激光鼠标 $30\ \mu\text{m}$ 的分辨力。

关键词 成像光学; 数字散斑; 自相关; 激光鼠标; 定位

中图分类号 TP391.41 **文献标识码** A

Orientation of Mouse Using Digital Speckle Correlation Method

Yan Haitao Wang Ming

(*Jiangsu provincial Key Laboratory on Opto-Electronic Technology, College of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210097, China*)

Abstract Based on the working principle of laser mouse, the digital speckle correlation method is used to realize orientation of laser mouse. The orientation principle is investigated. The experiment is designed to obtain the speckle pattern by a digital camera. The CCD is used to scan the moving spackle picture through the image acquisition board. Two parameters of optimum sampling, pixel and image displacement, are obtained by data analysis. The speckle picture is moved by a definite trace and shot by a digital camera, and the experiment is simulated by software Matlab. The displacement of speckle picture is processed by digital speckle correlation method. The simulated results are compared with the experimental results. The results prove the digital speckle correlation method can confirm allocation, and the obtained resolution is $1\ \mu\text{m}$, which is higher than the resolution $30\ \mu\text{m}$ of the laser mouse in market.

Key words imaging optics; digital speckle; autocorrelation; laser mouse; orientation

1 引 言

散斑计量术有许多应用,如可以利用散斑照相的二次曝光或者散斑图像相减以及电子散斑图像相减,从而得到杨氏条纹^[1],用于测量物体的应变、振动和位移,也可以通过分析散斑图像所携带的信息来测量物体表面的粗糙度和形貌^[2~6],以及自混合散斑干涉测量流体速度等^[7]。数字散斑相关方法^[8~14]是其中一种,与其他测量方法相比具有测量光路简单,对环境要求较低,可进行全场、非接触测

量等优点,在面内位移测量中得到广泛的应用。

目前激光鼠标的工作原理是利用互补金属氧化物半导体(CMOS)采集粗糙面的图像,利用移动前后图像的衬比来判定鼠标移动的方向。本文结合激光鼠标工作在有一定粗糙度的平面上进行移动,由鼠标内的激光器发光照射到该平面可以形成散斑场。设计了利用电荷耦合器件(CCD)记录散斑场得到散斑图像,由采集卡传输到计算机将散斑图像数字化,用散斑的自相关函数对散斑图像的数据进行分析和

收稿日期: 2007-06-25; 收到修改稿日期: 2007-09-10

作者简介: 闫海涛(1978—),男,河南人,博士研究生,主要从事光电子技术与激光应用等方面的研究。

E-mail: yanhaitaoyht@163.com

导师简介: 王 鸣(1950—),男,江西九江人,博士生导师,主要从事光电技术和微纳技术等方面的研究。

E-mail: wangming@njnu.edu.cn

匹配,判断目标的移动方向和移动距离。

2 数字散斑相关技术的原理

2.1 散斑场的自相关函数

设一散射屏以速度 v 做横向运动,而其出射平面上的坐标系(如图 1)固定不动。散射屏是一个纯相位物体,在单色平行光均匀照明下,散射屏出射平面光场 $A_0(r_0, t) = \exp[j\phi(r_0 - vt)]$ 形成的散斑场的复振幅为

$$A(r, t) = \int_{-\infty}^{\infty} p(r_0) A_0(r_0, t) h(r, r_0) dr_0, \quad (1)$$

式中 $p(r_0)$ 为孔径函数, $h(r, r_0)$ 为描述光场传播的权函数。所以任意一点和任意时刻的散斑场的光强为

$$I(r, t) = A(r, t) A^*(r, t), \quad (2)$$

式中角标 $*$ 为复共轭符号。

设 $\Delta I(r, t)$ 为散斑场的光强起伏,则有

$$\Delta I(r, t) = I(r, t) - \langle I(r, t) \rangle, \quad (3)$$

式中 $\langle I(r, t) \rangle$ 为散斑场的平均光强。 $\Delta I(r, t)$ 的空间-时间交叉相关函数的表征为

$$R_{\Delta I}(r_1, r_2, t_1, t_2) = \langle \Delta I(r_1, t_1) \Delta I(r_2, t_2) \rangle, \quad (4)$$

由散斑场的统计特征知, $A(r_1, t_1)$ 和 $A(r_2, t_2)$ 是联合圆对称复随机变量,应用高斯矩定理得

$$R_{\Delta I}(r_1, r_2, t_1, t_2) = |A(r_1, t_1) A^*(r_2, t_2)|^2, \quad (5)$$

用束腰半径为 ω_0 的高斯光束(激光就是高斯光束)照射散射屏,令光束轴线平行于散射屏平均平面法线,并将该轴线取为 z 轴,则孔径函数可以表示为

$$p(r_0) = \frac{\omega_0}{\omega(z_0)} \exp\left(\frac{j2\pi z_0}{\lambda}\right) \exp\left[-\frac{|r_0|^2}{\omega^2(z_0)}\right] \times \exp\left[\frac{j\pi |r_0|^2}{\lambda \rho(z_0)}\right], \quad (6)$$

式中 z_0 为由束腰平面到散射屏出射平面的距离,由左向右取正号; $\omega(z_0)$ 为散射屏出射平面上照明光斑的有效半径; $\rho(z_0)$ 为投射到散射屏出射平面上的光波的波面曲率半径。菲涅耳衍射相应的权函数为

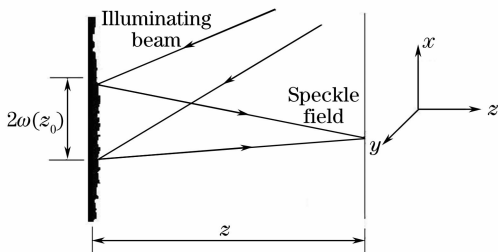


图 1 光路图和坐标方向

Fig. 1 Light path and coordinate

$$h(r, r_0) = \frac{1}{j\lambda z} \exp\left[\frac{j2\pi z}{\lambda}\right] \exp\left[\frac{j\pi |r - r_0|^2}{\lambda z}\right], \quad (7)$$

将(6)式、(7)式代入(1)中,再将(1)式代入(5)式中,并将其规范化,得

$$r_{\Delta I}(\Delta r, \tau) = \frac{R_{\Delta I}(\Delta r, \tau)}{R_{\Delta I}(0, 0)} = \exp\left[-\frac{|v|^2 \tau}{\omega^2(z_0)}\right] \exp\left[-\frac{\pi^2 \omega^2(z_0) |\sigma v \tau - \Delta r|^2}{\lambda^2 z^2}\right], \quad (8)$$

取 $\tau = 0$, 得到规范化的空间自相关函数^[13,14] 为

$$r_{\Delta I}(\Delta r, 0) = \exp\left[-\frac{\pi^2 \omega^2(z_0)}{\lambda^2 z^2} |\Delta r|^2\right], \quad (9)$$

对于相同的光学系统, $\omega(z_0)$ 和 z 是不变的。所以,通过散斑场的空间自相关函数就可以得到 $r_{\Delta I}$ 与 Δr 的关系式,可以通过 $r_{\Delta I}$ 得到移动距离的大小。

2.2 判定位移的原理

由于散斑分布是随机的,散斑图上每一点周围的一个小区域(通常取像素单元为 $n \times n$ 的小图像,称为该点的子图像)的散斑分布与其他点的子图像具有不同的统计特性。如果散射屏产生面内微位移,可以认为微位移只改变散射基元的空间位置而基本上不影响其散射特性,因而也基本上不影响散斑场的统计特征,这样散斑图上每一点的子图像也随该点作相应的位移^[10]。假设移动前物面上的待测点 k 在移动后到了 k' 点,则移动前散斑图上 k 点的子图像 A 就与变形后散斑图上 k' 点的子图像 A' 相对应,两者的相关性最高且相关系数也最大。因此 k' 位置可以通过子图像的相关位移搜索来找出,下面是具体的匹配过程。

设 $I_0 = Q_0(x_0, y_0)$ 和 $I_1 = Q_1(x_1, y_1)$ 分别为位移前后两幅散斑图, I_0 为源图像,即基准图像,代表起始状态; I_1 为目标图像,代表位移后的状态。如图 2 所示,假设要对 I_0 上点 P_0 的运动进行跟踪,则需求得点 P_1 在 I_0 上的匹配点。为此,先在源图像上取点 P_0 的特征散斑图案 f_0 ,用相关匹配的方法在

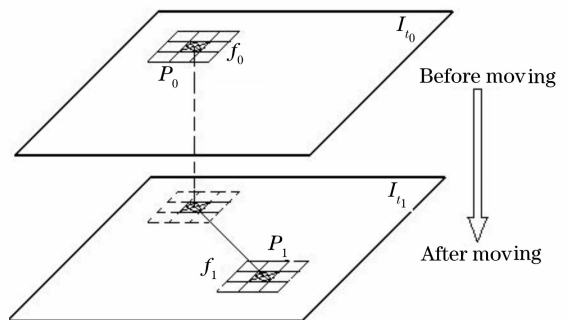


图 2 匹配示意图

Fig. 2 Sketch of correlation match

目标图像上搜索与之最匹配的散斑图案 f_1 , 搜索计算成功后, 则散斑图案 f_1 所对应的点 P_1 为 P_0 点位移后的位置, 两点之间的坐标差即为该点的位移。定义一个相关函数的相关值来表示 P_0, P_1 两点特征散斑图案 I_0 和 I_1 的匹配程度, 就可以根据匹配程度(即相关系数的大小)得到物体移动的位置, 通过由移动产生像素差求得移动距离的大小 $\Delta x_1 = x_1 - x_0, \Delta y_1 = y_1 - y_0$ 和方向 $\delta = \arctan(\Delta y_1 / \Delta x_1)$ 。

3 理论模拟和实验结果分析

3.1 实验方法

首先, 将激光(光源采用波长为 650 nm 半导体激光器)扩束后照射在铝板上产生散斑场, 用数码相机拍摄一幅 BMP 格式的散斑图像(2560 pixel \times 1920 pixel), 图 3 是 BMP 格式的散斑图像的一部分。

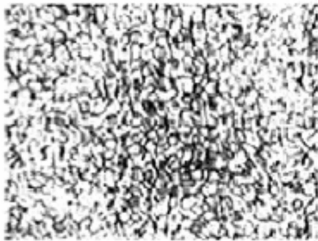


图 3 BMP 格式的散斑图像

Fig. 3 Speckle pattern of BMP format

基于光电激光鼠标的工作原理, 设计的实验装置如图 4 所示, 将 BMP 格式的散斑图纸放置在数控导轨上, 数控导轨是可以控制物体运动的速度和方向。光学系统的位移放大率为 10, 采集卡是 DH-CG400 图像采集卡, CCD 的分辨率为 768 pixel \times 576 pixel。散斑图像运动时, CCD 记录各个时刻的散斑图像。设计一个程序处理实验数据, 实现相关算法并计算出移动距离和移动方向。程序有三个参

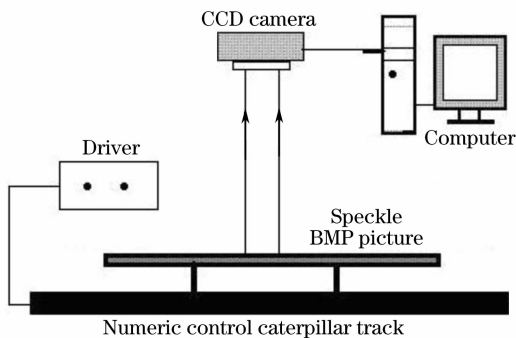


图 4 实验装置图

Fig. 4 Experimental setup

量 x, y 和 δ_0 。选取 BMP 图像的一个方向为 x 方向, 垂直方向为 y 方向。其中 $x > 0, y > 0, \delta_0 \in [0^\circ, 90^\circ], (x, y)$ 是子图像点的位置坐标, δ_0 是移动前后子图像点的移动方向。

3.2 实验结果处理与分析

进行相关运算的的参量为: 采样子区的大小是 12 pixel \times 12 pixel, 相关运算精度是 0.1 pixel, 相关搜索的范围 40 pixel \times 40 pixel。表 1 中的数据是每次移动的位移 Δr 和对应的最大相关系数 $r_{\Delta L \max}$, 在点周围区域选取 12 pixel \times 12 pixel。可以看出, 随距离的增加, 最大相关系数变小。因为随着距离的增加, 图像改变的程度会增加, 最大相关系数减小。为了防止失真的情况(如表格中大于 5 μm 的情况)出现, 要得到较大的相关系数, 因此每次移动距离 Δr 不能太大。

表 1 像素单元为 12 pixel \times 12 pixel 条件下的实验结果

Table 1 Experimental results for pixel square

12 pixel \times 12 pixel

$r_{\Delta L \max}$	$\Delta r / \mu\text{m}$	$r_{\Delta L \max}$	$\Delta r / \mu\text{m}$	$r_{\Delta L \max}$	$\Delta r / \mu\text{m}$
0.8459	1	0.6264	4	0.5134	7
0.7747	2	0.6045	5	0.5008	8
0.7156	3	0.5705	6	0.5331	9

表 2 中的数据是选取的像素块和对应的最大相关系数(每次移动的距离 Δr 为 1 μm), 以及统计的与最大相关系数接近的所有像素块的个数 Q_k , 它作为像素块可能判定错误的一个参量。从数据可以看出, 最大相关系数会减小, 统计到的接近最大相关系数的像素单元的个数也会减少, 所以像素单元太小也容易失真, 因为像素单元越大, 散斑图像携带的信息量越大, 越不容易失真, 但像素单元越大计算的数据量同样会增加。

表 2 在 $\Delta r = 1 \mu\text{m}$ 条件下的实验结果

Table 2 Experimental results for $\Delta r = 1 \mu\text{m}$

$r_{\Delta L \max}$	Pixel square	Q_k
0.9737	3 \times 3	50
0.9612	4 \times 4	22
0.9585	5 \times 5	13
0.9068	8 \times 8	7
0.8706	10 \times 10	2
0.8459	12 \times 12	0
0.7202	15 \times 15	0
0.6034	20 \times 20	0

通过对表中数据进行分析, 可以得出, 像素单元的选取 12 pixel \times 12 pixel 最好, 每次移动的距离 Δr 应该满足: $1 \leq \Delta r \leq 5 \mu\text{m}$ 。表 3 就是在这样的条件下

得到的。表 3 中设初始的位置定为(0,0), $(\Delta x, \Delta y)$ 为移动方向的理论值, δ 为移动方向的实验值, ϵ_θ 为移动距离的理论值, $(\Delta x', \Delta y')$ 为移动距离的实验值, (ϵ_x, ϵ_y) 为移动距离理论值和实验值间的误差, δ_0

表 3 实验结果和理论结果的比较

Table 3 Comparison of theoretical and experimental values

$r_{\Delta l \max}$	$(\Delta x, \Delta y) / \mu\text{m}$	$(\Delta x', \Delta y') / \mu\text{m}$	$(\epsilon_x, \epsilon_y) / \mu\text{m}$	$\delta_0 / (^\circ)$	$\delta / (^\circ)$	$\epsilon_\theta / (^\circ)$
0.9882	(1,0)	(1,0)	(0,0)	90.00	90.00	0
0.9896	(0,1)	(0,1)	(0,0)	0	0	0
0.9576	(1,1)	(1,1)	(0,0)	45.00	45.00	0
0.8574	(1,2)	(1,2)	(0,0)	63.43	63.43	0
0.8459	(2,1)	(2,1)	(0,0)	26.57	26.57	0
0.7124	(2,2)	(2,2)	(0,0)	45.00	45.00	0
0.7093	(1,3)	(1,3)	(0,0)	71.57	71.57	0
0.7054	(3,1)	(3,1)	(0,0)	18.43	18.43	0
0.6064	(2,3)	(3,4)	(1,1)	53.13	56.13	-3.18
0.6120	(3,2)	(4,3)	(1,1)	36.87	33.69	3.18
0.5693	(1,4)	(1,5)	(0,1)	78.69	75.96	2.73
0.5698	(4,1)	(5,1)	(1,0)	11.31	14.04	-2.73

从表 3 可以看出,在最大相关系数大于 0.7000 时,能够很准确判断出移动距离和移动方向。在移动距离的大小相同时,最大相关系数是非常接近的。而随移动距离的增加,最大相关系数进一步减小,会有一些误差出现,但是距离的最大误差值只有 $1 \mu\text{m}$,角度最大误差只有 3.18° 。这样的误差对于鼠标的定位功能是可以接受的,得到的实验数据也说明比现在的鼠标的分辨力要高很多

3.3 模拟结果分析

用 Matlab 软件模拟了数字散斑相关方法,假设散斑图像沿轨迹 $y=x^2$ ($x \in [0,10]$) 运动,得到了一组模拟结果。在实验中,使散斑图也沿轨迹 $y=x^2$ ($x \in [0,10]$) 运动,然后用数字散斑相关方法技术进行处理,等到了一组实验结果。如图 5,“*”代表实验模拟的轨迹,“▷”代表实验的结果。从图中可以看出,理论模拟结果和实验结果符合得相当

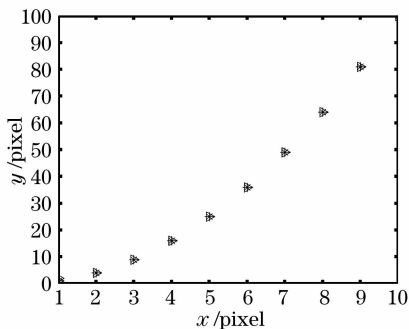


图 5 沿轨迹 $y=x^2$ 运动的理论模拟结果和实验结果
Fig. 5 Theoretical simulative and experimental results with moving trace of $y=x^2$

好。只有在(1,1)的位置出现了两个点,表明位移太小时,相关计算会产生误差,说明相关算法是有分辨极限的。结果表明运用数字散斑相关方法技术可以实现鼠标的光学定位功能,能够准确地判定确定散斑图像移动的位移。

4 结 论

在连续移动的状态下,利用数字散斑相关技术处理 CCD 记录的散斑图像,能够准确地判定出移动的距离的大小和方向,也就是能够实现激光鼠标的功能。而且,用数字散斑相关算法得到的位移分辨力可以达到 $1 \mu\text{m}$ 。而现在的激光鼠标的分辨力是 30 多个微米。所以使用该技术可以提高现在的激光鼠标的分辨力。如果进一步减小 CCD 单位像素尺寸,可以得到更高的分辨力。结果说明可以用数字散斑相关方法技术设计高分辨力的光电激光鼠标。

参 考 文 献

- 1 Robert K. Erf. *Speckle Metrology* [M]. Yu Guanzheng, Li Dacheng, Cao Mang transl., Beijing: China Metrology Publishing House, 1990. 59~79
罗伯特 K. Erf. 散斑计量学[M]. 余官正,李达成,曹 芒译. 北京:中国计量出版社,1990. 59~79
- 2 S. L. Toh, C. Quan, K. C. Woo *et al.*. Whole field surface roughness measurement by laser speckle correlation technique [J]. *Optics & Laser Technology*, 2001, **33**(6): 427~434
- 3 Linda Larsson, Mikael Sjö Dahl, Fredrik Thuvander. Microscopic 3-D displacement field measurements using digital speckle photography[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2004, **41**: 767~777

- 4 Giuseppe Schirripa Spagnolo, Domenica Paoletti. Digital speckle correlation for on-line real-time measurement [J]. *Opt. Commun.*, 1996, **132**(1): 24~28
- 5 Chen Bingquan. Defect measurement based on rotating aperture-stroboscopic speckle interferometry[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(1): 76~79
陈炳泉. 旋转孔径频闪散斑干涉法用于缺陷检测[J]. 中国激光, 2007, **34**(1): 76~79
- 6 Liu Haowen, Zhang Qingchuan, Yu Shaojuan *et al.*. Investigation on the three-dimensional deformation of local shearing band by digital speckle metrology technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 898~902
刘颢文, 张青川, 于少娟 等. 数字散斑法在局域剪切带三维变形研究中的应用[J]. 光学学报, 2007, **27**(5): 898~902
- 7 Lu Min, Wang Ming, Hao Hui. Measurement of flow velocity using self-mixing speckle interference generated in laser diode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 190~194
陆敏, 王鸣, 郝辉. 半导体激光器的自混合散斑干涉测量流体速度[J]. 光学学报, 2005, **25**(2): 190~194
- 8 Chen Daqing, Gu Jihua, Jiang Jinghu. Study on the digital speckle correlation method for in-plane displacement measurement in the case of slant optical axis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 907~912
陈大庆, 顾济华, 姜锦虎. 斜光轴面内位移测量的数字散斑相关法研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(7): 907~912
- 9 Liu Wenjun, Zhou Changhe. Femtosecond laser speckle cross-correlation technique [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1477~1480
刘文军, 周常河. 飞秒激光散斑相关法[J]. 中国激光, 2006, **33**(11): 1477~1480
- 10 Chen Siying, Huang Chenguang, Duan Zhuping. Digital speckle correlation method and its application on impact deformation measurement[J]. *Chin. 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
- 11 Gong Haohan, Liu Cheng, Chen Daqing *et al.*. Relationship between laser speckle correlation and displacement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(2): 211~214
龚浩瀚, 刘诚, 陈大庆 等. 激光散斑相关性和位移的关系研究[J]. 光学学报, 2001, **21**(2): 211~214
- 12 Sun Ping, Wang Haifeng, Zhang Xi *et al.*. Study on three dimensional ESPI and its application [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(7): 840~844
孙平, 王海峰, 张熹 等. 三维电子散斑干涉技术及其应用研究[J]. 光学学报, 2003, **23**(7): 840~844
- 13 Renu Tripathi, G. S. Pati, Arvind Kumar *et al.*. In-plane displacement measurement using a photorefractive speckle correlator[J]. *Opt. Commun.*, 1998, **149**(4): 355~365
- 14 Li Shanxiang, Sun Yiling, Li Jingzhen. The tracking method of digital speckle correlation using the sequential dynamical speckle patterns and its applications[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(7): 1066~1068
李言祥, 孙一翎, 李景镇. 时间序列动态散斑相关跟踪测量原理及其应用[J]. 光子学报, 2005, **34**(7): 1066~1068