

用相关测量技术实现精确靶定位技术研究

戴亚平 黄关龙 李学春 华 能 朱健强
(中国科学院上海光机所联合实验室 上海 201800)

姜锦虎 陈大庆
(苏州大学物理系 苏州 215000)

提要 介绍了一种高功率激光装置中用于 X 光实验的精确靶定位系统. 该系统采用数字散斑相关测量的方法, 其理论精度为 0.01 个像素. 整套系统在实际运用中的误差小于 $8\ \mu\text{m}$. 该系统与计算机控制的步进电机配合使用, 具有自动化程度高、大视场高精度和非接触性等优点.

关键词 散斑, 自相关, 线性插值, CCD

在高功率激光装置打靶实验中, 靶通常是不能重复使用的, 每次实验前都要更换新靶。而多路输出的高功率激光装置具有多路对准的特点, 这样用调整光路的方法来实现精确的靶定位显然太复杂, 也不现实, 只能通过靶的三维调整来使其保持在一个最优位置上, 即实验靶需要精确的定位。因此靶定位就成为一个非常重要的关键技术, 其精度直接影响到打靶实验的结果。美国 LLNL 国家点火装置中 X 光打靶实验中对靶定位的技术要求是: 定位精度为 $6\ \mu\text{m}$; 稳定性为 $6\ \mu\text{m}$; 角分辨率为 $1\ \text{mrad}$ 。由此可见, 在高功率激光装置中, 由于其具有多路输出、多路对准的特点, 所以就要求靶定位具有非常高的精度。事实上, 高精度的靶定位在 ICF 等其他打靶实验中都有着普遍的意义。

以往国内外的靶定位系统通常采用两套夹角大于 90° 光学放大系统, 将靶放大后人眼进行判断^[1]; 或者是利用机械装置的重复稳定性来实现靶定位。这种方法的缺点是显而易见的, 一是精度低: 所采用的光学放大系统的放大倍数是有限的, 人眼的读数误差比较大; 二是调整麻烦: 无法实现自动控制; 三是由于采用了较大的放大倍数, 使视场受到了限制, 这就限制了大位移的调整。针对“神光-1”高功率激光装置的 X 激光靶室及其物理实验要求, 我们与苏州大学合作开发出一套基于数字散斑相关测量技术的靶定位系统。该系统采用 CCD 对靶面成像, 并用计算机对换靶前后的两幅图像进行数字处理, 再结合步进电机来实现精确的靶定位。整套系统具有大视场高精度、自动化程度高和只采用单个观测窗口等特点。

1 实验装置

1.1 总体介绍

整套系统的实验原理如图 1 所示。根据实验要求, 所要限制的是靶沿 x 方向的平移和绕 z 轴的转动; 而对沿 y 轴和 z 轴的平移和绕 x 轴和 y 轴的转动要求不高, 通过靶架的机械固定即可达到要求。在实验中, 靶室 6 中抽真空; 自准直反射镜 2 与靶 1 一起固定在靶架上, 并通过步

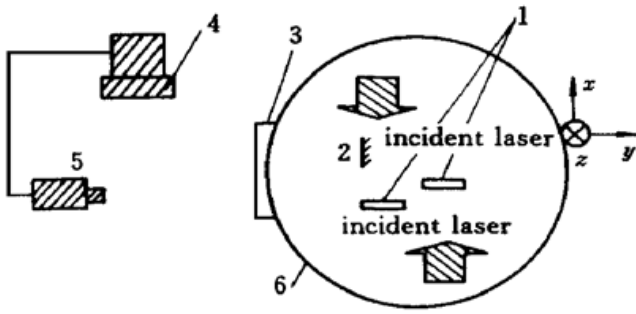


图 1 实验原理图

1: 靶; 2: 自准直反射镜; 3: 观测窗口;
4: 计算机; 5: CCD 成像系统; 6: 靶室

Fig. 1 Schematic for target position experiment

1: target; 2: self-collimating reflector; 3: view window;
4: computer; 5: CCD camera; 6: target chamber

进电机进行调整。换靶后,先用自准直反射镜 2 配合平行光管消除绕 z 轴的转动;然后利用 CCD 成像系统配合数字散斑相关测量方法限制沿 x 轴的平移。

1.2 数字散斑相关测量技术在靶精确定位系统中的运用

1.2.1 数字散斑相关测量技术^[2-4]

这里所说的数字散斑与传统意义上的激光散斑不同,所采用的数字散斑是指数字图像中划分出的一个个小区域。数字图像是用一定数量的离散的灰度值来表示的,整个图像中肯定存在着相同灰度值的点,但如果将整个图像划分为许多 $n \times m$ 的灰度值集合,则各个集合间

的相关度将非常低。从这一点上说,它类似于传统的激光散斑。

数字散斑具有以下特点:第一,散斑颗粒(即所选取的区域)的相关性随位移增大而变差,反映为散斑灰度分布(或形貌)随位移变化;第二,高亮度散斑颗粒的相关性随位移的变化比低亮度的散斑变化慢。其中第二个特点对数字散斑相关测量技术具有指导性的意义:(1)在数字散斑测量中应选取亮度高的区域,否则易发生误判;(2)在数字散斑相关测量中,采用非相干光或部分相干光照明比相干照明好。

数字散斑相关测量技术正是利用了这些特点,其基本原理是:对位移(或变形)前后的物体各采样一次(通过 CCD 成像系统实现),存储在图像卡中;在位移前的图像上选择一个子区(即数字散斑)作为样本函数,子区中心坐标为 (x_i, y_i) ,然后在位移后的图像中进行相关搜索,寻找与其相关系数 C 最大的子区,其中心坐标为 (x_i', y_i') ,这样就可以得到该子区的位移(也就是整个物体的位移)

$$d = \sqrt{(x_i' - x_i)^2 + (y_i' - y_i)^2} \quad (1)$$

式中

$$x_i' - x_i = \Delta n_x P_{Cx} \quad y_i' - y_i = \Delta n_y P_{Cy}$$

$\Delta n_x, \Delta n_y$ 分别为子区在 CCD 面上沿 x, y 方向上的位移; P_{Cx}, P_{Cy} 是 CCD 在 x, y 方向上的节距(空间周期)。而相关系数 C 定义为

$$C = \frac{\langle I \cdot I' \rangle - \langle I \rangle \cdot \langle I' \rangle}{[\langle (I - \langle I \rangle)^2 \rangle \cdot \langle (I' - \langle I' \rangle)^2 \rangle]^{1/2}} \quad (2)$$

式中 I 为灰度值, $\langle \cdot \rangle$ 为取系综平均。

由于 CCD 的像元数通常只有 512×512 , 所以如果 $\Delta n_x, \Delta n_y$ 的单位是 1 个像素的话,系统的精度显然不能满足要求。在实际使用中,采用线性插值的方法,使系统相关搜索的最小步长为 0.01 个像素,从而大大提高了系统的灵敏度和精度。

式(1)中得到的仅仅是 CCD 面上的位移。要想得到实际的位移量,就需要对系统定标,实际上也就是计算 CCD 成像系统的放大倍数。定标的过程非常简单,只要预先给出一组已知的位移 d ,运用数字散斑相关测量技术对其进行测量,得到另一组位移量 d' ,就可以得到

$$M = d'/d \quad (3)$$

而实际位移量为

$$d' = Md \quad (4)$$

这样,在靶定位系统中,当整个靶场的光路调整到最优时,采集一幅基准图像。以后在每次换靶后均对靶架上相同的位置(CCD 成像系统的位置和放大系数均应保持不变)采集一幅图像。然后在基准图像上选择一子区(子区的选取在后面介绍),再在后一幅图像中进行相关搜索来得到靶的偏移量。根据该偏移量,通过步进电机对靶面位置进行调整。经过多次计算、调整后实现靶面的精确定位。

1.2.2 间接基准的选取

数字散斑相关技术在测量单个物体的位移和形变时具有很高的相关度和精度,但对两个物体进行相关比较时,即使两个物体形状一致,其相关度和精度仍将大大降低。特别是在 X 光打靶实验中,靶的形状有许多种。这时如果对靶面成像进行相关计算得到的结果显然是不可信的,这就要求加入一个间接基准。该基准固定在靶架上,在每次换靶时保证其与靶的相对位置保持不变。这样,对该间接基准成像并进行相关计算所得到的偏移量,实际上就是靶的偏移量,从而解决了换靶带来的相关度下降的问题。

使用间接基准的一个关键问题在于如何保证该间接基准与靶的相对位置。可采用正交的读数显微镜来解决该问题(靶架可从靶室中取出),如图 2 所示(图中仅画出了一块靶,在实际使用中两块。如图 1)。所要做的是要将面 A 和面 B 调整到一个平面上,这样以后在对间接基准成像并进行相关计算时,只要选择的子区包含有面 A 和面 C 的交线,则所得到的偏移量就是靶的偏移量。两个读数显微镜沿 x 和 y 方向正交放置,通过这两个显微镜可以保证面 A 和面 B 严格地在一个面上。

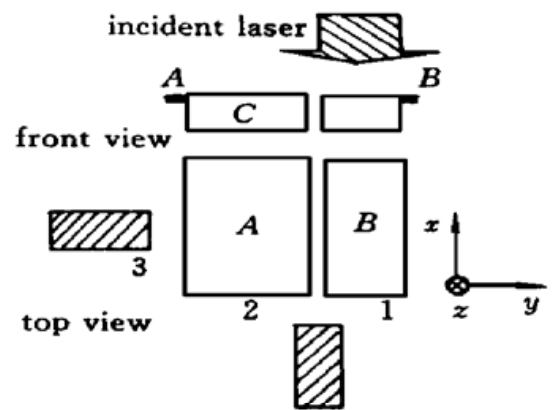


图 2 利用正交显微镜确定间接基准面与靶面的相对位置

1: 靶; 2: 间接基准面; 3: 正交显微镜

Fig. 2 Relative position of indirect datum plane and target

1: target; 2: indirect datum plane;

3: crossed microscopes

对于间接基准的选取,分别用高精度的滚珠、圆柱销和形状如图 2 所示的标准板各 1 组 10 个两两进行了相关度测量的实验,实验结果如表 1 所示。

表 1 几种不同形状间接基准的相关度(单位: %)

Table 1 The correlation coefficient for several indirect datum planes with different shapes (unit: %)

	1·2	1·3	1·4	1·5	1·6	1·7	1·8	1·9	1·10
Ball	99.67	98.58	98.00	98.07	99.75	99.49	99.50	98.94	99.28
Cylinder Standard	97.81	96.15	94.29	96.61	95.61	97.01	93.40	97.89	98.71
plate	99.93	99.91	99.90	99.96	99.94	99.96	99.92	99.94	99.91

由表可见,不同标准板之间的相关度显然是最高的,而且标准板具有非常尖锐的两条直角边,这也有利于空间定位。滚珠的相关度虽然也较高,但由于其轮廓是圆的,所以在如图 2 所示用读数显微镜定它与靶的相对位置时,会有较大的误差。

1.2.3 CCD 成像系统与数字散斑图的匹配^[2]

CCD 成像系统的调制传递函数 MTF 为光学系统的 MTF_o 和 CCD 的 MTF_c 的乘积

$$MTF = MTF_o \cdot MTF_c \tag{5}$$

MTF 是空间频率 f 的函数。 f 越高, MTF 就越小, 输出的散斑亮度变化幅度就越小。因此应尽量提高系统的 MTF, 也就是要减小空间频率 f , 那么子区的选取不能太小。

对于光学系统, 像面上最小可分辨的距离 δ_1 为 MTF 截止频率 f_0 的倒数, 即

$$\delta_1 = 1/f_0 \quad (6)$$

其中

$$f_0 = D/d_i \lambda$$

D 为物镜直径, 对无穷远光学系统 $d_i = f'$, f' 为物镜焦距。所以(6)式可写为

$$\delta_1 = \lambda f' / D \quad (7)$$

而系统的极限分辨角 ψ 为

$$\psi = K \lambda / D \quad (8)$$

其中 K 为常数, 等于 $3600 \times 180/\pi$, 单位为角秒。

可见角分辨率和 MTF 都取决于 D , D 越大, MTF 越小, f_0 越大, 散斑的灰度变化幅度越小, 但角分辨率越高。由此可见, 光学系统 D 的选择也要恰当。

此外, 当 ψ 一定时, 为提高系统的最小分辨距离, 应使成像系统的物像比减小, 即采用长焦距物镜, 以提高系统对位移的分辨率。实验中采用国产海鸥 80~200 mm 变焦摄像镜头。

1.2.4 非相干光照明的选取

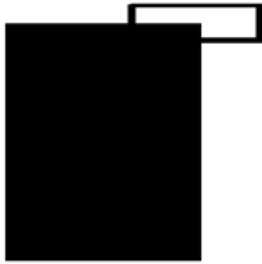


图3 采用背面照明时子区的选取
Fig. 3 The region sampling with back illumination

如前所述, 对于数字散斑相干测量, 非相干照明比相干照明好。而照明方式的选取也是非常重要的, 它直接影响到换靶前后相关测量的相关度。

如果采用正面照明的形式, 虽然间接基准在换靶前后并不更换, 但由于高功率激光打靶时会产生溅射, 所以间接基准的表面微观形貌已经发生了变化。这时进行相关计算会使相干度下降。而采用背面照明的方式则可以克服这一缺点: 背面照明时, 接收到的数字散斑图仅仅是间接基准的轮廓, 而其表面形貌则被“屏蔽”掉了, 如果我们如图3那样选取子区, 实验证

明换靶前后间接基准的相干度能始终保持在 99.9% 以上(见表1)。

1.3 系统误差分析

系统的误差来源主要是: (1) 读数显微镜的调焦误差和对准误差; (2) 光学系统的像差; (3) 数字散斑相关计算的计算误差。

对于读数显微镜, 其调焦误差为^[5]

$$\sigma_x = \pm \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\left[\frac{73n\alpha_v}{2 \cdot NA \cdot \Gamma} \right]^2 + \left[\frac{2n\lambda}{k(NA)^2} \right]^2} \quad (\mu\text{m}) \quad (9)$$

式中 α_v 为人眼分辨率(′), k 为与物理景深有关的常数, Γ 为放大率。而其对准误差为

$$\Delta\alpha = 250e/\Gamma \quad (\text{mm}) \quad (10)$$

式中 e 为人眼对准误差(rad)。根据上面两式可以估算出这两种误差小于 $0.2 \mu\text{m}$ 。

对于光学系统像差, 对位移测量有影响的是离轴像差, 其他像差仅仅是影响光学系统的 MTF。对离轴像差, 如将子区选在成像系统的光轴上, 则可认为它对位移测量的影响非常小。

数字散斑相关计算的计算误差主要来源于噪声干扰和插值运算。文献[2~4]对其进行了详细论述, 得出的结论是 0.02 个像素。对应该系统为 $0.4 \sim 4 \mu\text{m}$ 。

整套系统的理论精度 $< 4 \mu\text{m}$ 。

2 实验结果

在实验中,为了衡量数字散斑相关测量技术的精度,我们用秒表(最小刻度为 $1\mu\text{m}$)作为基准作了模拟实验。实验中,以秒表的读数为基准,靶每移动 $20\mu\text{m}$ 和 $100\mu\text{m}$,就用数字散斑测量系统测量一次。实验结果如表 2。

表 2 用数字散斑测量技术测得的位移量(单位: μm)

Table 2 Results of measurement with the target position system (Unit: μm)

Times	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$20\mu\text{m}$	22.01	24.37	21.47	25.32	26.48	23.45	24.12	22.94	21.69	21.27
$100\mu\text{m}$	102.66	101.83	101.27	104.15	103.57	105.23	102.87	104.02	102.78	101.96

实验中,成像系统的放大倍数为 $60.98\mu\text{m}/\text{pixel}$ 。从表 2 可以看出,两组测量数据的均方根误差分别为 $3.55\mu\text{m}$ 和 $3.25\mu\text{m}$ 。此外,通过实际打靶实验,证明该套系统的定靶误差小于 $8\mu\text{m}$ 。完全能够满足高功率激光装置中 X 光打靶实验的定靶要求。

参 考 文 献

- 1 The OMEGA target-Positioning system. *LLE Review*, **71**: 145~ 159
- 2 Jiang Jinhu, Liu Cheng, Shen Yang *et al.*. Long distance measurement system of digital speckle correlation. *Shanghai Mechanics* (上海力学), 1996, **17**: 8~ 12 (in Chinese)
- 3 Liu Cheng, Jiang Jinhu, Shen Yonghan. A noise immunity criterion of digital speckle measurement system. *Shanghai Mechanics* (上海力学), 1996, **17**: 110~ 113 (in Chinese)
- 4 Xiao Jinbiao, Jiang Jinhu, Liu Cheng. The experimental study for noise in digital speckle correlation measurement. *Shanghai Mechanics* (上海力学), 1996, **17**: 114~ 117 (in Chinese)
- 5 Wang Zhijiang, Chen Xingpu, Lu Hanming *et al.*. Optical Technical Manual. Beijing: Mechanical Industry Press, 1987. Chapter 8, 357~ 363 (in Chinese)

Precision Target Positioning by Digital Speckle Correlation Measurement

Dai Yaping Huang Guanlong Li Xuechun Hua Neng Zhu Jianqiang

(National Laboratory on High Power Lasers and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Jiang Jinhu Chen Daqing

(Physics Department, Suzhou University, Suzhou 215000)

Abstract The precision target positioning system applied in target chamber of high power laser facility is studied. The system utilizes digital speckle correlation method (DSC) and has theoretical precision 0.01 pixel and the position error under $8\mu\text{m}$. In cooperation with computer-control-step-motor, the positioning system has such advantages as automatization, high precision, large view field and non-contact etc.

Key words speckle, self-correlation, linear interpolation, CCD