

文章编号 1004-924X(2023)13-1900-09

高精度激光定位散斑机理分析及抑制

徐 晶^{1,3}, 王钊潮^{1*}, 任正玮², 付飞蚌², 方 明²

(1. 长春理工大学 计算机科学技术学院, 吉林 长春 130022;

2. 长春理工大学 人工智能学院, 吉林 长春 130022;

3. 长春理工大学 中山研究院, 广东 中山 528403)

摘要:为有效解决高精度视觉定位测量系统中激光随机散斑导致的光斑质心定位精度降低问题,对散斑机理及抑制方法进行研究。从激光光斑的成像过程分析了激光随机散斑出现的原因,并推导出空间中任意一点总波扰表达式。建立了成像介质吸光性、粗糙度和表面出射光信噪比与随机散斑强度的关系模型,得出增加成像介质粗糙度和吸光性来提高出射光信噪比,进而降低随机散斑强度的结论。通过改变成像介质的物理特性进行对比实验,获得光斑质心位置稳定性随成像介质物理特性变化的趋势,验证了关系模型的正确性。实验结果表明,当激光功率为 50 mW 时,选取吸光性强、粗糙度与厚度适中的成像介质作为成像靶面,激光光斑质心的提取精度稳定在 0.04 个 pixel 之内,实现了对激光散斑的抑制,提高了光斑质心的定位精度。

关键词:激光光斑;动态散斑;光的散射;分子运动论;微表面模型

中图分类号: TN24; TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233113.1900

Mechanism analysis and suppression of speckle in high-precision laser location

XU Jing^{1,3}, WANG Qianchao^{1*}, REN Zhengwei², FU Feiran², FANG Ming²

(1. School of Computer Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. School of Artificial Intelligence, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

3. Zhongshan Institute of Changchun University of Science and Technology, Zhongshan 528403, China)

* Corresponding author, E-mail: wqcaaa2022@163.com

Abstract: To solve the problem of the reduction in the position accuracy of the laser spot centroid caused by laser random speckle in the high-precision visual positioning measurement system, the speckle mechanism and suppression methods were studied. First, the causes of laser random speckle in the laser spot imaging process were analyzed, and the expression for the total wave disturbance at any point in space was derived. Then, a model for the relationships among the light absorption, roughness of the imaging medium, surface outgoing light signal-to-noise ratio, and random speckle intensity was established. It is concluded that increasing the roughness and light absorption of the imaging medium can increase the signal-to-

收稿日期:2022-11-22;修订日期:2023-01-13.

基金项目:光电信息控制和安全技术重点实验室项目(No. 2021JCJQLB055011)

noise ratio of the outgoing light and thus reduce the random speckle intensity. Finally, comparison experiments were performed to obtain the trend chart of the stability of the spot centroid position with changes in the physical characteristics of the imaging medium, and the results validated the relationship model. The experimental results indicate that when the laser power is 50 mW, the imaging medium had strong light absorption, and the imaging target surface had moderate roughness and thickness, the stability of laser spot centroid extraction is within 0.04 pixels. Laser speckle is suppressed, the stability of imaging spot coordinate extraction is improved, and the accuracy of spot centroid positioning is increased.

Key words: laser spot; dynamic speckle; scattering of light; molecular motion theory; microfacet model

1 引 言

激光具有良好的单一方向性、高能量性和高相干性,常作为高精度视觉定位测量系统中的成像载体^[1-2]。激光照射成像介质时,成像介质内分子接收到激光能量后会发生受激运动,导致激光投影成像时存在随机复合散斑^[3-4],这会严重影响成像光斑的稳定性,进而增加光斑质心的定位误差。因此,抑制随机散斑是从根源上提高视觉定位测量系统中光斑质心提取精度的关键。

近年来,许多学者针对散斑抑制方法开展了研究。王锐^[5]等提出建立多光束分光照明系统对激光散斑效应进行抑制。张圣涛^[6]使用多个互不相干光源,利用半导体激光二极管阵列的合理排布,引进角度多样性降低激光散斑。这类方法需要改进系统光源的功率或数量,会导致光斑过饱和,增加光斑质心的提取难度。梁传样^[7]等使用衍射光学元件实现激光整形和散斑抑制。该方法改变了激光成像的高斯型,很难完成光斑质心的高精度提取。Deng^[8]等采用旋转球透镜来抑制激光投影散斑。付瀚毅^[9]提出转动随机透镜阵列抑制散斑的结构。孙鸣捷^[10]等提出对激光照明系统中混光棒施加连续作用力,使混光棒连续形变从而实现激光散斑抑制。这种方法虽抑制了散斑,但也会让成像光斑位置发生物理偏移,增大成像光斑质心的提取误差。上述方法虽能抑制散斑,但在视觉定位测量系统中,光源的光强与波长、成像靶面的位置都需动态改变。这种动态改变会降低光斑质心的提取精度,所以不适用于以光斑质心定位为基础的视觉定位测量系统。鉴于此,本

文主要针对视觉定位测量中系统保持相对静止时的随机散斑进行抑制,提高成像光斑的稳定性及光斑质心的定位精度。

本文理论分析了视觉定位测量系统中随机散斑产生的原因,推导出空间中任意一点总波扰表达式。定量分析成像介质密度、粗糙度、吸光性、激光功率与成像光斑图像信噪比之间的关系,并在此基础上设计验证实验。提取不同物理特性成像介质上的光斑质心,获得光斑质心位置稳定性随成像介质物理特性变化的趋势,验证理论分析的正确性。

2 原 理

2.1 随机激光散斑的成因

图 1 是以激光为载体的高精度视觉定位测量系统。理论上,当相机和成像靶面相对静止时,成像系统记录的激光光斑应处于较稳定的状态。但实际使用这类视觉定位测量系统时,在相机、成像介质和激光器位置保持不变时,相机获得的光斑成像图稳定性却较差,严重影响

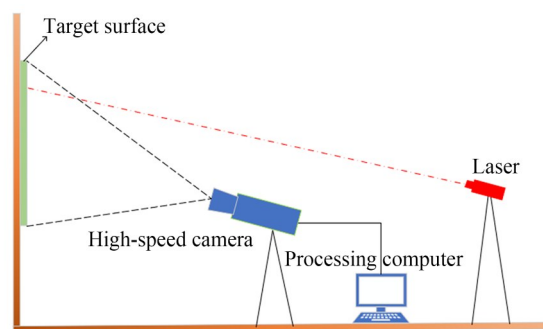


图 1 视觉定位测量系统

Fig. 1 Visual positioning measurement system

光斑质心位置的提取精度。

稳定激光器输出的激光模式为高斯光束,其光场分布可用麦克斯韦方程组来表示^[11]。结合麦克斯韦方程组与介质方程,得到自由空间稳态传输的电磁场所满足的亥姆霍兹方程:

$$\left(\frac{\partial^2 x_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 y_0}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 z_0}{\partial z^2} + k^2\right)E = 0, \quad (1)$$

式中: (x_0, y_0, z_0) 分别为 x, y, z 坐标轴的单位矢量, k 是波数, E 是振幅。在近轴条件下,激光器产生的高斯光束是方程(1)的一个特解,可表示为:

$$E = E_0 \Psi(x, y, z) \exp(-ikz), \quad (2)$$

式中: E_0 为最大幅值, (x, y, z) 为空间中任意一点, $\Psi(x, y, z)$ 可以看成是一个沿 z 轴缓慢变化的复函数, i 为虚部。将式(2)代入式(1),忽略 $\frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2}$ 项得:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} - ikz \frac{\partial \Psi}{\partial z} = 0. \quad (3)$$

式(3)为抛物线型微分方程,用试解法求解,最后得到高斯光束的表达式:

$$E(x, y, z) = \frac{E_0}{w(z)} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{w^2(z)}\right] \exp\left[-ik\left(z + \frac{x^2 + y^2}{2R(z)} + i\varphi(z)\right)\right], \quad (4)$$

式中: $R(z)$ 表示高斯光束的等相面曲率半径, $w(z)$ 表示光斑半径, $\varphi(z)$ 表示附加相移。式(4)含振幅和相位两部分,它反映高斯光束场分布及光束在传播过程中的变化规律。

将式(4)代入惠更斯-菲涅尔公式中,则空间中位置矢量为 r' 的散射微元所产生的散射子波扰为:

$$\mu(r') = E(x, y, z) \frac{\exp(ikr')}{r'}. \quad (5)$$

当空间中子波叠加时,空间中任意一点 $P(x, y)$ 总波扰可表示为:

$$\zeta(x, y) = \frac{i\mu(r')}{\lambda} \iint_S \frac{\exp(ikR)}{R} \frac{1}{2} K(\chi) dS, \quad (6)$$

式中: $K(\chi)$ 为倾斜因子,主要用来调整子波朝着各个方向传播波幅; r' 为空间中某位置矢量; R 为子波源 $\mu(r')$ 到 $P(x, y)$ 点的位置矢量; S 是

散射积分曲面; $\zeta(x, y)$ 为某位置矢量总波扰。

图2为折射光在成像介质内部碰撞的过程。由分子运动论、光的折射定律和光的波粒二象性定理可知,用激光照射成像介质,折射光会进入到成像介质内部,内部部分分子吸收其他分子传递的能量后,不只在平衡位置振动,从而导致成像介质内部分子始终在随机运动^[12-13]。因此,散射面 S 所产生的散射子波在方向和强度上随机。由式(6)可知,如果散射面 S 射出的子波 $\mu(r')$ 在强度和方向上发生随机变化,那么总波扰 $\zeta(x, y)$ 的强度也会发生变化。这些随机子波在空间中相互干涉,经过光学系统后,在像面上形成许多随机分布的明暗动态变化图样,出现随机激光散斑现象。

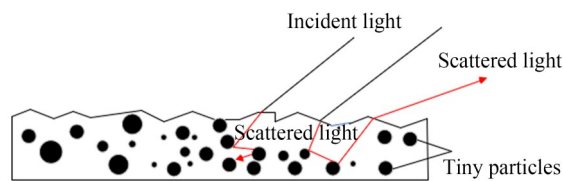


图2 折射光在成像介质内部碰撞过程

Fig. 2 Collision process of refracted light in imaging medium

2.2 成像介质表面出射光信噪比分析

由2.1节分析可知,成像介质表面随机散射光导致随机激光散斑的出现。因反射光不会进入成像介质内部,所以在不考虑空气扰动的情況下,反射光本身是稳定的。以激光为光源,从成像介质表面进入到空间中的反射光 L_r 和散射光 L_s 可表示为:

$$L_r = l_1 + l_2, \quad (7)$$

$$L_s = l_2 + l_3, \quad (8)$$

式中: l_1 表示纯反射光, l_2 表示反射光中与散射光发生干涉的部分, l_3 表示纯散射光, l_2 和 L_s 成正比。可见光斑的不稳定性主要来自散射光自干涉,以及散射光与反射光的交叉干涉。图3表示了3种光的分布情况,3部分扇形内线条越凌乱说明其稳定性越差。

因相机视场范围有限,并非所有从成像介质表面出来的光都能进入到相机中。根据式(7)和式(8),像面上记录的能量可表示为:

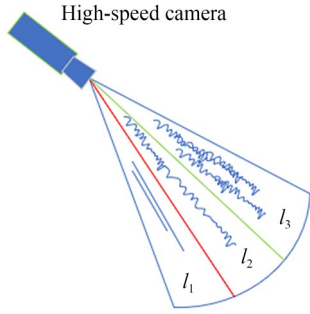


图3 纯反射光、混合光和纯散射光示意图

Fig. 3 Schematic diagram of pure reflected light, mixed light and pure scattered light

$$M_{\text{SU}} = \sum_{\Omega} (L_r + L_s), \quad (9)$$

式中: Ω 为视场范围, M_{SU} 是相机像面中记录的激光总信号。 M_{SU} 决定最终像面中光斑的整体亮度。若将 l_1 定义为稳定的信号,将 L_s 定义为噪声,则信噪比 R_{SN} 可表示为:

$$R_{\text{SN}} = \sum_{\Omega} \frac{l_1}{L_s}. \quad (10)$$

由式(10)可知,为提高信噪比,可以增大 l_1 ,但这会使 M_{SU} 值过大,成像光斑过亮,不利于提取质心。因此,只能在减小 L_s 的基础上提高信噪比。

2.3 成像介质粗糙度对光照的影响

根据微平面理论,在微观尺度下,任何表面都是由若干个细小平面组成^[14]。微表面粗糙程度 α 可表示为:

$$\alpha = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |y_i|, \quad (11)$$

式中: m 为采样点个数, y_i 为采样点与微平面平均高度的差值。

由双向反射分布函数(Bidirectional Reflected Distribution Function, BRDF)的定义可知,只有当微平面法线 n 与 $l \cdot v$ 的半程向量 h 方向一致时^[15],相机才能接收到微平面反射光。如图4所示(彩图见期刊电子版),虽然 A, B 两点都能被相机和光照到,但只有 B 点的光能反射到相机中。此外,微表面法线分布的不规则性也会导致散射光从成像介质内部出来的方向更加随机。

Trowbridge 等在式(11)基础上,使用高斯

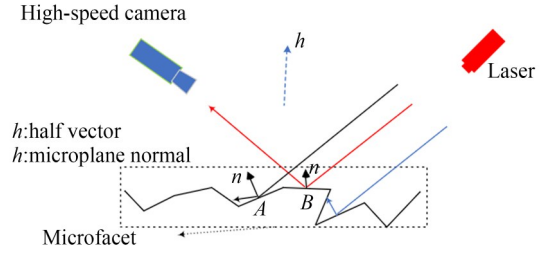


图4 微表面光线反射图

Fig. 4 Light reflection diagram of microfacet

分布来近似统计微表面的法线分布与半程向量 h 重合的比率^[16],即:

$$D(n, h, \alpha) = \frac{\alpha^2}{\pi \left((\mathbf{n} \cdot \mathbf{h})^2 (\alpha^2 - 1) + 1 \right)^2}, \quad (12)$$

$$\mathbf{h} = \frac{(\mathbf{l} + \mathbf{v})}{|\mathbf{l} + \mathbf{v}|}, \quad (13)$$

式中: α 为粗糙度, n 为微平面法线, l 为光位置矢量, v 为视线位置矢量, h 为半程向量。

式(12)是通过统计微平面法线分布与半程向量重合度来估计进入到相机像面上的能量,但这种关系并非绝对成立。因为粗糙微表面会导致微平面间相互遮蔽,这种遮蔽会损耗光线能量^[17]。图4蓝色入射光展示了微平面对入射光和出射光的遮蔽现象,从图4可以看出,微平面遮挡关系依赖于相机视线方向和入射光方向。

为量化微平面这种不规则性排列对光能量的影响,Smith利用统计学理论,近似求得微平面之间未被遮挡部分的比例,公式^[18]如下:

$$G_{\text{Smith}}(n, d, k) = \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{d}}{(\mathbf{n} \cdot \mathbf{d})(1 - k) + k}, \quad (14)$$

$$k = \frac{(\alpha + 1)^2}{8},$$

式中: d 为射线位置矢量, α 为粗糙度, n 为微平面法向量。

考虑到粗糙度会影响反射和入射光线能量,由式(13)可知,任意微平面未被遮挡的概率可表示为:

$$G(l, v, n) = G_{\text{Smith}}(n, v, k) G_{\text{Smith}}(n, l, k), \quad (15)$$

式中: l 为入射光位置矢量, v 为视线位置矢量。

结合式(12)和式(15)可知,成像介质粗糙度对入射光、散射光和反射光的影响可表示为:

$$R = D(n, h, \alpha)G(l, v, n)L_i, \quad (16)$$

式中: L_i 为单束入射光或散射光能量, R 为 L_i 最后进入到相机像面的能量。

综上所述,增加粗糙度会导致散射光和镜面反射光的自损耗,并提高超出相机视场的概率,引起 L_s 减少, M_{SU} 降低,进而提高光斑稳定性,减弱像面上记录的光斑亮度。虽然增加粗糙度能抑制散射光在空间中的传播,但反射光也会在一定程度上被抑制。此外,过大的粗糙度导致像面上的能量过小,增加光斑质心提取的难度,因此粗糙度要适中。

2.4 成像介质吸光性对光照的影响

根据朗伯比尔定律,物质本身可以吸收光子,物质的颜色是对不同波长可见光选择性吸收的结果。某物质吸收了大部分自然光,那么该物质呈现黑色,反之则表现为白色^[19]。物质对光的吸收度 A 可表示为:

$$A = Kbc, \quad (17)$$

式中: K 为摩尔吸光系数, b 为吸收层厚度, c 为吸光物质浓度。

由式(17)可知,相比于同浓度、同厚度的白色物质,暗色物质有更强的吸光性,所以用加厚的暗色物质作为成像介质,能让更多光子在成像介质内部消耗,使成像介质表面射出的散射子波数量更少、能量更小,即抑制 L_s 的产生,提高光斑稳定性,减小成像平面的光斑亮度。结合2.2节的分析,粗糙度和吸光性均会一定程度地抑制散射光,选择合适粗糙度和吸光性的成像介质,能提高成像介质表面出射光的信噪比,抑制视觉定位测量系统中随机激光散斑的产生。

3 实验

本文从成像介质密度、表面粗糙度、吸光性和激光输出功率4个方面开展实验。在成像介质实验中,为排除背景光对漏孔靶面光斑提取的影响,实验在暗室进行。其他实验在自然光下完成。实验装置包括相机、全站仪和成像靶面。选取具有不同物理特性的成像介质作为激光照射的靶面,来验证靶面与散射光强度之间的关系。以全站仪的激光器作为激光光源射向靶面,相机仰视看向靶面并将采集的数据实时

显示在电脑屏幕上。实验过程中保持相机、激光器和成像靶面的位置不变,激光照射方向可变。其中,相机分辨率为 $1\ 280 \times 1\ 024$,帧率为250 frame/s,激光器功率在5~200 mW之间,激光器距离靶面10 m。本文使用一种改进的高斯拟合法^[20]对靶面中的激光光斑进行质心提取,以坐标稳定性来评判不同材质的成像靶面对激光散斑的抑制能力。为了防止激光光斑能量过低时光斑提取受到外界环境干扰,或光斑能量过高出现饱和现象,本文将激光器的输出功率设定为50 mW,并采集连续4 s内的1 000张照片进行质心提取。为评价光斑稳定性,使用贝塞尔公式计算光斑质心标准差,然后统计光斑质心的均值(Mean)、极差值(Range)和标准差(STD)。

3.1 材料密度数据对比实验

由2.1节分析可知,激光照射处靶面内部分子的随机运动导致激光随机散斑现象。为验证该结论,本实验选取材质相同、漏孔尺寸分别为0.1, 1, 2 mm的白色尼龙布(WNC)作为靶面。图5中方框内是成像靶面上的激光光斑。图5左下角为靶面材料。为展示成像光斑的细节,将实验中靶面上的光斑放大12倍,图5右上角为靶面成像光斑放大图。后续的靶面材料粗糙度实验和吸光性实验中,对靶面成像光斑进行相同的放大处理。随着靶面密度的减小,会有更多的光透过靶面,即单位面积内产生的散射子波更少,在成像靶面上记录的光斑稳定性增强,亮度降低。具体实验数据如表1所示。

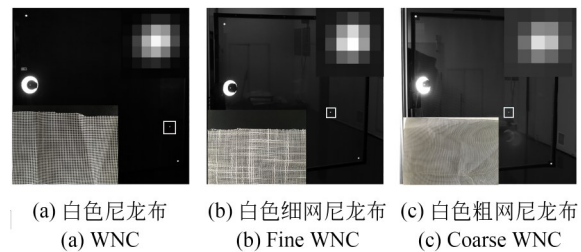


图5 三种密度的靶面光斑图像

Fig. 5 Light spot images of target with three densities

从表1可知,漏孔越大,靶面密度越小,光斑质心坐标的极差值和标准差越小,光斑越稳定。2 mm WNC靶面上光斑质心坐标的极差值和标准差最小,光斑质心坐标提取的标准差在

0.009 pixel内。靶面密度与光斑稳定性成反比,与理论分析结果一致。但漏孔靶面不适用于实

际测量,因为大多数实验在多光源环境下进行,背景光会影响靶面光斑提取。

表 1 三种密度靶面激光质心坐标的均值,极差值和标准差

Tab. 1 Mean, range, and STD of laser centroid pixel coordinates on three kinds of density target surfaces

Target surface type	Mean		Range		STD	
	X	Y	X	Y	X	Y
0.1 mm WNC	895.627	644.556	0.121	0.098	0.094	0.090
1 mm WNC	887.694	634.385	0.055	0.093	0.047	0.061
2 mm WNC	891.228	658.119	0.012	0.009	0.009	0.007

3.2 粗糙度数据对比实验

当光照环境、相机和激光器位置以及激光功率不变时,粗糙度增加导致散射光和镜面反射光自损耗的增大,超出相机视场的概率也会相应增加。为验证粗糙度对激光散斑的影响,本实验选取黑色羊绒布(BCC)、黑色玻纤幕布(BFC)、黑色光面亚克力板(BAC)作为靶面,如图 6 所示,3种材料的表面粗糙度依次下降。图 6 中方形框内是成像靶面上的激光光斑,右上角为靶面成像光斑放大图,右下角为靶面材料。

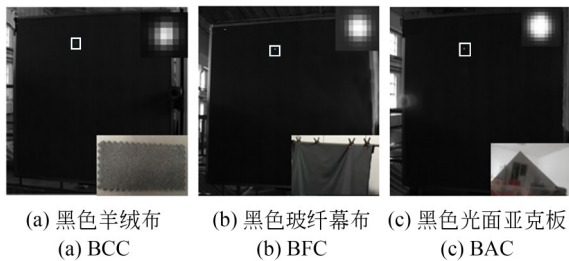


图 6 三种粗糙度的靶面光斑图像

Fig. 6 Spot images of target with three roughness levels

由 2.3 节的理论分析可知,在一定范围内,粗糙度越大,光斑稳定性越高,亮度越弱。具体数据如表 2 所示。

由表 2 可知,粗糙度最大的 BCC 靶面的光斑坐标极差值和标准差最小,光斑稳定性最高,光斑质心坐标的标准差在 0.084 pixel 内,所得到的实验结果和理论分析一致。

3.3 吸光性数据对比实验

因物质对光的吸收能力与物质本身的摩尔吸光系数以及厚度成正比。为验证吸光性对散射光的影响,本实验选取白色羊绒布(WCC)、黑色羊绒布(BCC)和加厚版黑色羊绒布(TBCC)

表 2 三种粗糙度靶面激光质心坐标的均值,极差值和标准差

Tab. 2 Mean, Range, and STD of laser centroid pixel coordinates on three kinds of roughness target surfaces

Target surface type	Mean		Range		STD	
	X	Y	X	Y	X	Y
BCC	625.256	345.185	0.087	0.071	0.084	0.073
BFC	624.328	346.726	0.301	0.276	0.281	0.260
BAS	627.871	347.443	0.671	0.588	0.392	0.496

作为靶面。3种靶面均为同种材质,且密度相同。如图 7 所示,方形框内是成像靶面上的激光光斑,右上角为靶面成像光斑放大图,右下角为靶面材料。

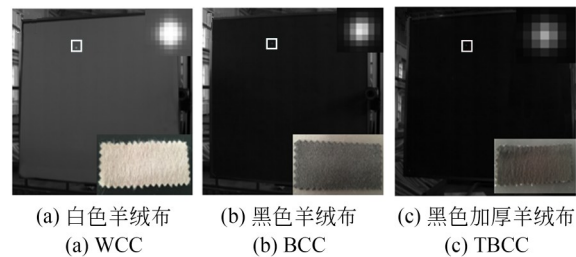


图 7 三种吸光性材质靶面光斑图像

Fig. 7 Images of light spot on target surface of three light absorbing materials

根据式(16)可知,3种靶面吸光性从左至右逐渐增强,所以加厚版黑色羊绒布上的光斑应最稳定且光斑亮度最低,实验数据如表 3 所示。

由表 3 可知,TBCC 靶面的光斑稳定性最高,光斑质心坐标的标准差在 0.031 pixel 内,这个结果与理论分析的结果一致。

表 3 三种吸光性材质靶面激光质心坐标的均值,极差值和标准差

Tab. 3 Mean, Range, and STD of laser centroid pixel coordinates on three light absorbing target surfaces

Target surface type	Mean		Range		STD	
	X	Y	X	Y	X	Y
	WCC	624.413	344.166	0.512	0.404	0.297
BCC	625.256	345.185	0.087	0.071	0.084	0.073
TBCC	625.513	345.416	0.032	0.044	0.023	0.031

3.4 激光功率数据对比实验

由表 2 和表 3 中的实验数据可知,加厚黑色羊绒布的标准差最小。为测试该材质对动态散斑的抑制范围,本实验将激光器的输出功率分别调为 10, 50, 70, 90, 110, 130, 170 和 200 mW, 并计算了质心坐标的均值、极差值和标准差,实验数据如表 4 所示。图 8 为 8 种功率下靶面成像光斑放大 13 倍后的细节图。图 9 为 8 种功率下光斑质心 STD 的变化曲线。

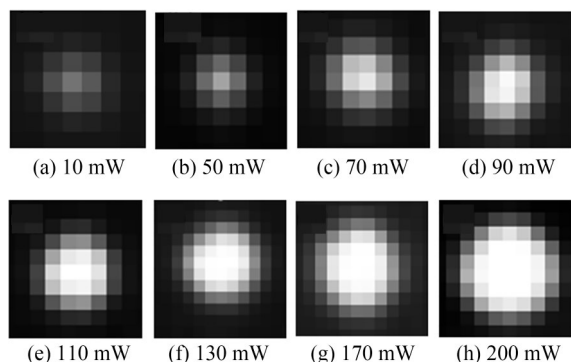


图 8 八种功率下靶面光斑的成像放大图

Fig. 8 Enlarged images of target spot under eight kinds of powers

由表 4 和图 9 可知,随着功率的增加,光斑稳定性逐渐降低。激光功率在 10~70 mW 时,光斑质心的 STD 较为稳定,而且功率的增加并未明显影响其稳定性。然而,当激光功率大于 70 mW 时,光斑逐渐呈现饱和状态,光斑质心计算呈现较大的随机性。因此,实际应用时应在激光光斑不出现饱和的状态下选择最佳材质。随着入射光能量的增加,随机散射光的数量和能量也会增加。由 2.2 节对信噪比的分析可知, L_s 增大,光斑不稳定性会增强,并且 M_{su} 也会提

表 4 八种功率激光的质心坐标均值,极差值和标准差

Tab. 4 Mean, range, and STD of laser centroid pixel coordinates on eight kinds of power lasers

Laser power/mW	Mean		Range		STD	
	X	Y	X	Y	X	Y
10	684.339	516.197	0.031	0.027	0.021	0.011
50	683.946	516.556	0.037	0.072	0.029	0.026
70	684.778	515.727	0.061	0.067	0.049	0.037
90	683.315	516.831	0.394	0.411	0.197	0.201
110	686.324	517.960	0.667	0.842	0.373	0.433
130	686.871	514.713	1.330	1.522	0.811	0.861
170	683.556	513.177	1.897	2.131	1.426	1.821
200	687.334	518.463	2.529	2.614	1.756	1.937

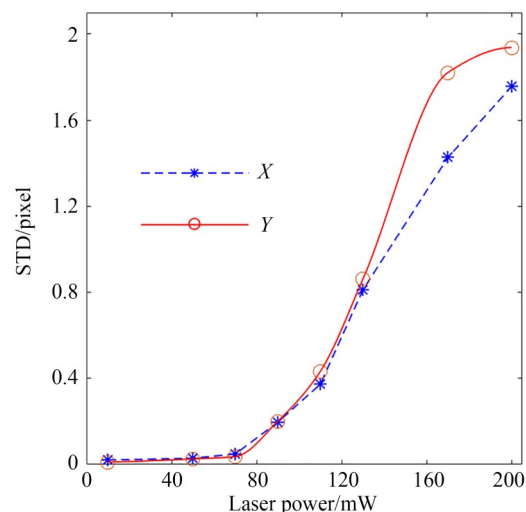


图 9 八种功率下光斑 STD 的变化曲线

Fig. 9 Variation curves of spot STD at eight power levels

升,使光斑出现饱和状态,理论分析结论和实验结果一致。

4 结 论

本文针对高精度视觉定位测量系统中激光随机散斑所引起的光斑不稳定性,进而导致定位误差的问题开展研究,结合激光发光原理和分子运动论,分析出随机散斑是成像介质内分子受激后进行无规则运动,进而导致散射子波在空间中随机干涉所产生的现象,这种现象与散射子波的强度以及方向有关。从图像信噪比角度分析散射光和反射光,得出只有抑制散射

光才能提高光斑稳定性和质心提取准确性的结论。在此基础上,使用粗糙度适当和吸光性的成像介质能有效抑制散射光的出现。为验证理论分析的正确性,从成像介质表面密度、粗糙度、吸光性和激光器输出功率 4 个方面展开实

验,得到的实验结果与理论分析的结论完全一致。实验数据表明,激光功率在 50 mW 左右时,选择 STD 最小的加厚黑色羊绒布材质作为成像靶面,光斑稳定性在 0.04 pixel 内,能较好地抑制随机散斑,提升光斑质心的定位精度。

参考文献:

- [1] 朱凡,李颖先,谭久彬. 高精度激光光束准直系统设计[J]. 光学精密工程, 2020, 28(4): 817-826.
ZHU F, LI Y X, TAN J B. Design of high-accuracy laser beam collimation system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(4): 817-826. (in Chinese)
- [2] 刘伟,周建行,杨延西. 基于平行激光的便携式视觉裂缝测量系统[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(11): 235-243.
LIU W, ZHOU J H, YANG Y X. Portable vision crack measurement system based on parallel laser [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(11): 235-243. (in Chinese)
- [3] 贺培鑫,赵彤,沈振民. 混沌激光对激光显示中的散斑抑制研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(7): 0714001.
HE P X, ZHAO T, SHEN ZH M. Study on speckle suppression of chaotic laser in laser display [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(7): 0714001. (in Chinese)
- [4] 邹丹丹,姚康,管凯捷,等. 基于激光散斑衬比成像技术的脑血流分析[J]. 光学精密工程, 2020, 28(11): 2411-2420.
WU D D, YAO K, GUAN K J, *et al.* Cerebral blood flow analysis based on laser speckle contrast imaging technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(11): 2411-2420. (in Chinese)
- [5] 王锐,史瑞新. 基于多光束照明的回波光场散斑抑制机理[J]. 光学精密工程, 2017, 25(9): 2333-2338.
WANG R, SHI R X. Suppression mechanics of returning wave speckle with multibeams illumination [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(9): 2333-2338. (in Chinese)
- [6] 张圣涛,高文宏,赵鹏飞,等. 激光阵列光源角度多样性抑制散斑方法[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 48-53.
ZHANG SH T, GAO W H, ZHAO P F, *et al.* Laser speckle reduction due to angular diversity intro-
- duced by 2D laser diode array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(1): 48-53. (in Chinese)
- [7] 梁传祥,张巍,芮大为,等. 基于硅基液晶实现激光投影显示系统匀光整形和散斑抑制[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1201001.
LIANG CH Y, ZHANG W, RUI D W, *et al.* Uniform light shaping and speckle suppression of laser projection display system based on liquid crystal on silicon [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1201001. (in Chinese)
- [8] DENG L X, DONG T H, FANG Y W, *et al.* Speckle reduction in laser projection based on a rotating ball lens [J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 135: 106686.
- [9] 付瀚毅,刘伟奇,魏忠伦,等. 转动随机微透镜阵列对激光显示中散斑的抑制[J]. 液晶与显示, 2015, 30(2): 359-364.
FU H Y, LIU W Q, WEI ZH L, *et al.* Speckle reduction using rotating random micro-lens array in laser display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(2): 359-364. (in Chinese)
- [10] 孙鸣捷,于康龙,孟照魁. 一种采用振动混光棒的散斑抑制技术[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 64-69.
SUN M J, YU K L, MENG ZH K. Speckle suppression method with vibrating light pipe [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(10): 64-69. (in Chinese)
- [11] 张亦斌,方爱平,齐泽坤,等. 激光散斑形成及漂移现象探究[J]. 物理与工程, 2021, 31(6): 129-132
ZHANG Y B, FANG A P, QI Z K, *et al.* Research on the formation and drift of laser speckle [J]. *Physics and Engineering*, 2021, 31(6): 129-132 (in Chinese)
- [12] PAUL B, KAMAL S, QURESHI T. Multipath wave-particle duality in classical optics [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(12): 3204.
- [13] 陈明,丁丹. 聚集态分子内运动触发的生物光热诊疗[J]. 科学通报, 2021, 66(18): 2276-2287.

- CHEN M, DING D. Biological photothermal diagnosis and treatment triggered by intramolecular motion in aggregated state[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(18): 2276-2287. (in Chinese)
- [14] CHENG J, CHENG X L, MENG X C, *et al.* A Monte Carlo emissivity model for wind-roughened sea surface[J]. *Sensors*, 2019, 19(9): 2166.
- [15] SUN L L, ZHAO F. Bidirectional reflectance distribution function algorithm based on the Poynting vector analysis[J]. *Optical Engineering*, 2021, 60(6): 063104.
- [16] TROWBRIDGE T S, REITZ K P. Average irregularity representation of a rough surface for ray reflection [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1975, 65(5): 531-536.
- [17] BUTLER S D, NAUYOKS S E, MARCINIAK M A. Comparison of microfacet BRDF model to modified Beckmann-Kirchhoff BRDF model for rough and smooth surfaces [J]. *Optics Express*, 2015, 23(22): 29100.
- [18] IGOUCHKINE O, ZHANG Y B, MA K L. Multi-material volume rendering with a physically-based surface reflection model[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2018, 24(12): 3147-3159.
- [19] MAYERHÖFER T G, PAHLOW S, POPP J. The bouguer-beer-lambert law: shining light on the obscure [J]. *Chemphyschem: a European Journal of Chemical Physics and Physical Chemistry*, 2020, 21(18): 2029-2046.
- [20] 任守峰, 唐新明, 祝小勇, 等. 一种高分七号卫星激光足印光斑质心的高精度提取算法[J]. *光学学报*, 2021, 41(10): 1012001.
- REN SH F, TANG X M, ZHU X Y, *et al.* A high-precision algorithm for extracting the centroid of laser footprint of high-scoring satellite No. 7[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(10): 1012001. (in Chinese)

作者简介:



徐 晶(1977—),女,黑龙江宾县人,博士,副教授,2003年、2009年于长春理工大学分别获得硕士和博士学位,主要从事数字图像处理、机器视觉等方面的研究。E-mail: xujing@cust.edu.cn

通讯作者:



王钊潮(1998—),男,湖北黄冈人,硕士研究生,主要从事机器视觉方面的研究。E-mail:wqcaaa2022@163.com