

## 无衍射光束在激光三角测量系统中的应用研究\*

周莉萍 赵斌 李柱

(华中理工大学机械学院仪器所, 武汉, 430074)

**摘要:** 无衍射贝塞耳光束是近年来国内外极为重视的一个新兴研究领域。这种光束同时具有焦深长, 中心光斑小的特点。利用这一特点, 作者首次提出将其作为入射光束应用于激光三角测量系统, 以解决传统激光三角测量系统无法满足大量程与高分辨率测量要求的问题。文中给出了无衍射光束的理论及实现方法。在三角测量物-象位置关系的基础上, 设计了无衍射激光三角测量系统及其参数并给出了实验结果。理论分析与实验结果表明, 这种新型系统明显优于传统的三角测量系统。

**关键词:** 无衍射光束 贝塞耳函数 锥形透镜 激光三角测量

### Research on laser triangulation measurement system with non-diffraction beam

Zhou Liping, Zhao Bin, Li Zhu

(School of Mechanical Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

**Abstract:** Non-diffraction beam is a new research field which has been given more and more attention recently both at home and abroad. It has properties of long focus depth and small central spot. For these properties, the authors apply it as incident beam to resolve the main problem in traditional laser triangulation measurement, which is high resolution and large measurement range can not be satisfied meantime. Theory and generation method of non-diffraction beam have been given. Basing on the relationship of object-image position, structure parameters of the laser triangulation measurement system with non-diffraction beam has been designed and the experimental results have been given. The theoretical analysis and experimental results show that the novel system is better than the traditional triangulation systems clearly.

**Key words:** non-diffraction beam Bessel function axicon laser triangulation measurement

### 引 言

激光三角测量是位移、三维轮廓等几何量非接触测量的一种重要方法。为准确反映物体位移及表面轮廓信息, 通常采用激光束垂直入射被测物面的测量方式, 即将激光束垂直投射到被测物面上, 形成的漫反射光通过成像透镜汇聚到焦平面上的光接收器上形成象点, 当入射光斑随被测物面移动或表面轮廓变化时, 成像点在光接收器上的位置也随之而变。

目前, 激光三角测量系统的主要问题是入射光束的焦深限制。一般的高斯光束聚焦作为入射光时, 会出现光斑尺寸随测量范围变大而离焦变大的情况。这使测量既无法满足系统的横向分辨率, 也无法满足其纵向分辨率。即系统无法同时满足高分辨率与大测量范围的要求。这可由结合横向分辨率  $\delta_x$  的阿贝(Abbe)公式及焦深  $\Delta z$  的瑞利(Rayleigh)公式

\* 国家自然科学基金和国家教委博士点基金资助。

$$\Delta z = 4\delta x^2 / \lambda \quad (1)$$

说明。如对光波波长  $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$  的入射光束, 要求横向分辨率  $\delta x = 10\mu\text{m}$  时, 其焦深仅可达到 0.6mm。为扩展纵向测量范围, 一般采用两种方法。一是用非离散位置传感器(PSD)作为光接收器以估计光斑重心的中心位置, 这种系统的测量与光斑尺寸相对独立, 可得到较好的纵向测量范围, 但它只能得到较低的横向分辨率及测量精度, 且被测物表面细节的突变会使系统得到错误的信息, 因为光斑成象的中心已不是物体表面光斑的中心了。二是对入射光束精确调焦, 即必须有一套精密定位机构, 以保证在测量过程中被测物始终处于焦深范围内。这不仅使系统结构复杂化, 而且影响测量精度与速度。

针对以上问题, 本文提出了一种新的激光三角测量系统。它以无衍射贝塞耳光束作为入射光束, 解决了目前激光三角测量系统存在的主要问题。

### 一、无衍射光束理论及实现

#### 1. 无衍射光束理论

无衍射光束理论是麦克斯韦电磁场波动方程的一组特殊解<sup>[1]</sup>, 其表达式为:

$$E(x, y, z, t) = (1/2\pi) \exp[i(k_{\parallel} z - \omega t)] \int_0^{2\pi} A(\varphi) \exp[ik_{\perp} (x \cos \varphi + y \sin \varphi)] d\varphi \quad (2)$$

式中,  $k_{\parallel} + k_{\perp} = (c/\omega)^2$ ,  $k_{\parallel}$ ,  $k_{\perp}$  分别是波传播方向平行及垂直的波矢量。当  $k_{\parallel}$  是实数时, 解表示一个无衍射光场。当  $A(\varphi)$  与  $\varphi$  无关, 如  $A(\varphi) = 1$  时, 解表示一个完全轴对称的无衍射光场, 此时有:  $E(x, y, z, t) = (1/2\pi) \exp[i(k_{\parallel} z - \omega t)] J_0(k_{\perp} \rho)$  (3)

式中,  $J_0$  是第一类零阶贝塞耳函数,  $0 < k_{\perp} \leq \omega/c$ , 具有无衍射光场分布的光束即为无衍射光束。因它具有贝塞耳函数分布, 故又称无衍射贝塞耳光束, 如图 1 所示。图中, 横坐标为径向尺寸( $\mu\text{m}$ ), 纵坐标为归一化光强。理想的无衍射光束时间平均强度  $I(x, y, z \geq 0) = (1/2) |E(r, t)|^2 = I(x, y, z = 0)$ , 与光束传播距离  $Z$  无关。无衍射光束中心斑尺寸由  $k_{\perp} = (2\pi/\lambda) \sin \theta$  决定, 与传播距离亦无关。实际应用中, 由于光学系统有限孔径的限制, 不可能得到理想的无衍射光束, 但其中心光斑尺寸不变的传输距离仍远大于相同半径高斯光束的瑞利距离。

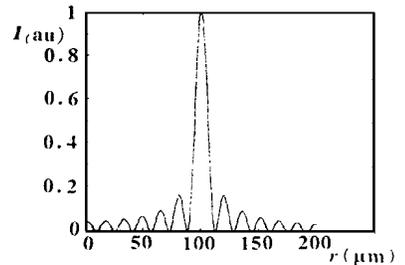


Fig. 1 Intensity distribution of zero-order Bessel non-diffraction beam

#### 2. 无衍射光束的实现

由(2)式及(3)式可知, 无衍射光束由平面波角谱成分迭加而成, 即所有平面波对传播光轴具有相同的会聚角  $\theta$  及从 0 到  $2\pi$  不同的方位角, 其波矢分布位于一个锥体。根据这一特性, 可以采用锥形透镜(Axicon)作为光学器件实现无衍射贝塞耳光束<sup>[2]</sup>。其原理图如图 2 所示。图中,  $\varphi$

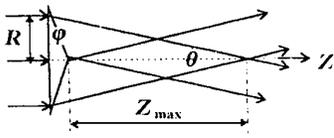


Fig. 2 Non-diffraction beam generated by an axicon

为锥形透镜底面锥角,  $\theta$  为所有锥形波前到传播光轴的会聚角,  $R$  为锥形透镜的孔径半径,  $Z_{\text{max}}$  为最大无衍射范围。由几何光学可得:  $Z_{\text{max}} = R/\text{tg} \theta - R \text{tg} \varphi \approx R/\text{tg} \theta$  ( $\varphi \ll 1$ ) (4)

由(3)式, 无衍射光束中心光斑直径  $\rho_0$  为:  $\rho_0 = 2.405 \lambda / (\pi \sin \theta)$  (5)

式中,  $\theta$  由  $\varphi$  确定:  $\theta = \arcsin(n \sin \varphi) - \varphi$ ,  $n$  为锥形透镜材料的折射率。

本文根据测量系统的需要,设计了5个参数不同的有机玻璃材料( $n = 1.5$ )的锥形透镜, $R = 15\text{mm}$ , $\varphi$ 分别为 $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ ,所产生无衍射光束的 $Z_{\max}, \rho_0$ 理论值分别列于附表。

由附表可知,无衍射光束具有焦深范围大,中心光斑小同时存在的特性,以这样的光束作为三角测量系统的入射光束,可实现大测量范围、高分辨率的三维轮廓及位移等几何测量。

## 二、无衍射激光三角测量系统

根据上述理论,作者提出一种无衍射激光三角测量系统如

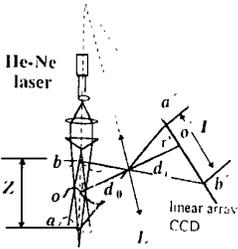


Fig. 3 Laser triangulation measurement system with non-diffraction beam

图3所示。系统采用 He-Ne 激光器做光源,以显微物镜、针孔及透镜组成扩束准直系统,使光束充满整个锥形透镜孔径,其后形成的无衍射光束即为三角测量系统的入射光束。它使被测物面的纵向测量范围始终处于光束焦深范围内,无需精密调焦系统。由于无衍射光束中心光斑很小,系统横向分辨率可以很高。同时,小的中心光斑还可保证成像位置的精度及系统的纵向分辨率。为保证无衍射焦深范围内被测物点清晰成像,光接收器上的象点必须始终位于焦平面上,即其受光面须与成像光轴成一夹角。本系统中,光接收器采用 5000 元象素的线阵 CCD。图中, $d_0$  和  $d_i$  分别为物距与象距; $o'$  为测量视场中心位置  $o$  的象点; $\gamma$  为漫反射光入射角; $\gamma'$  为成像角; $L$  为成像透镜,其焦距为  $f$ ;  $Z$  为物方纵向位置的变化; $I$  为象方成象点位置的变化。

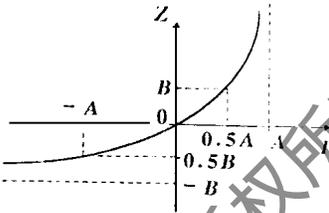


Fig. 4 The relation curve of object-image position

根据几何关系可得物方位置变化与象方位置变化的关系<sup>[4]</sup>:  $Z = (I d_0 \sin \gamma') / [d_i \sin \gamma \mp I \sin(\gamma + \gamma')]$  (6)

$$I = (Z d_i \sin \gamma) / [d_0 \sin \gamma' \pm Z \sin(\gamma + \gamma')] \quad (7)$$

等式(6)中, $o$  点到  $a(b)$  点位置变化对应负号(正号),等式(7)中, $o$  点到  $a(b)$  点位置变化对应正号(负号),物-象位置变化的关系曲线如图4所示,该曲线为非线性曲线。第一象限曲线为入射光斑由参考面  $o$  向  $a$  方向移动时的情况,其纵向分辨率有所下降,但测量范围增大;第三象限曲线则为  $o$  向  $b$  移动的情况,纵向分辨率提高,但测量范围减小。在实际测量中,需根据测量要求选择好视场。

根据几何关系及透镜成像条件得物面-象面倾斜角之间关系为:  $\text{tg } \gamma' = (d_0/d_i) \text{tg } \gamma$  (8) 这是三角测量系统清晰成像必须满足的 Scheimpflug 条件。

成像系统的放大倍率  $\beta$  为:

$$1/\beta = dZ/dI = (d_0 d_i \sin \gamma \sin \gamma') / [d_i \sin \gamma \mp I \sin(\gamma + \gamma')]^2 \quad (9)$$

测量视场中心为:

$$1/\beta_0 = dZ/dI = (d_0 \sin \gamma') / (d_i \sin \gamma) \quad (10)$$

由(9)式及(10)式可知,  $\beta = f(I)$  亦为非线性关系。

Table  $Z_{\max}$  and  $\rho_0$  generated by different axicons

$\varphi$	$\theta$	$Z_{\max}(\text{mm})$	$\rho_0(\mu\text{m})$
5	2.5	343.6	11.1
10	5.1	168.1	5.5
15	7.8	108.9	3.6
20	10.9	78.1	2.6
25	14.3	58.7	2.0

### 三、实验及结论

以图 3 为基础,作者设计了一套无衍射激光三角位移测量的实验系统。系统采用表 1 中  $\varphi = 20^\circ$  的锥形透镜。实际制作的锥形透镜以扩束准直的 He-Ne 激光 ( $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$ ) 入射时,所产生的经三角测量系统成象后的无衍射贝塞耳光束如图 5 所示,由于 CCD 噪声影响,所得图形与理想贝塞耳函数图形有一定差别,但可以看到,其中心光斑很小。由于透镜的制造误差,光束中心光斑直径略大于其理论值,约为  $10\mu\text{m}$ ,无衍射传输距离略大于理论值,约为  $80\text{mm}$ 。光束中心斑直径在  $80\text{mm}$  范围内基本保持不变(相应束腰处

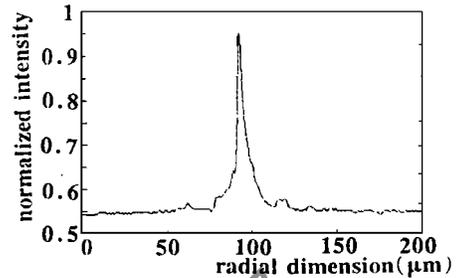


Fig. 5 Experimental result of imaged non-diffraction beam

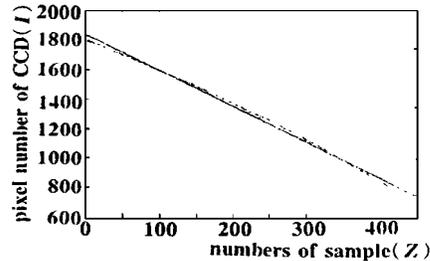


Fig. 6 Experimental result of  $Z-I$  curve

直径为  $10\mu\text{m}$  的高斯光束传输  $80\text{mm}$  时,按理论值计算其直径变为约  $254\mu\text{m}$ )。本实验中,无衍射三角位移测量系统要求纵向分辨率约为  $10\mu\text{m}$ ,即物体位置变化  $10\mu\text{m}$  时,5000 元像素的线阵 CCD 移动一个像素单元  $7\mu\text{m}$ 。系统的结构参数为  $d_i$  约为  $100\text{mm}$ , $\gamma$  约为  $60^\circ$ , $\gamma'$  约为  $66^\circ$ , $d_o$  约为  $154\text{mm}$ ,成象透镜采用焦距为  $58\text{mm}$  的照相物镜。在保证纵向分辨率高于  $10\mu\text{m}$  的条件下,由(6)式,当象方位移  $I = 5000 \times 7\mu\text{m} = 35\text{mm}$  时,物方最大位移范围的理论值为  $43.2\text{mm}$ 。 $\varphi = 20^\circ$  锥形透镜的  $80\text{mm}$  无衍射距离与  $10\mu\text{m}$  中心斑尺寸足以满足系统要求。而且,若增加 CCD 象素单元数,系统测量范围仍可增大。实验系统实测  $Z-I$  曲线如图 6 所示。图中,横坐标为物方位移,对应采样点个数;纵坐标为象方位移,对应相应的象素单元。曲线为实测值,直线为线性最小二乘拟合值。

由理论分析及实际测量结果可得以下结论: 1. 无衍射光束焦深长,可略去传统三角测量系统的调焦装置,结构简单; 2. 无衍射光束中心光斑直径小,可大大减小由大光斑漫反射成象造成的测量误差,同时保证系统纵向分辨率要求; 3. 对三维轮廓测量,可同时满足高横向分辨率及大测量范围的要求; 4. 系统测量范围仅受限于 CCD 光接收器的单元数,不受入射光束的焦深限制。由此,无衍射三角测量系统明显优于一般三角测量系统。

#### 参 考 文 献

- 1 Dumin J. Phys Rev Lett, 1987; 58: 1499~ 1501
- 2 Scott G, McArdie N. Opt Engng, 1992; 31(12): 2640~ 2643
- 3 戴立铭,江潼君. 仪器仪表学报, 1994; 15(4): 400~ 404
- 4 杨志文. 仪器仪表学报, 1996; 17(5): 550~ 553

\* \* \*

作者简介:周莉萍,女,1965年10月出生。博士研究生。曾研制汽车内胎硫化的集散式微机控制系统,现主要从事光学测量仪器的研究。