

煤堆体积检测系统三角成像特性

李 集 田

摘要 根据三角法原理, 导出计算煤堆高度公式, 并给出该系统的成像特性曲线, 最后提出正确选取物镜焦距 f 及激光束与摄像机水平距离 d 的一般原则。

一、引 言

根据Scheimpflug条件, 当物面和光轴倾斜时, 可以得到一个与之共轭的和光轴倾斜的像面, 设物点沿倾斜物面移动 y , 则与之共轭的像点也在倾斜的像面上移动 y' , 且 y' 和 y 有如下关系^[1]:

$$y' = \frac{v y \sin \alpha_1}{\sin \alpha_2 (u - y \cos \alpha_1 - y \sin \alpha_1 \cdot \cot \alpha_2)} \quad (1)$$

式中 u 、 v 分别为轴上点物距和像距; α_1 、 α_2 分别为物面、像面和光轴倾角, 利用(1)可实现光学测距的特点, 采用线状光束照射物体表面, 并用线阵 CCD 摄像机进行探测, 可实现物体表面粗糙度的在线测量和非接触式在线测厚^[2]; 采用面状光源对被测物体表面照射和扫描, 用面阵 CCD 摄像机探测, 可得三维图像信息, 与微机相联经过图像处理可获得三维图像^[3]; 采用这一技术可用在机器人视觉系统和不规则形状物体的测绘技术中^[4]。

采用 He-Ne 激光器作线状光源、垂直照射煤堆表面, 用线阵 CCD 摄像机对光点进行高度探测, 用两维机械扫描, 实现对大面积煤堆的三维测量, 从而实现煤堆体积的自动检测^[5]。本文就该系统的光学成像特性及有关参数的选取进行分析。

二、光 学 三 角

图 1 给出用于煤堆体积检测的三角结构原理。如图 1 所示, 选激光束在地表面交点为坐标原点 O , CCD 摄像机离地面高度 $z_A = 15.7\text{m}$, 激光器与摄像机水平距离 $d = 0.56\text{m}$, 测量最大高度 $z_B = 10\text{m}$, 选摄像机物镜焦距 $f = 0.3\text{m}$ 。

由图 1 简单几何关系, 可得激光束(物面)与光轴夹角:

$$\alpha_1 = \omega_2 + \omega/2 \quad (2)$$

其中 $\omega_2 = \tan^{-1} \frac{d}{z_A}$, $\omega_1 = \tan^{-1} \frac{d}{z_A - z_B}$

$$\text{视场角: } \omega = \omega_1 - \omega_2 \quad (3)$$

激光束与光轴交点 P (轴上物点)的高度

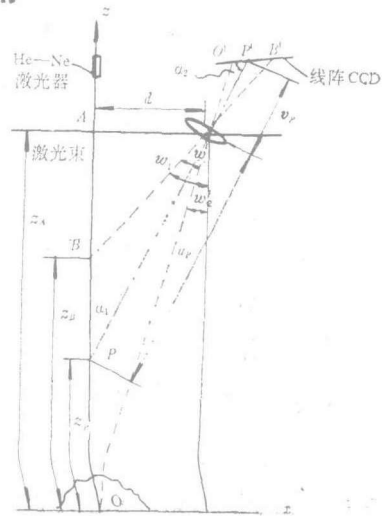


图 1 三角结构

$$z_p = z_A - \frac{d}{\tan \alpha_1} \quad (4)$$

p 点物距、像距:

$$u_p = \frac{d}{\sin \alpha_1} \quad (5)$$

$$v_p = \frac{f u_p}{u_p - f} \quad (6)$$

$$\text{横向放大率 } \beta = v_p / u_p \quad (7)$$

像面与光轴夹角^{[6][5][1]}

$$\tan \alpha_2 = \tan \alpha_1 / \beta \quad (8)$$

最低点 (地平面) 物距、像距分别为:

$$u_0 = u_p + z_p / \cos \alpha_1 \quad (9)$$

$$v_0 = \frac{f u_0}{u_0 - f} \quad (10)$$

设最低点 O 在 CCD 上的象点 O' 在线阵 CCD 上第 n_0 个象元上成像——这可用电子学方法进行事先标定^[7], 对应任意高度在 CCD 第 n 个象元上成像, 如果每个象元尺寸为 $13 \mu\text{m}$, 那么该象点离开 n_0 象元的位移 $s = (n - n_0) 13 \times 10^{-6} \text{m}$, 该象点对应的像距、物距分别为:

$$v = v_0 + s \cos \alpha_2 \quad (11)$$

$$u = \frac{f v}{v - f} \quad (12)$$

对应的高度

$$z = z_p + \frac{u_p - u}{\cos \alpha_1} \quad (13)$$

则大煤堆体积

$$V = \Delta x \cdot \Delta y \sum_{i=1}^{m \cdot n} z_i \quad (14)$$

式中 Δx 、 Δy 为机械二维扫描在横 (x)、纵 (y) 两个方向上的步长, m 、 n 分别为 (x)、(y) 方向上分割份数 (采样个数)

三、成像特性

1. 象点在 CCD 上位置与高度的关系

图 2 给出象点在线阵 CCD 上的位置 s 与被测煤堆表面高度 z 的关系曲线, 从曲线可看出 $z = F(s)$ 函数是非线性函数, 且 $\frac{dz}{ds}$ 随 s 增大而变小, 在 $z = 0$ (地平面) 时 $\frac{dz}{ds}$ 有最大值, 在 $z = z_B$ (最高点), $\frac{dz}{ds}$ 最小, 这意味着煤堆表面从底到高均匀变化时, 对应的象点在 CCD 上分布是不均匀的, 与近地点对应的象点在 CCD 上的分布要比远地点对应的分布密得多, 因而可以得出结论, 该探测系统的极限分辨率在近地点将受到限制。

2. 极限分辨率

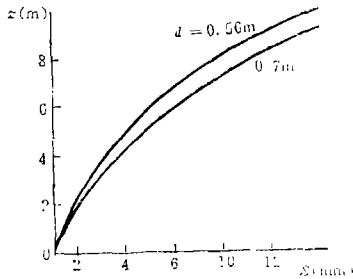


图2 象点在CCD上位置与高度关系

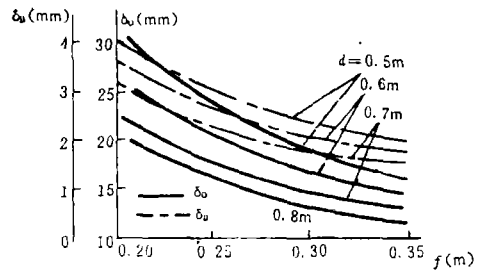


图3 极限分辨率与焦距的关系

图3给出对不同 d 值,在 $z=0$ 和 $z=z_B$ 两点对应的象点位移为1个象元($13\mu\text{m}$)时对应的高度变化(定义为极限分辨率)与物镜焦距 f 的关系。从曲线看出,在给定 d 和 f 后,最高点($z=z_B$)分辨率要比最低点($z=0$)分辨率高得多,如当 $d=0.56\text{m}$, $f=0.3\text{m}$ 时, $\delta_B=1.6\text{mm}$, $\delta_0=18\text{mm}$,即系统极限分辨受最低点分辨率的限制。且 δ_0/δ_B 随 d 值增大而减小,即随 d 的增加使分辨率趋向均匀;当 f 增加时又使 δ_0/δ_B 增大;然而,无论是 δ_0 还是 δ_B 都随 f 、 d 的增加而变小。

3. 像面与光轴夹角

图4给出不同的 d 值时,像面与光轴夹角 α_2 与焦距的关系。从曲线看出,在给定 d 值时, α_2 随 f 的增加而减小;在 f 给定时 α_2 随 d 的增加而增大,且都近似线性变化;显然当 α_2 越小时(即像面与光轴越倾斜),使象点在CCD上的分布越不均匀,使最高点分辨率和最低点分辨率的差异加大。

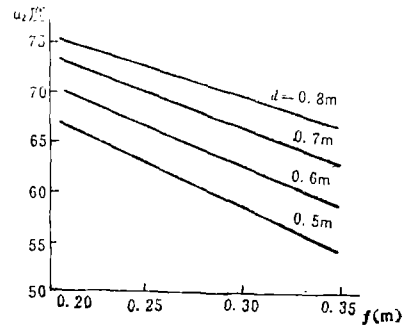


图4 不同的 d 值,像面和光轴夹角与焦距的关系

4. CCD上象点直径

图5给出线阵CCD上象点直径 D_0 与物高的关系。同一图中还给出激光束光点(物)直径 D 随物高的变化关系。由于激光束有发散角,所以射出越远($z=0$)光点直径越大,近似线性关系;与此相反,在CCD上的象点直径却随高度的增加而变大。这是由于光学系统横向放大率 β 随物高增加而变大的缘故(见图6)。从图5还可以看出象点直径 D_0 随焦距 f 的增加而增加,随 d 值的增加而减小。显然较小的象点,占较少的象元数,将有利于在图像处理时确认象点位置,有利于提高探测系统的检测精度。

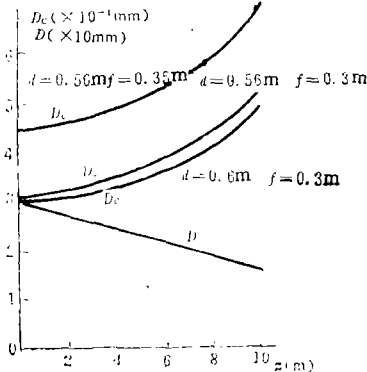


图5 物点(激光束)、象点直径与煤表面高度的关系

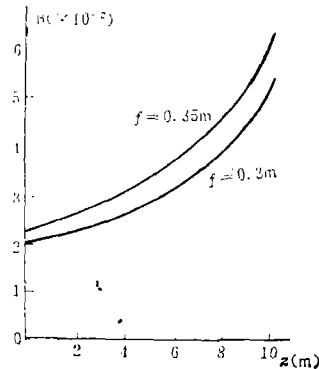


图6 对不同的焦距 f 放大率 β 与煤高 z 的关系

5. d 、 f 的选取

图 7 给出对不同的线阵 CCD 有效长度 s_0 ， d 与 f 的关系曲线。当给定待测条件： z_A 、 z_B 之

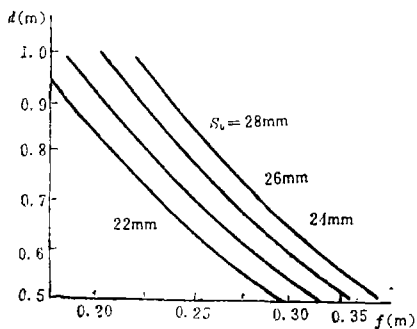


图 7 对不同的 s_0 ， d 与 f 的关系

后，应根据检测精度要求选定多少位的线阵 CCD，再由象元尺寸计算出 CCD 有效长度 s_0 。（如 CCD 为 2048 位，则 $s_0 = 2048 \times 13 \times 10^{-6} = 26.62\text{mm}$ ），当 s_0 确定之后， d 与 f 的关系也是唯一确定的。从图 7 可看出，较大的 d 对应较小的 f ，反之亦然。从以上各图的分析得之， f 增加使分辨率提高；像面与光轴夹角 α_2 减小，在 CCD 上的象点分布不均匀，使 δ_0/δ_B 增大，即最高点分辨率与最低点分辨率差异加大；同时由 f 的增加使光学系统放大率增加，导致光点像直径也变大。而 d 越大，可提高分辨率；使 α_2 增加，象点

在 CCD 上的分布趋于均匀，使 δ_0/δ_B 减小；同时也能减小光点直径尺寸。于是有如下结论：

在结构允许的情况下， d 越大越好；在满足如图 7 所示 $f = F(s_0, d)$ 的关系条件下， f 越小越好。

四、结 束 语

上述成像特性，虽然是根据煤堆体积检测的光学三角计算结果，但给出的成像规律，对一般三角法测距仍有普遍意义。影响成像特性的因素，除合理地选择 d 、 f 外，还有其它因素，如对激光束采用聚束，使之形成锥形束，不仅可减小光点尺寸，还可提高光点能量密度，有利于对光点的探测；选用物镜大口径也是必须考虑的问题，较大的相对孔径可使物镜接受较大的能量，有利于近地点（远处）光点探测。

参 考 文 献

- [1] [苏] Б·Н·别戈诺夫；《光学系统理论》，机械工业出版社，1986年40
- [2] 叶培德；激光与红外，21，No.4，1991.35
- [3] P. Cielo, M. Dufour, SPIE, 959 (1988) 87
- [4] F·Blais, M. Rioux, SPIE, 959 (1988) 225
- [5] 李集田，贾欣志等；光学机械，1991.5
- [6] G. Bickel, G. Häusler et al., Opt. Eng., 24, No.6. (1985)775
- [7] 贾平，光学机械，1991.3.48

Triangulation Imaging Characteristics of the System Used to Measure Volume of Coal Heap

Li Jitian

Abstract

On the basis of optical triangulation principle, formulas for

calculating height of the heap of coal are derived and imaging characteristic diagrams of the system are given. Finally a rule for correctly selecting focal length f of the objective lens and horizontal distance d between the laser beam and the camera are presented.