

单像对近景摄影测量若干方法的精度评价

8
23-3

李浩 张友静

(河海大学土木工程学院 南京 210098)

p23

摘要 依据适应近景摄影测量特点的精度估算公式,对单像对摄影测量的安置方位元素作业方法及利用物方控制点反算方位元素的共线、共面条件解算方法进行精度比较与评价;阐述使用常角摄影机作业可能达到毫米及亚毫米级精度的近景摄影测量的作业特点及精度。

关键词 近景摄影 摄影测量 测量方法 精度估计 毫米及亚毫米级精度

毫米及亚毫米级精度摄影测量广泛应用于工程构筑物的局部变形观测,工业制造中复杂目标的精确制图,考古、医学部门的专业测绘等非地形测量领域,因被测对象多为数十厘米至一二十米的独立目标物,故对这类目标的摄影测量大多采用单像对作业,且内业处理主要为解析方法。在摄影测量中,毫米及亚毫米级摄影测量属高精度测量,作业中若延用航测或地面摄影测量中一些附有较多近似条件的惯用精度估算式,可能会使测量精度产生明显偏差。近景目标形态各异,测量要求不同,作业方式多变,因此准确估计近景摄影测量作业精度不仅是保证测量精度的关键,也是选择适宜的作业方法,指导具体作业过程的依据。

1 安置像片外方位元素作业方式

安置像片外方位元素的近景摄影测量作业方式中,最具代表性的是正直摄影测量。

1.1 正直摄影测量精度

由正直摄影测量前方交会公式可导出确定目标物方坐标中误差式

$$\begin{cases} m_x = \pm M \sqrt{m_z^2 + \left(\frac{z}{p}\right)^2 m_p^2 + \left(\frac{z}{B}\right)^2 m_B^2} \\ m_y = \pm M \sqrt{m_f^2 + \left(\frac{f}{p}\right)^2 m_p^2 + \left(\frac{f}{B}\right)^2 m_B^2} \\ m_z = \pm M \sqrt{m_z^2 + \left(\frac{z}{p}\right)^2 m_p^2 + \left(\frac{z}{B}\right)^2 m_B^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中 M 为摄影比例尺分母。

对现代量测用近景摄影机而言,物镜成像畸变、底片压平及几何变形误差、内方位误差等因素对像点坐标的综合影响,在内定向校正后,只有几个微米,精密坐标仪量测像点坐标的精度也达到 $1 \sim 3 \mu\text{m}$,而像片角元素误差引起的像点坐标及左右视差误差为

$$\begin{cases} m_x = \pm \left[\left(f + \frac{x^2}{f}\right)^2 m_\varphi^2 + \left(\frac{xz}{f}\right)^2 m_\omega^2 + z^2 m_\kappa^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ m_y = \pm \left[\left(\frac{xz}{f}\right)^2 m_\varphi^2 + \left(f + \frac{z^2}{f}\right)^2 m_\omega^2 + x^2 m_\kappa^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ m_p = \pm \left[2f^2 + \left(\frac{x^2}{f}\right)^2 + \left(\frac{(x-p)^2}{f}\right)^2 \right] m_\varphi^2 + \left[\left(\frac{xz}{f}\right)^2 + \left(\frac{(x-p)z}{f}\right)^2 \right] m_\omega^2 + 2z^2 m_\kappa^2 \right]^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (2)$$

显然,受摄影机定向设备安置像片角元素精度以及摄影基线测定精度的制约,外方位元素误差是决定外方位元素安置作业方式测量精度的主要因素。

决定测量精度的另一个主要因素是摄影基线长度与摄影纵距之比 B/Y (基距比)。

对正直摄影有 $\frac{B}{Y} = \frac{l_x}{f} (1 - p\%)$, 其中 l_x 表示像幅边长, $p\%$ 表示像对重叠度。因 l_x/f 取决于摄影机像场角,故对某种摄影机作业,基距比与重叠度是一一对应的。常角摄影机 (像场角 $45^\circ \sim 70^\circ$) 具有主距适中而构像畸变

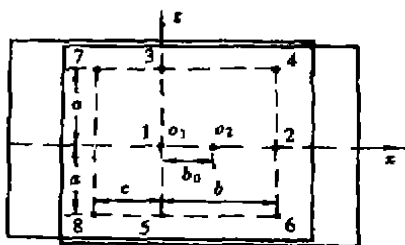


图1 像对点位分布

小的特点,最宜用于对小型目标的近距摄影。

以 WILD P31/10 近景摄影机为例,不失一般性有, $m_p = m_w = m_x = \pm 20'$, $m_f = \pm 0.01 \text{ mm}$, $m_B = \pm 1 \text{ mm}$ 。对图1所示像对作业面积内精度最弱点4 ($b = 46 \text{ mm}$, $a = 35 \text{ mm}$),由(2)式和(1)式算得近景像对常用重叠度下不同摄影比例尺的精度曲线如图2所示,其中点位平面精度为 $m_S = \pm \sqrt{m_X^2 + m_Y^2}$ 。由此可见:

a. 在毫米级精度附近,基距比与摄影比例尺比较,前者对测量精度的影响更大。

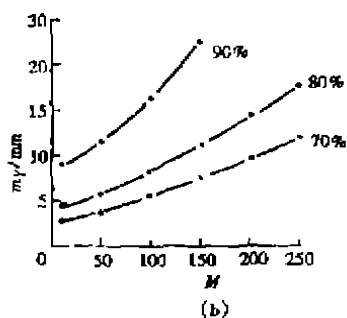
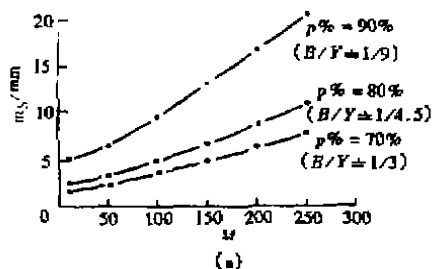


图2 正直摄影测量精度
(a)平面精度;(b)纵距精度

b. 只要目标点影像具有良好判识性,则测量精度随摄影比例尺缓慢变化,特别在毫米级精度上,过大的摄影比例尺对提高测量精度意义不大。

c. 常角摄影机取 80% 的像对重叠度,既

能获得较高测量精度,又能适当避免出现目标立体盲区或立体观测困难。更小的像对重叠度对测量精度提高将趋缓。

1.2 距离相对控制反算摄影基线精度

单像对作业的物方坐标系选择在左投影中心,避免了摄站点位误差、仪器对中误差及摄影中心与仪器竖轴间偏心改正误差对测量结果的影响,但由于准确确定摄影中心位置并非易事,直接量距确定摄影基线长度的精度难以达到 1 mm 以内,故常用距离相对控制反算摄影基线长度,期望提高外方位元素安置精度。

取假定基线长度 B' ,按正直摄影方式测得用作水平距离相对控制的定长 L' ,其与相应实际长度 L 之比为比例归化系数 $\lambda = L/L'$,由此得到摄影基线长为 $B = \lambda B'$,且有(考虑 $L \approx L'$)

$$m_B = B' m_\lambda \approx \frac{B}{L} \sqrt{2(m_X^2 + m_Y^2)} \quad (3)$$

为使 m_B 获得最高精度, L 取最大可能长度 $l_x \cdot p\% \cdot M$,则上式表示为

$$m_B = \frac{1 - p\%}{p\%} \sqrt{2(m_X^2 + m_Y^2)} \quad (4)$$

式中 m_X, m_Y 按式(1)计算,且注意到此时 $m_B = 0$ 。

仍以 P31/10 作业条件代入,则像对重叠度为 80% 时有 $M_B \approx 0.027 M (\text{mm})$ 。由此可知,距离相对控制反算正直摄影基线的精度随 M 成正比下降,只有 M 较小时(如 $M < 37$),才能获得较高的基线测定精度(如 $m_B < 1 \text{ mm}$),大多数情况下,反算基线长度的精度大大低于直接量距法测定精度。

2 利用控制点反算像片方位元素作业方式

利用控制点反算像片方位元素,实现像对摄影光束几何反转的作业方式,具体的解算有多种数学模型,但在像点坐标的系统误差很小的情况下,一般认为单像对的共线条件解法和共面条件解法都能达到较高精度。

2.1 共线条件解法

共线条件解法在这里是指摄影测量空间后方交会及前方交会解算方法,空间后交的数学模型通常采用共线方程。对近似正直像对,设像对内为后交布设四个控制点 4,6,7,8(见图 1),则后方交会法方程系数矩阵的上三角元素为

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{12} = a_{13} = a_{15} = a_{24} = a_{26} = a_{34} \\ \quad = a_{36} = a_{45} = a_{56} = 0 \\ a_{11} = 2(f + \frac{c^2}{f})^2 + 2(f + \frac{b^2}{f})^2 + \\ \quad 2(\frac{ac}{f})^2 + 2(\frac{ab}{f})^2 \\ a_{14} = 2f(1 + \frac{c^2}{f^2}) + 2f(1 + \frac{b^2}{f^2}) \\ a_{16} = 2b(1 + \frac{b^2}{f^2}) + 2c(1 + \frac{c^2}{f^2}) + \\ \quad 2\frac{a^2b}{f^2} + \frac{a^2c}{f^2} \\ a_{22} = 4(f + \frac{a^2}{f})^2 + 2(\frac{ab}{f})^2 + 2(\frac{ac}{f})^2 \\ a_{23} = 2f(b + c) \\ a_{25} = 4(f + \frac{a^2}{f}) \\ a_{33} = 4a^2 + 2(c^2 + b^2) \\ a_{35} = 2(b + c) \\ a_{44} = a_{55} = 4 \\ a_{46} = 2(\frac{b+c}{f}) \\ a_{66} = 4\frac{a^2}{f^2} + 2\frac{b^2+c^2}{f^2} \end{array} \right. \quad (5)$$

对上述 P31 摄影机作业条件,重叠度为 80% 时,取 $c = -24 \text{ mm}$,则由法方程系数阵求得未知数协因数阵后,解得外方位元素中误差式为

$$m_\varphi = 0.041 m_0 \quad m_\omega = 0.040 m_0$$

$$m_\kappa = 0.010 m_0 \quad m_{\kappa S} = M \cdot 4.63 m_0$$

$$m_{\gamma S} = M \cdot 4.52 m_0 \quad m_{ZS} = M \cdot 1.24 m_0$$

其中, m_0 为后交误差方程观测值单位权中误差。据试验,量测摄影机近景像片在精密坐标仪上量测, m_0 为 0.007 mm 左右。由此可知,外方位角元素确定精度接近 $1'$ 。

• 30 •

角元素为小值条件下,前方交会精度估算式仍为式(2)和式(1),代入外方位相应数据,并考虑对独立坐标系有 $m_B = \sqrt{m_{\kappa S}^2 + m_{\gamma S}^2 + m_{ZS}^2}$,则共线条件解法下点 4 的测量精度与正直摄影测量精度的比较如图 3 所示。由此可见:

a. 在其它条件相同时(影像质量、重叠度、量测手段等),共线条件解法中外方位角元素的确定精度一般较外方位元素安置作业方式要低,线元素的确定精度还同摄影比例尺分母成正比,因而测量精度随摄影比例尺缩小而迅速下降。

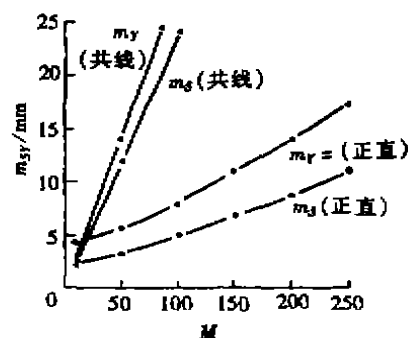


图 3 共线条件法与安置法精度比较

b. 假设控制点对称分布并由四点增至九点,类似可求得后方交会精度只能提高 20% ~ 30%,因此共线条件解法不适合应用于毫米级精度的近景摄影测量作业。

2.2 共面条件解法

共面条件解法分相对定向及绝对定向两步进行。影响该解法精度的因素有控制点坐标起始误差、相对定向元素误差、测点的摄影测量模型坐标量测误差三类。精度估计时,可作如下约定:①由于近景像对重叠度可能达到 80% 以上,采用标准点位作相对定向精度不高,且标准点位上不一定有合适的相对定向特征点,故相对定向在图 1 所示 1~6 点上进行,其中点 2 不一定是像主点;②对近似正直像对,影响模型平面坐标精度的绝对定向元素为 X_0, Z_0, λ 和 K ,影响模型 Y 坐标精度的绝对定向元素为 Y_0, Φ 和 Ω ;③模型绝对定向在图 1 所示像对内 3~6 四个控制点上进行。

像对经相对定向和绝对定向后的摄影测量精度估算式^[1](归化至像片比例尺)为

$$\begin{cases} m_s = \pm [m_x^2 Q_{x_1 x_1} + m_z^2 Q_{z_1 z_1} + m_q^2 (Q_{x_2 x_2} + Q_{z_2 z_2}) + m_x^2 Q_{x_3 x_3} + m_z^2 Q_{z_3 z_3}]^{\frac{1}{2}} \\ m_y = \pm [m_y^2 Q_{y_1 y_1} + m_q^2 Q_{y_2 y_2} + m_y^2 Q_{y_3 y_3}]^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (6)$$

式中 m_x, m_y, m_z 为模型坐标中误差; m_q 为上下视差中误差; m_x, m_y, m_z 为依像片比例尺的控制点坐标中误差。

根据以上约定条件可导出式中对对应权函数,其形式一般较复杂,例如对 $Q_{x_2 x_2}$ 有

$$\begin{aligned} Q_{x_2 x_2} = & \frac{2}{3b^2} \left[\frac{z(b_0 - 2x)}{2b_0} \right]^2 + \frac{1}{2a^2} \left[\frac{x(b_0 - x)}{b_0} \right]^2 + \\ & \frac{1}{a^2 b^2} \left[\frac{x(x - b_0)^2}{b_0} - \frac{a^2 b_0 (2x - b_0)}{2(b_0^2 + 4a^2)} \right]^2 + \\ & \frac{3}{4a^4} \left[\frac{xz(b_0 - x)}{b_0} - \frac{a^2 b_0 z}{b_0^2 + 4a^2} \right]^2 - \\ & \frac{x(b_0 - x)}{a^2 b b_0} \cdot \left[\frac{x(x - b_0)^2}{b_0} - \frac{a^2 b_0 (2x - b_0)}{2(b_0^2 + 4a^2)} \right] \end{aligned}$$

将 P31/10 摄影机作业条件代入式(6),并设 $m_x \approx m_z \approx m_q = \pm 0.007 \text{ mm}$, $m_y \approx f/b_0 m_p \approx f/b_0 m_q$, $m_x = m_y = m_z = 0$, 重叠度为 80% 时 ($b_0 = 22 \text{ mm}$) 点 4 精度曲线如图 4 所示。由此可见:

a. 相对定向使像对具有很高的内部定向精度,因而共面条件解法成为上述作业方法中测量精度最高的一种作业方法,能满足亚毫米精度的测量要求。

b. 权系数 $Q_{x_3 x_3}, Q_{x_2 x_2}, Q_{y_3 y_3}$ 之值一般在 0.5 左右,而控制点由图 1 所示四点减为上下分布任意三点时,В.И.巴甫洛夫^[1]的研究表明,摄影测量精度下降小于 30%,可见亚毫米精度摄影测量对控制点精度及分布形态要求并不苛刻,该方法尤其适合于控制条件可能变化的变形监测等重复测量作业。

c. 与共线条件解法相比,由于像对内部定向精度高,故当适当减小像对重叠度,以增大光线交会角时,测量精度还会有明显提高。

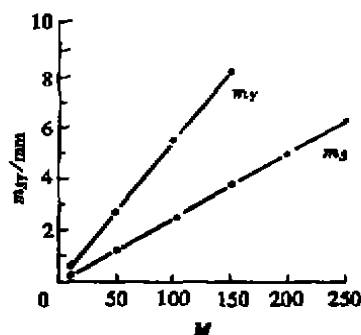


图 4 共面条件法精度

3 结 语

对外方位元素安置作业方法,由于短基线设定的像片偏角精度很难小于 $20''$,故即使使用跨水准器亦不能明显提高测量精度,但外方位元素安置作业方法避免了控制测量,且测量精度随摄影比例尺减小缓慢下降,所以仍是一种适合毫米级精度的摄影测量方法。相对毫米级精度,因空间后方交会精度较低,且结果随控制点分布形态变化的影响较大,故基于单像空间后交及前交的共线条件解法不宜用于高精度摄影测量。以共面条件解法作亚毫米精度摄影测量,0.1 mm 左右的控制坐标误差对测量结果的影响几乎可以忽略。然而,该控制精度已接近经纬仪三角测量测定点位的极限精度,且已与摄影测量精度相接近,故在量测摄影机不可能再缩短摄影纵距提高摄影比例尺的情况下,只有设法以更高精度确定像对方位元素,并同时提高像点坐标精度,才有可能使摄影测量精度比亚毫米级提高一个数量级。

参考文献

- 1 巴甫洛夫 В.И. 摄影测量量测值的数学处理. 北京:测绘出版社,1981 (收稿日期:1996-09-11)