

利用单幅影像的空间目标姿态测定方法

张永军, 孔胃

(武汉大学遥感信息工程学院, 430079, 武汉)

摘要: 提出一种利用已知外方位元素的单幅影像测定空间目标姿态的方法. 在观测到目标物体上一定数量控制点的情况下, 利用角锥体方法求解本体坐标系下影像外方位元素的近似值, 通过坐标变换获得物方坐标系下的目标姿态参数初始值并带入共线方程, 采用最小二乘平方差解算出精确姿态参数. 该方法避免了利用 2 台或多台摄像机进行运动目标姿态测定的摄影同步问题, 具有更大的灵活性和实用性. 模拟和实际数据的试验结果验证了方法的正确性. 试验结果还表明, 摄影中心距离目标越远, 相机的焦距越长, 姿态测定的精度就越差. 实际应用中可以根据具体情况和精度要求, 灵活选择不同数量的控制点和合适焦距的相机来进行空间目标的姿态测定.

关键词: 摄影测量; 单幅影像; 空间目标; 姿态测定; 角锥体

中图分类号: P23; TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)09-0056-06

Pose Determination of Space Object with Single Image

ZHANG Yongjun, KONG Wei

(School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: A new method for space object pose determination by single image with known exterior orientation parameters is proposed. Initial values of object pose under world coordinate system are acquired by space resection and coordinate transformation. Then, precise pose parameters are obtained by least squares adjustment with collinearity equations where the exterior orientation parameters are known. The proposed approach avoids the synchronization problem of determining object pose with two or more cameras. Both simulated and real data experiments verify the correctness and validity of the proposed approach. The experimental results show that the precision of pose determination is significantly influenced by focal length of camera and distance between object and camera, thus the number of control points and focal length ought to be fully considered according to the precision requisition for application.

Keywords: photogrammetry; single image; space object; pose determination; triangular pyramid

空间目标运动姿态的测定是目前的热门研究课题之一, 随着摄影测量技术的不断发展, 基于影像的姿态测定方法也越来越受到研究者的重视^[1-7]. 传统的基于影像的运动参数测量方法需要获取同一时刻物体的 2 幅影像, 然后经过影像处理和摄影测量处理, 测定出该时刻某些点的三维空间坐标, 并在某一个时段内, 获取这些点在不同时刻的三维空间坐标, 才可以测定物体运动的轨迹、速度、加速度等^[8]. 但

是, 空间飞行器速度很快, 在同一时刻获取立体像对的方式几乎不可能, 因而限制了该方法的应用. 张祖勋等利用单相机序列影像对空中飞行的目标进行姿态跟踪监测, 并提出了利用广义点反馈迭代的最小二乘方法和模拟影像与真实影像匹配的目标姿态跟踪求解方案, 姿态角测定精度达 0.1° 左右^[1].

本文利用物方坐标系下一幅已知外方位元素的影像和本体坐标系下的若干控制点(即本体坐标系

到物方坐标系的3个旋转参数和3个平移参数)来确定空间目标姿态。

1 三维空间中的刚体运动

一般来说,空间物体的运动可看作理想的刚体运动,即其形状、大小保持不变。图1所示为对某一空间物体进行摄影的成像关系,其中 $Oxyz$ 为影像坐标系, $O'x_{ob}y_{ob}z_{ob}$ 为物方坐标系, $O''x_wy_wz_w$ 为物方坐标系。物体上的某一点 P 既有相对于物方坐标系的坐标 (x_{ob}, y_{ob}, z_{ob}) ,也有相对于物方坐标系的坐标 (x_w, y_w, z_w) ,二者之间的变换关系即为空间物体相对于物方坐标系的姿态参数。

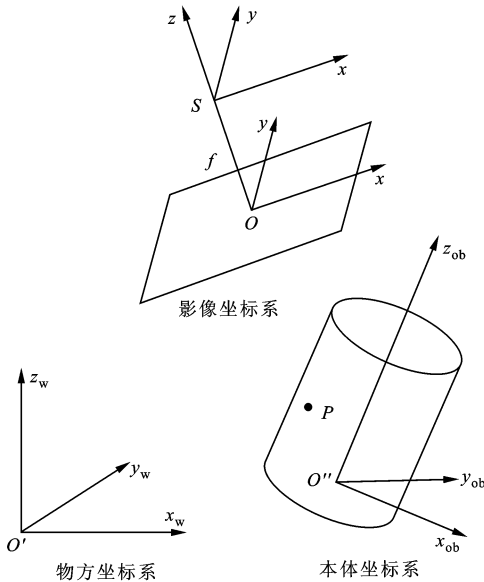


图1 本体和影像之间的关系

由刚体运动的性质知道,本体坐标系和物方坐标系之间可以通过旋转和平移进行转换,即

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} = \mathbf{R}' \begin{bmatrix} x_{ob} \\ y_{ob} \\ z_{ob} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{R}'$ 是 3×3 的正交矩阵; $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 为平移参数。求解出这些参数,就确定了物体在物方坐标系中的姿态。

2 摄影测量方法获取目标姿态

在摄影测量中,共线方程建立了物方坐标和影像坐标之间的投影关系^[9]

$$\begin{cases} x = -f \frac{a_1(x_w - x_s) + b_1(y_w - y_s) + c_1(z_w - z_s)}{a_3(x_w - x_s) + b_3(y_w - y_s) + c_3(z_w - z_s)} \\ y = -f \frac{a_2(x_w - x_s) + b_2(y_w - y_s) + c_2(z_w - z_s)}{a_3(x_w - x_s) + b_3(y_w - y_s) + c_3(z_w - z_s)} \end{cases} \quad (2)$$

式中: f 为相机焦距; x_s, y_s, z_s 为外方位线元素; $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3$ 为由3个外方位角元素 φ, ω, κ 构成的旋转矩阵的元素^[9]。

在确定目标物体的姿态时,常用光电经纬仪等设备同步获取影像及其在物方坐标系下的方位元素,因此本文中影像的外方位元素视为已知,即图1中影像在物方坐标系 $O'x_wy_wz_w$ 下的外方位元素已知,待求参数为目标物体在物方坐标系下的6个姿态参数。按照摄影测量的一般习惯,令物体坐标与物方坐标之间的旋转矩阵(即式(1))中的 $\mathbf{R}'$ 由以 y 轴为主轴的旋转角 $\varphi', \omega', \kappa'$ 构成,即

$$\mathbf{R}' = \begin{bmatrix} a'_1 & a'_2 & a'_3 \\ b'_1 & b'_2 & b'_3 \\ c'_1 & c'_2 & c'_3 \end{bmatrix}$$

式中

$$\begin{aligned} a'_1 &= \cos\varphi' \cos\kappa' - \sin\varphi' \sin\omega' \sin\kappa' \\ a'_2 &= -\cos\varphi' \sin\kappa' - \sin\varphi' \sin\omega' \cos\kappa' \\ a'_3 &= -\sin\varphi' \cos\omega' \\ b'_1 &= \cos\omega' \sin\kappa' \\ b'_2 &= \cos\omega' \cos\kappa' \\ b'_3 &= -\sin\omega' \\ c'_1 &= \sin\varphi' \cos\kappa' + \cos\varphi' \sin\omega' \sin\kappa' \\ c'_2 &= -\sin\varphi' \sin\kappa' + \cos\varphi' \sin\omega' \cos\kappa' \\ c'_3 &= \cos\varphi' \cos\omega' \end{aligned}$$

由式(1)可得本体坐标到物方坐标的转换关系

$$\begin{cases} x_w = a'_1 x_{ob} + a'_2 y_{ob} + a'_3 z_{ob} + \Delta x \\ y_w = b'_1 x_{ob} + b'_2 y_{ob} + b'_3 z_{ob} + \Delta y \\ z_w = c'_1 x_{ob} + c'_2 y_{ob} + c'_3 z_{ob} + \Delta z \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)代入共线方程,即可建立本体坐标和影像坐标之间的关系方程,该方程中的未知数为姿态参数 $\varphi', \omega', \kappa', \Delta x, \Delta y, \Delta z$ 。由于共线方程为非线性函数,因而需进行线性化得到如下的误差方程式,并进行最小二乘迭代求解

$$\begin{cases} x = (x) + \frac{\partial x}{\partial \varphi'} d\varphi' + \frac{\partial x}{\partial \omega'} d\omega' + \frac{\partial x}{\partial \kappa'} d\kappa' + \left\{ \begin{aligned} &\frac{\partial x}{\partial \Delta x} d\Delta x + \frac{\partial x}{\partial \Delta y} d\Delta y + \frac{\partial x}{\partial \Delta z} d\Delta z \end{aligned} \right\} \\ y = (y) + \frac{\partial y}{\partial \varphi'} d\varphi' + \frac{\partial y}{\partial \omega'} d\omega' + \frac{\partial y}{\partial \kappa'} d\kappa' + \left\{ \begin{aligned} &\frac{\partial y}{\partial \Delta x} d\Delta x + \frac{\partial y}{\partial \Delta y} d\Delta y + \frac{\partial y}{\partial \Delta z} d\Delta z \end{aligned} \right\} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $(x), (y)$ 为由未知数近似值得出的影像坐标。

式(4)中各未知数的系数均为偏导数,现以 $\frac{\partial x}{\partial \varphi'}$ 为例进行推导。根据共线方程有

$$\frac{\partial x}{\partial \varphi'} = \frac{\partial x}{\partial x_w} \frac{\partial x_w}{\partial \varphi'} + \frac{\partial x}{\partial y_w} \frac{\partial y_w}{\partial \varphi'} + \frac{\partial x}{\partial z_w} \frac{\partial z_w}{\partial \varphi'}$$

其中影像的外方位元素为已知,即式(2)中的 a_1 ,

$a_2, \dots, c_3$ 及 x_s, y_s, z_s 已知. 令

$$\bar{z} = a_3(x_w - x_s) + b_3(y_w - y_s) + c_3(z_w - z_s)$$

可以得到

$$\frac{\partial x}{\partial x_w} = -\frac{a_1 f + a_3 x}{\bar{z}}$$

$$\frac{\partial x}{\partial y_w} = -\frac{b_1 f + b_3 x}{\bar{z}}$$

$$\frac{\partial x}{\partial z_w} = -\frac{c_1 f + c_3 x}{\bar{z}}$$

对于 $\frac{\partial x_w}{\partial \varphi'}$, 由式(3)得

$$\frac{\partial x_w}{\partial \varphi'} = x_{ob} \frac{\partial a'_1}{\partial \varphi'} + y_{ob} \frac{\partial a'_2}{\partial \varphi'} + z_{ob} \frac{\partial a'_3}{\partial \varphi'}$$

根据旋转矩阵的表达形式,容易得出

$$\frac{\partial a'_1}{\partial \varphi'} = -\sin \varphi' \cos \kappa' - \cos \varphi' \sin \omega' \sin \kappa' = -c'_1$$

$$\frac{\partial a'_2}{\partial \varphi'} = \sin \varphi' \sin \kappa' - \cos \varphi' \sin \omega' \cos \kappa' = -c'_2$$

$$\frac{\partial a'_3}{\partial \varphi'} = -\cos \varphi' \cos \omega' = c'_3$$

进而得到 $\frac{\partial x_w}{\partial \varphi'}$, 按照此方法求出 $\frac{\partial y_w}{\partial \varphi'}$ 和 $\frac{\partial z_w}{\partial \varphi'}$, 即可确定

$\frac{\partial x}{\partial \varphi'}$ 的值.

误差方程式(4)中的 $\varphi', \omega', \kappa'$ 即为待求的目标物体姿态的 3 个旋转参数, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 为目标物体姿态的 3 个平移参数. 确定式(4)中各偏导数的值之后,就可以在观测到目标物体上 3 个或 3 个以上控制点的情况下,由给定的近似值迭代求解出未知数的精确值. 由于物体在空间飞行时姿态参数、尤其是角元素经常较大,因而近似值的给定非常重要,如果近似值不够准确则很容易引起迭代过程不收敛.

3 姿态参数近似值的确定

为了确定姿态参数 $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \varphi', \omega'$ 和 κ' 的近似值,设影像坐标到物体坐标的投影关系的旋转矩阵为 $\mathbf{R}_{io}$, 摄影中心在物体坐标系下的坐标为 $(x_{s,io}, y_{s,io}, z_{s,io})$. 现有物体上某点 P 在物体坐标系下的坐标为 (x_{ob}, y_{ob}, z_{ob}) , 在物方坐标系下的坐标为 (x_w, y_w, z_w) , P 在影像上对应的像点坐标为 (x, y) . 根据投影关系可得

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \lambda_2 \mathbf{R}_{io}^{-1} \begin{bmatrix} x_{ob} - x_{s,io} \\ y_{ob} - y_{s,io} \\ z_{ob} - z_{s,io} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \lambda_1 \mathbf{R}^{-1} \begin{bmatrix} x_w - x_s \\ y_w - y_s \\ z_w - z_s \end{bmatrix} \quad (6)$$

联立式(5)和式(6)可得

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \mathbf{R} \mathbf{R}_{io}^{-1} \begin{bmatrix} x_{ob} - x_{s,io} \\ y_{ob} - y_{s,io} \\ z_{ob} - z_{s,io} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix}$$

式(5)和式(6)是针对同一对像点和物点的空间投影关系,且本体坐标系和物方坐标系之间的转换为刚体变换, λ_1, λ_2 均为摄影中心距像点长度和距物点长度之比,故其缩放比例相同,即 $\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = 1$. 进一步整理上式可得

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} = \mathbf{R} \mathbf{R}_{io}^{-1} \begin{bmatrix} x_{ob} \\ y_{ob} \\ z_{ob} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} - \mathbf{R} \mathbf{R}_{io}^{-1} \begin{bmatrix} x_{s,io} \\ y_{s,io} \\ z_{s,io} \end{bmatrix} \quad (7)$$

由式(7)不难看出, $\mathbf{R} \mathbf{R}_{io}^{-1}$ 即为本体坐标系到物方坐标系的旋转矩阵 $\mathbf{R}'$, 通过三角函数运算可以分

解得到两坐标系之间的 3 个旋转参数, $\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} -$

$\mathbf{R} \mathbf{R}_{io}^{-1} \begin{bmatrix} x_{s,io} \\ y_{s,io} \\ z_{s,io} \end{bmatrix}$ 即为两坐标系之间的 3 个平移参数 Δx 、

Δy 和 Δz . 上述 6 个参数即为空间物体在物方坐标系下的姿态. 确定了影像在本体坐标系下的外方位元素后,通过运算可以得到本体坐标系到物方坐标系的转换关系,理论上该转换关系即为目标物体的姿态参数. 但是从式(7)可以发现,本体坐标系相对于物方坐标系的 3 个旋转参数的精度取决于本体坐标系下影像外方位角元素的确定精度,而本体坐标系相对于物方坐标系的平移参数 Δx 、 Δy 和 Δz 的精度是本体坐标系下影像外方位角元素和线元素的确定精度的合成,按照误差传播规律,其精度必然低于线元素本身的确定精度. 因此,本文以变换求得的参数作为近似值代入式(4),再通过最小二乘平方差直接求解,则平移参数的最终确定精度必然高于首先确定本体坐标系下影像的方位元素再进行变换的方式. 另外,采用本文所述的数学模型还可以很方便地引入摄站到目标物体的测定距离作为约束条件,获得更为可靠的解算结果.

4 影像外方位元素求解

利用影像上3个以上像点坐标和对应的物方点坐标计算影像外方位元素的工作称为后方交会,摄影测量中常用的方法是将其共线方程线性化后迭代求解。这种方法实现简单,精度较高,但也存在一定的缺陷:需要方位元素的近似值;控制点分布不佳容易引起外方位元素解算结果的不稳定性;长焦距情况下线元素与角元素之间相关性较强,同时解算6个参数时近似值不佳容易导致解算结果偏离真实值。

本文采用角锥体法求解外方位元素初始值,并带入式(7)和式(4)进行精确姿态参数解算。如图2所示,利用“以摄影中心为顶点的2根构像光线的像方角与其物方角相等”的原理分步求解线元素和角元素,先求解出图中棱 v 、 u 、 w 的长度,然后根据距离方程组解得外方位线元素的值,再求解角元素的值。图2中 $a(x_a, y_a)$ 、 $b(x_b, y_b)$ 、 $c(x_c, y_c)$ 为影像上的点, $A(x_A, y_A, z_A)$ 、 $B(x_B, y_B, z_B)$ 、 $C(x_C, y_C, z_C)$ 为物方点。

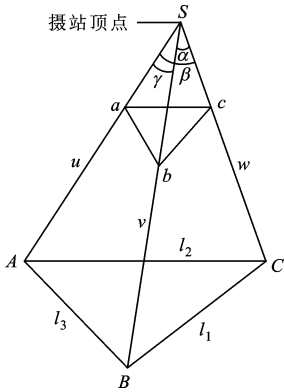


图2 3点组成的摄影角锥

由共线关系容易得到: $\angle aSb = \angle ASB$; $\angle aSc = \angle ASC$; $\angle bSc = \angle BSC$. 在像方空间中,由余弦定理可得

$$\cos \angle aSb = (x_a x_b + y_a y_b + f^2) / [(x_a^2 + y_a^2 + f^2)^{1/2} (x_b^2 + y_b^2 + f^2)^{1/2}]$$

用同样的方法可求得 $\cos \angle bSc$ 和 $\cos \angle aSc$. 对三角形 ASB 、 BSC 、 ASC 应用余弦定理得

$$l_1^2 = v^2 + w^2 - 2vw \cos \alpha$$

$$l_2^2 = w^2 + u^2 - 2wu \cos \beta$$

$$l_3^2 = u^2 + v^2 - 2uv \cos \gamma$$

求解 u 、 v 、 w 值的方法有参数消元解一元四次方程法^[9]和迭代法^[10]. 本文采用前者,得到 v 、 u 、 w 的值后,便可利用如下的距离方程组求解出外方位线元素

$$\left. \begin{aligned} u^2 &= (x_A - x_s)^2 + (y_A - y_s)^2 + (z_A - z_s)^2 \\ v^2 &= (x_B - x_s)^2 + (y_B - y_s)^2 + (z_B - z_s)^2 \\ w^2 &= (x_C - x_s)^2 + (y_C - y_s)^2 + (z_C - z_s)^2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

解方程过程中得到的不理解的可以通过以下几种方法排除:在地面对飞行物体进行摄影时,摄站位于物体下方;利用多余控制点,将通过式(8)求得的线元素以多余控制点重新带入式(8)检核,满足条件的一组解即为正确的近似值;若影像由光电经纬仪获取^[3],此时经纬仪和物体之间的距离 d 为已知,解得不同外方位元素后,可计算摄站点与物体原点之间的距离,选取与 d 最近的值作为近似外方位元素。

根据像点 a 和物点 A 的坐标关系,有

$$\begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ -f \end{bmatrix} = \frac{S_a}{S_A} \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_A - x_s \\ y_A - y_s \\ z_A - z_s \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: S_a 、 S_A 分别为摄站点到影像点 a 和物点 A 的长度。此时 x_s 、 y_s 、 z_s 已经求得。根据同样的方法可对 B 、 C 两点列出方程,完成旋转矩阵的解算。需要说明的是,这里所用到的控制点的坐标是位于本体坐标系下的,因而求解的影像外方位元素也在本体坐标系下,亦即式(7)中的 R_{io} 和 $x_{s,io}$ 、 $y_{s,io}$ 、 $z_{s,io}$,将这些参数带入式(7),即可求得目标物体姿态参数的计算值。

5 试验结果与分析

取得了较准确的姿态参数初始值后,就可以迭代解算目标姿态参数的精确值,如果所获取的影像为序列影像,在对其一幅影像进行解算后,得到的结果可以作为初始值来进行相邻影像的解算,进而省略后方交会求解初始值的过程。

首先以某圆柱体进行模拟试验,该圆柱体的坐标系见图3,其底面半径为1 m,高为6 m。圆柱体上布设了11个控制点,其中下底面4个,上底面3个,圆柱面4个。模拟试验中摄站点距离目标物体约

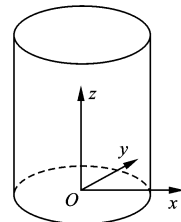


图3 模拟圆柱体及本体坐标系

1 km, 所采用的超长焦距模拟相机的焦距为 585 mm, 像元大小为 0.005 mm, 像幅大小为 1 000 × 800 像素, 因此影像分辨率约为 8.5 mm/像素.

分别对 3、4 和 5 个控制点进行模拟试验, 每组试验分别在改变姿态参数、像点中误差和控制点分布的情况下进行 20 次试验计算, 记录每次试验的理论值和计算值的差值, 统计得出该组试验的中误差. 要注意的是, 试验所选的控制点应避免处于同一个圆柱面上, 否则在利用角锥体做后方交会时无解.

由 3、4 和 5 个控制点的模拟试验统计得到的中误差分别如表 1~表 3 所示. 可以看出, 用本文方法计算得到的单位权中误差和人为加入的像点坐标中误差基本相等, 说明了算法的正确性. 在控制点数量相同的情况下, 计算结果的中误差随着像点误差的增大有规律地线性增大.

控制点的数量对未知数精度的影响也较大. 随着控制点的增加, 未知数计算结果的中误差相应减小. 以像点误差为 0.3 像素为例, 3 个控制点时旋转角 φ' 、 ω' 、 κ' 的中误差分别为 0.133°、0.076° 和 0.082°, 4 个控制点时分别为 0.079°、0.053° 和 0.052°, 而 5 个控制点时则减小到 0.061°、0.032° 和 0.044°. 试验结果还表明, 在测定过程中如果能观测到 5 个控制点, 测定结果就可以取得较好的精度, 由表 3 可以看到, 即使在像点误差为 1 像素时, 角元素的确定精度仍然可以达到 0.205°、0.110° 和 0.149°.

由于像点量测误差和控制点数量对计算结果的

精度都有影响, 对于精度要求确定的实际测量来说, 可根据情况灵活选择提高像点量测精度或增加控制点数量. 以本文的模拟试验为例, 若要保证旋转角中误差小于 0.1°, 3 个控制点时需保证像点量测误差优于 0.2 像素, 4 个控制点时优于 0.4 像素, 5 个控制点时只需 0.5 像素左右即可.

为了进一步验证所研究的理论和算法的正确性, 使用某一实际物体的一幅影像进行了试验, 在物体上均匀布设 13 个控制点, 并精确测量控制点在本体坐标系下的三维坐标及影像坐标系下对应的像点坐标. 摄站中心距离物体约 8 m, 所采用的相机焦距为 12.28 mm, 像元大小为 0.008 mm, 像幅大小为 1 024 × 768 像素, 因此影像地面分辨率约为 5 mm/像素, 影像方位元素通过其他手段获得且视为已知. 由所有 13 个控制点计算得到的目标物体姿态参数为

$$(\Delta x \ \Delta y \ \Delta z) = (13.420 \text{ m} \ 15.913 \text{ m} \ 22.201 \text{ m})$$
$$(\varphi' \ \omega' \ \kappa') = (91.628^\circ \ -65.778^\circ \ 128.894^\circ)$$

可以看出, 物体相对于物方坐标系的 3 个姿态角均为大值, 无法使用传统方法获得可靠的结果. 以 13 个控制点计算得到的目标物体姿态参数作为真值, 与不同控制点数量的计算结果求差值, 进而评价所能达到的精度, 统计结果见表 4.

由于实际试验的摄站中心与目标物体间的距离远小于模拟试验, 因此影像分辨率有一定提高. 相机焦距较模拟试验缩短了近 80 倍, 而焦距过长会引

表 1 3 个控制点的模拟试验结果

像点误差/像素	$\Delta x/\text{m}$	$\Delta y/\text{m}$	$\Delta z/\text{m}$	$\varphi'/(^{\circ})$	$\omega'/(^{\circ})$	$\kappa'/(^{\circ})$
0.1	0.121	0.059	0.043	0.043	0.023	0.027
0.3	0.366	0.168	0.145	0.133	0.076	0.082
0.5	0.611	0.272	0.215	0.227	0.127	0.137
1.0	1.206	0.537	0.471	0.443	0.254	0.285

表 2 4 个控制点的模拟试验结果

像点误差/像素	单位权中误差/像素	$\Delta x/\text{m}$	$\Delta y/\text{m}$	$\Delta z/\text{m}$	$\varphi'/(^{\circ})$	$\omega'/(^{\circ})$	$\kappa'/(^{\circ})$
0.1	0.121	0.113	0.045	0.036	0.026	0.017	0.019
0.3	0.282	0.298	0.136	0.108	0.079	0.053	0.052
0.5	0.471	0.501	0.226	0.195	0.132	0.081	0.085
1.0	1.194	1.001	0.454	0.392	0.265	0.171	0.170

表 3 5 个控制点的模拟试验结果

像点误差/像素	单位权中误差/像素	$\Delta x/\text{m}$	$\Delta y/\text{m}$	$\Delta z/\text{m}$	$\varphi'/(^{\circ})$	$\omega'/(^{\circ})$	$\kappa'/(^{\circ})$
0.1	0.106	0.048	0.029	0.019	0.023	0.010	0.014
0.3	0.266	0.145	0.067	0.052	0.061	0.032	0.044
0.5	0.494	0.240	0.119	0.095	0.102	0.050	0.077
1.0	0.951	0.486	0.230	0.191	0.205	0.110	0.149

表 4 实际数据试验的计算结果

控制点数	$\Delta x/\text{m}$	$\Delta y/\text{m}$	$\Delta z/\text{m}$	$\varphi'/(^{\circ})$	$\omega'/(^{\circ})$	$\kappa'/(^{\circ})$
3	-0.072	-0.020	-0.009	0.201	0.064	-0.400
4	0.006	0.001	-0.005	-0.028	0.053	0.030
5	0.007	0.000	-0.006	-0.053	0.042	0.003
6	0.007	0.002	-0.011	0.007	-0.013	0.047
7	0.003	-0.001	-0.005	-0.038	0.002	-0.021
8	0.003	0.000	-0.005	-0.039	-0.005	-0.024
9	0.004	0.001	-0.006	-0.028	-0.005	-0.005

起解算精度的迅速下降,因此焦距较短的实际试验的精度在理论上将有较大提高.使用 3 个控制点进行姿态测定时,没有多余观测且控制点分布较差,因而误差较大;使用 4 个控制点时姿态测定的精度迅速提高;使用更多控制点时除整体平差的可靠性提高并有利于粗差剔除外,姿态参数的测定精度没有明显提高.可以看出,使用不少于 4 个控制点进行姿态测定时,线元素 Δx 、 Δy 、 Δz 与 13 个控制点计算结果的差值优于 0.01 m,角元素 φ' 、 ω' 、 κ' 的差值则稳定在 0.05°左右,相对于模拟试验结果而言,实际数据试验的姿态参数尤其是平移参数 Δx 、 Δy 、 Δz 的精度有很大提高,这与理论分析非常吻合,进一步验证了空间物体姿态测定算法的正确性.

6 结束语

运动目标的姿态和轨迹监测是摄影测量研究的一个重要内容.本文主要针对基于单幅影像的目标姿态测定进行了研究和试验,通过物体表面控制点和对应影像点建立的共线方程迭代求取物体姿态参数.该方法避免了利用 2 台或多台摄像机进行运动目标姿态测定时的摄影同步问题,具有更大的灵活性和实用性.模拟和实际数据试验的结果验证了单幅影像求解空间目标姿态参数方法的有效性.试验结果还表明,摄站中心距离目标越远,相机的焦距越长,姿态测定的精度就越差.实际应用中可以根据实际情况和精度要求,灵活选择不同数量的控制点和合适焦距的相机进行空间目标的姿态测定.如何解决较远目标尤其是点目标的姿态测定问题,尚需要进一步研究.

参考文献:

[1] 张祖勋,苏国中,张剑清,等. 基于序列影像的飞机姿态跟踪测量方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2004, 29 (10): 8-12.
ZHANG Zuxun, SU Guozhong, ZHANG Jianqing, et al. Airplane pose measurement from image sequences

[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29 (10): 8-12.
[2] 袁修孝,余俊鹏. 高分辨率卫星遥感影像的姿态角常差检校[J]. 测绘学报, 2008, 37(1): 36-41.
YUAN Xiuxiao, YU Junpeng. Calibration of constant angular error for high resolution remotely sensed imagery [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2008, 37(1): 36-41.
[3] ROSENHAHN B. Three-dimensional shape knowledge for joint image segmentation and pose tracking [J]. International Journal of Computer Vision, 2007, 73(3): 243-262.
[4] DE MENTHON D, DURAISWAMI R, SAMET H. Simultaneous pose and correspondence determination [M]//Lecture Notes in Computer Science: 2352. Berlin, Germany: Springer, 2002: 698-714.
[5] WU Xuedong, WANG Yaonan. Pose and motion estimation from vision based on the first-order interpolation filter [J]. Chinese Journal of Electronics, 2004, 13(3): 526-531.
[6] 杨丽梅,郭立红,曹西征. 单站光测图像确定空间目标三维姿态方法综述[J]. 微计算机信息, 2006, 22(13): 186-188.
YANG Limei, GUO Lihong, CAO Xizheng. Summary of approach of determination of object's 3D pose from mono-view [J]. Microcomputer Information, 2006, 22(13): 186-188.
[7] COMPORTA I, MARCHAND E, CHAUMETTE F. Kinematic sets for real-time robust articulated object tracking [J]. Image and Vision Computing, 2007, 25 (3): 374-391.
[8] 冯文灏. 近景摄影测量[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.
[9] 李德仁,郑肇葆. 解析摄影测量学[M]. 北京: 测绘出版社, 1992.
[10] 张祖勋,张剑清. 数字摄影测量学[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1997.

(编辑 葛赵青)