

文章编号 1004-924X(2011)05-1054-07

基于差分法的空间相机像移速度矢量计算

王 运^{1,2*}, 颜昌翔¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:为了实现空间相机精密像移补偿,提出了一种基于差分法的空间相机像移速度矢量计算模型。首先,应用坐标变换建立空间相机对地成像模型,分析了空间相机在垂直摄影、侧摆摄影和前后摆摄影时,目标像点与成像面之间的相对运动情况。然后,根据目标像点在成像面上的匀速运动规律,提出对像点位置坐标进行差分计算求得像移速度矢量的方法。最后,对提出的方法与基于坐标变换的像移速度矢量计算方法进行了比较。结果表明,两种计算方法的相对误差在 0.1% 以内,验证了该方法的正确性。该方法避免了传统坐标变换法复杂的微分计算,提高了计算速度,亦可应用于同类遥感器的像移矢量计算中。

关键词:坐标变换;差分法;像移速度矢量;空间相机

中图分类号:V475.1;V447.3 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20111905.1054

Computation of image motion velocity vector for space camera based on difference method

WANG Yun^{1,2*}, YAN Chang-xiang¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

** Corresponding author, E-mail: qinghyun2007@163.com*

Abstract: A calculating model based on difference method was proposed to calculate the image motion velocity vector to compensate precisely the image motion of a space camera. Firstly, the earth imaging model was established by utilizing coordinate transformation, and the relative motion between the image point and the image plane was analyzed in vertical, roll and pitch attitudes according to the states of the image motion. Then, a method was proposed to calculate the image motion velocity vector according to the law of the relative motion between the image point and the image plane. Finally, the proposed method was compared with the coordinate transformation method. The result shows that the error between the two methods is within 0.1%, which proves the efficiency of this method. The proposed method overcomes the complex compulation from traditional methods and can be used in calculating the image motion velocity vectors for other space cameras.

Key words: coordinate transformation; difference method; image motion velocity vector; space camera

收稿日期:2010-07-05;修订日期:2010-08-12.

基金项目:国防预研基金资助项目(No. O5001SA050)

1 引言

空间遥感技术的发展对空间相机地面分辨率的要求越来越高。空间相机通常采用时间延迟积分 CCD(TDI-CCD)线阵推扫成像技术^[1],为获得清晰的目标图像,TDI-CCD 线阵移动方向须与目标像移方向一致,且 CCD 电荷转移速率还需与像移速度匹配,任何误匹配都将导致目标图像模糊,影响相机的成像质量,因此,必须采用像移补偿技术提高图像的质量。精密的像移补偿技术对实现空间相机高分辨率成像有着重要的意义,精确的像移速度矢量计算则是实现精密像移补偿的前提,也是航天相机关键技术之一^[2]。目前,像移速度矢量计算方法有基于矢量分解的像移速度矢量方法^[3]、基于动态光学的像移速度矢量方法^[4]、基于光学相关器的像移速度矢量方法^[5]以及基于坐标变换的像移速度矢量方法^[6]。基于矢量分解的像移速度矢量方法,计算简便,但忽略了多变量的耦合作用,结果不精确;基于光学相关器的像移速度矢量方法,利用傅里叶变换的位移特性,通过测量连续两帧遥感图像之间的平移参数计算像移速度矢量,其优点是不需要遥感器的轨道、姿态等参数,利用光学相关器完成傅里叶变换即可实现实时测量,但其结果受所摄目标图像内容的影响,目前还处于研究阶段;基于坐标变换的像移速度矢量方法^[5](以下简称坐标变换法),利用共线方程建立物点与像点之间的严格坐标关系,在坐标变换过程中耦合影响像移速度矢量计算的各个因素,可以获得精确的计算结果,因此该方法在空间相机像移补偿领域有着广泛的应用^[7-9]。

本文结合坐标变换法^[10]的优点,利用坐标变换方法建立空间相机对地成像模型,从分析目标像点与像面在各种摄影条件下的相对运动入手,找出目标像点在像面上的运动规律,提出了一种计算像移速度矢量的方法。该方法避免了坐标变换法繁琐的微分计算,简化了计算过程,提高了计算效率。

2 坐标变换法

坐标变换法先利用坐标变换建立起目标与像点之间的一一对应关系,即对地成像模型,然后通过地对地成像模型求得像点关于目标的像面位置坐标方程,将该方程对时间求微分后,即可得到像面上各点的像移速度矢量方程。

地对地成像模型是像移速度矢量计算的基础,其实质是通过将物空间物点坐标在不同坐标系之间的转换,最终求出物点的影像在像面坐标系中的位置。这种转换关系可分解为直角坐标系的平移、以原点为中心的缩放和绕原点的旋转等基本变换,因而这种转换关系具有一一映射的性质。空间相机星下点摄影时,像移速度矢量计算数学模型中包含 7 个坐标系^[2],分别为地理坐标系 $G(G_1, G_2, G_3)$ 、地球坐标系 $E(E_1, E_2, E_3)$ 、地心惯性坐标系 $I(I_1, I_2, I_3)$ 、轨道坐标系 $B(B_1, B_2, B_3)$ 、航天器坐标系 $S(S_1, S_2, S_3)$ 、相机坐标系 $C(C_1, C_2, C_3)$ 和像面坐标系 $P(P_1, P_2, P_3)$ 。当空间相机以其它姿态摄影时,只需在对应位置加入对应的姿态矩阵即可。星下点摄影时,各坐标系间的转换关系如图 1。

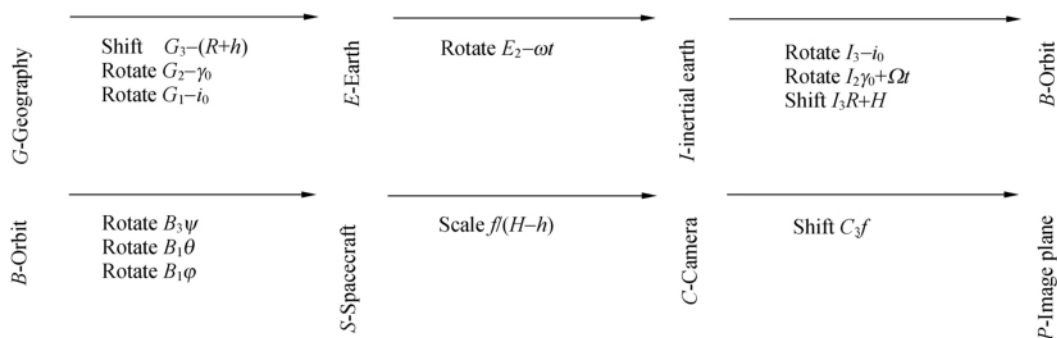


图 1 对地成像中主要坐标系间的变换关系

Fig. 1 Transformation relationships among main coordinates in earth imaging system

对于某一时刻,已知目标 G 的坐标,则其像点坐标 P 可以表达为^[10]:

$$P = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{f'}{H-h} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{f'}{H-h} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{f'}{H-h} & -f' \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -(R+H) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} \cos i_0 & -\sin i_0 & 0 & 0 \\ \sin i_0 & \cos i_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \omega t & 0 & \sin \omega t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \omega t & 0 & \cos \omega t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos i_0 & \sin i_0 & 0 & 0 \\ -\sin i_0 & \cos i_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} \cos \gamma_0 & 0 & \sin \gamma_0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \gamma_0 & 0 & \cos \gamma_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & R+h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = M_T \cdot G, \quad (1)$$

其中, M_T 为坐标变换矩阵, M_T 所涉及到的参数中, R 为相对于地心的地球半径; H 为航天器轨道高度; f' 为相机镜头焦距; h 为被摄目标处的地物地形高度; φ, θ, ψ 分别为航天器坐标系相对于轨道坐标系的横滚、俯仰和偏航姿态角; $\gamma = \gamma_0 + \omega t$, γ_0 为摄影时刻在轨道平面内航天器到降交点所对应的中心角, Ω 为航天器沿轨道绕地心转动的平均角速率; i_0 为轨道倾角; ω 为地球自转角速率。

同理,已知某一时刻像点坐标 P ,也可以求得其对应目标的坐标 G :

$$G = M_T^{-1} P. \quad (2)$$

将式(1)两边对时间 t 微分后,令 $t=0$ 即可得到像面上像点 P 的像移方程:

$$\begin{bmatrix} dP_1/dt \\ dP_2/dt \\ dP_3/dt \\ 0 \end{bmatrix}_{t=0} = \frac{dP}{dt} \Big|_{t=0} = \begin{bmatrix} V_{p_1} \\ V_{p_2} \\ V_{p_3} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 v_{p_1}, v_{p_2} 分别为相机像面的前向像移速度和横向像移速度,最终得到像移速度主向量值 v_p 和偏流角 β :

$$v_p = \sqrt{v_{p_1}^2 + v_{p_2}^2}, \quad (4)$$

$$\beta = \arctan \frac{v_{p_2}}{v_{p_1}}. \quad (5)$$

坐标变换法综合了影响像移速度矢量计算的全部参量,可以对空间相机进行高精度的像移补偿。

3 差分法求解像移速度矢量

文献[2]给出了空间相机星下点摄影时 v_{p_1} , v_{p_2} 的详细表达式以及简化公式,可以看出通过微分法求解像移公式十分复杂。空间相机在摄影过程中通常要进行侧摆或前后摆,或侧摆和前后摆组合来扩大观测范围,此时要在坐标变换矩阵 M_T 中增加描述相机摄影条件的参量,相机对地成像模型将更为复杂,直接对式(1)两边求微分能得到正确的解,但微分过程十分繁琐,且求出的表达式也很复杂。因此,需要寻找一种简单的求解像移速度矢量方法。

空间相机在成像过程中,始终处于运动状态,在一定的曝光时间内,被摄目标与像面之间存在的相对运动,称之为像移。

为了解像移的特性,首先需要知道像点在像

面上的相对运动规律,通过对地成像模型,利用目标与像点的一一对应关系,可以求得像点运动前后在像面上的坐标值,并找出两者之间的相互关系。

由对地成像模型可以求出同一目标在经过时间 Δt 后在像面上的坐标, Δt 要足够短。在时间 Δt 后,地面目标的地理坐标是不变的,目标随地球自转了一个角度 $\omega\Delta t$, 航天器绕轨道进动与降交点夹角 γ 也随时间变化了 $\Omega\Delta t$, 这里忽略三轴姿态角的变化。由此,将通过仿真来分析像点运动后的坐标位置与时间 Δt 的关系。

这里从空间相机星下点摄影、前后视摄影和侧摆摄影 3 个方面来分析像点在像面上的运动情况。为了便于说明问题,假定地球为球体,地球半径 $R=6\,374\text{ km}$; 地球自转角速率 $\omega=7.29\times 10^{-5}$; 航天器运行轨道为圆轨道,轨道倾角 $i_0=98.5^\circ$; 轨道高度 $H=400\text{ km}$; 相机焦距 $f=1\,000\text{ mm}$; 像平面尺寸 $20\text{ mm}\times 200\text{ mm}$; 地物地形高度 $h=0$ 。

取像面上的 5 个特征点,即像面 4 个角点和像面中心点,代表性地分析整个像面像点的运动

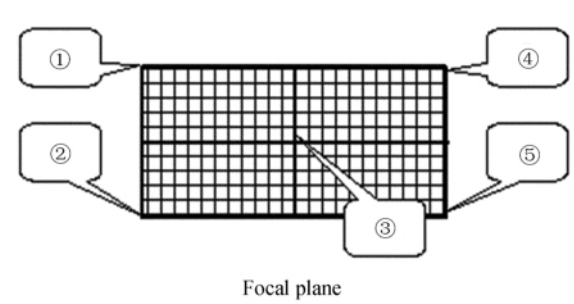


图 2 相机像面特征点分布示意图

Fig. 2 Feature points in focal plane

情况,5 个特征点分布如图 2。

计算步骤为:首先,在 t_0 时刻,根据式(2)计算出像面上 5 个特征点对应目标的地理坐标,然后利用式(1)计算出在 $t_0+\Delta t$ 时刻,目标像点运动后的坐标。图 3,4,5 为特征点在像平面上的运动量与时间 Δt 的关系曲线,纵坐标为特征点相对于 t_0 时刻像点坐标的前向运动量,横坐标为特征点相对于 t_0 时刻像点坐标的横向运动量。表 1, 2,3 为对应的仿真数据。参考实际快门速度,时间间隔取 0.5 ms ,时间总长为 2.5 ms 。

表 1 星下点摄影像移计算
Tab. 1 Image motion calculation in vertical attitude

| time /ms | Feature point ① | | Feature point ② | | Feature point ③ | | Feature point ④ | | Feature point ⑤ | |
|-------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| | Δp_1 | Δp_2 | Δp_1 | Δp_2 | Δp_1 | Δp_2 | Δp_1 | Δp_2 | Δp_1 | Δp_2 |
| 0.0 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.000 0 |
| 0.2 | 2.621 3 | -0.164 4 | 2.621 3 | -0.163 8 | 2.623 2 | -0.164 4 | 2.621 6 | -0.163 8 | 2.621 6 | -0.164 5 |
| 0.4 | 5.242 6 | -0.328 8 | 5.242 6 | -0.327 6 | 5.246 4 | -0.328 9 | 5.243 2 | -0.327 6 | 5.243 3 | -0.328 9 |
| 0.6 | 7.864 0 | -0.493 3 | 7.863 8 | -0.491 5 | 7.869 6 | -0.493 3 | 7.864 8 | -0.491 4 | 7.864 9 | -0.493 4 |
| 0.8 | 10.485 3 | -0.657 7 | 10.485 1 | -0.655 3 | 10.492 8 | -0.657 7 | 10.486 4 | -0.655 2 | 10.486 6 | -0.657 8 |
| 1.0 | 13.106 6 | -0.822 1 | 13.106 4 | -0.819 1 | 13.116 0 | -0.822 1 | 13.108 0 | -0.818 9 | 13.108 2 | -0.822 3 |

表 2 前摆摄影像移计算
Tab. 2 Image motion calculation in pitch attitude

| time /ms | Feature point ① | | Feature point ② | | Feature point ③ | | Feature point ④ | | Feature point ⑤ | |
|-------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| | Δp_1 | Δp_2 | Δp_1 | Δp_2 | Δp_1 | Δp_2 | Δp_1 | Δp_2 | Δp_1 | Δp_2 |
| 0.0 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.000 0 |
| 0.2 | 2.409 1 | -0.253 6 | 2.449 0 | -0.255 1 | 2.430 6 | -0.158 1 | 2.408 7 | -0.060 7 | 2.448 7 | -0.061 9 |
| 0.4 | 4.818 3 | -0.507 3 | 4.898 1 | -0.510 1 | 4.861 2 | -0.316 3 | 4.817 3 | -0.121 5 | 4.897 3 | -0.123 8 |
| 0.6 | 7.227 4 | -0.760 9 | 7.347 1 | -0.765 2 | 7.291 8 | -0.474 4 | 7.226 0 | -0.182 2 | 7.346 0 | -0.185 7 |
| 0.8 | 9.636 6 | -1.014 5 | 9.796 2 | -1.020 3 | 9.722 4 | -0.632 6 | 9.634 7 | -0.242 9 | 9.794 6 | -0.247 6 |
| 1.0 | 12.045 7 | -1.268 2 | 12.245 2 | -1.275 3 | 12.153 0 | -0.790 7 | 12.043 4 | -0.303 7 | 12.243 3 | -0.309 5 |

表 3 侧摆摄影像移计算

Tab. 3 Image motion calculation in roll attitude

| time /ms | Feature point ① | | Feature point ② | | Feature point ③ | | Feature point ④ | | Feature point ⑤ | |
|-------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| | Δp_1 | Δp_2 | Δp_1 | Δp_2 | Δp_1 | Δp_2 | Δp_1 | Δp_2 | Δp_1 | Δp_2 |
| 0.0 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.000 0 |
| 0.2 | 2.425 0 | -0.140 6 | 2.423 8 | -0.138 9 | 2.527 4 | -0.152 4 | 2.627 2 | -0.165 1 | 2.626 0 | -0.164 5 |
| 0.4 | 4.850 0 | -0.281 3 | 4.847 6 | -0.277 8 | 5.054 9 | -0.304 7 | 5.254 3 | -0.330 1 | 5.251 9 | -0.329 1 |
| 0.6 | 7.275 0 | -0.421 9 | 7.271 4 | -0.416 6 | 7.582 3 | -0.457 1 | 7.881 5 | -0.495 2 | 7.877 9 | -0.493 6 |
| 0.8 | 9.700 0 | -0.562 6 | 9.695 2 | -0.555 5 | 10.109 7 | -0.609 4 | 10.508 7 | -0.660 3 | 10.503 8 | -0.658 1 |
| 1.0 | 12.125 0 | -0.703 2 | 12.119 0 | -0.694 4 | 12.637 2 | -0.761 8 | 13.135 9 | -0.825 3 | 13.129 8 | -0.822 6 |

图 3,4,5 中,像点在像面上做直线运动,且相同时间内像点的运动量相等,说明了在星下点、前后视和斜视 3 种摄影方式下,各特征点像移量与时间 Δt 呈线性关系,即特征点在像面上做匀速直线运动。图 3 显示了在星下点摄影时,特征点在像面运动轨迹基本一致,与实际情况是相符的。图 4、图 5 中,特征点在像面的运动轨迹不重合是由于相机在前摆摄影和侧摆摄影时,相机对地摄影面积变大,特征点对应的地面目标地理坐标差异较大造成的。这样,像点在像面上的运动可以通过下式来表示:

$$P_{\Delta t} = P_0 + v\Delta t,$$
 (6)

式中 P_0 为 t_0 时刻的像点坐标, $P_{\Delta t}$ 为时间 Δt 后的像点坐标, v 为像点运动速度矢量。

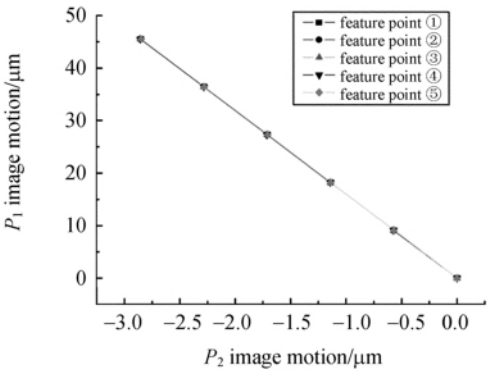


图 3 垂直摄影像移示意图

Fig. 3 Sketch of image motions in vertical attitude

通过上述分析,由于像点运动量与时间的线性关系,在时间充分短的情况下,空间相机像移速度矢量可以由像点像移量除以时间求 Δt 得到。实际计算过程中,时间 Δt 可以参考曝光时间来选取,即某一时刻 t_0 ,地上一物点 G 经过相机成像,对应像点的坐标为 (p_1, p_2) ,经过时间 Δt 后,目标

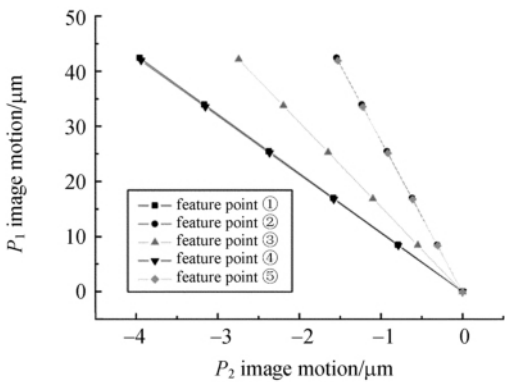


图 4 前摆摄影像移示意图

Fig. 4 Sketch of image motion in pitch attitude

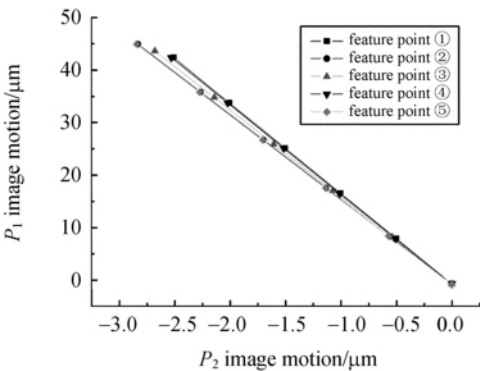


图 5 侧摆摄影像移示意图

Fig. 5 Sketch of image motion in roll attitude

G 在像平面上的像点运动到 (p_1', p_2') 位置处,根据像点位置的差分,即可求得前向像移速度和横向像移速度,最终得到像移速度主向量值和偏流角。差分法表达式为:

$$v_{p_1} = \frac{p_1' - p_1}{\Delta t},$$
 (7)

$$v_{p_2} = \frac{p_2' - p_2}{\Delta t}.$$
 (8)

将式(7)、(8)代入式(4)、(5)即可求得像移速

度主向量值和偏流角的表达式。

4 方法比较

为了验证本文提出方法的正确性,将差分法像移速度矢量计算方法与坐标变化法进行比较。地球半径 $R=6\,374\text{ km}$;地球自转角速率 $\omega=7.29\times10^{-5}$;航天器运行轨道为圆轨道,轨道倾角 $i_0=98.5^\circ$;轨道高度 $H=400\text{ km}$;相机焦距 $f=1\,000\text{ mm}$;像平面尺寸 $20\text{ mm}\times200\text{ mm}$;地物地形高度 $h=0$ 。

相机斜视成像,前摆 7.5° ,侧摆 7.5° ,两种方法的计算结果如表 4。

由表 4 可知,本文方法与坐标变换法所计算结果相对误差在 0.1% 以内,两种方法计算结果保持了较好的一致性,完全满足像移补偿的精度要求,证明了该方法的正确性。

通过坐标变换建立相机对地成像模型,应用差分法可得到相机的像移速度矢量的计算表达式,用数学软件可以很容易实现推导过程,不需要对表达式进行微分,简化了计算过程。另外,给出像移计算的各个参量的测量或估计误差,应用蒙特卡罗法(统计试验法)可以对影响像移速度矢量计算的各参数误差进行误差综合,得出各参数的误差对整体估计误差的影响大小,为像移补偿的整体误差的分配提供依据。

表 4 计算结果比较
Tab. 4 Results of two methods

| feature points | Coordinate transformation algorithm | | | | Difference algorithm | | | |
|-------------------|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------|
| | velocity | velocity | velocity | drift angle | velocity | velocity | velocity | drift angle |
| | $/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$ | $/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$ | $/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$ | $/(^{\circ})$ | $/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$ | $/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$ | $/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$ | $/(^{\circ})$ |
| ① | 17.390 0 | -0.811 7 | 17.409 0 | -2.672 4 | 17.379 4 | -0.811 8 | 17.398 4 | -2.674 4 |
| ② | 17.896 7 | -1.378 9 | 17.949 7 | -4.405 9 | 17.885 5 | -1.373 7 | 17.938 2 | -4.392 1 |
| ③ | 17.691 6 | -1.093 3 | 17.725 4 | -3.536 2 | 17.691 6 | -1.093 3 | 17.725 4 | -3.536 2 |
| ④ | 17.495 5 | -0.822 4 | 17.514 8 | -2.691 2 | 17.484 4 | -0.819 3 | 17.503 6 | -2.682 7 |
| ⑤ | 18.002 6 | -1.378 0 | 18.055 3 | -4.377 0 | 17.991 5 | -1.378 1 | 18.044 2 | -4.380 2 |

5 结 论

利用空间相机对地成像模型分析了各种摄影条件下目标像点在像面上的运动情况,总结出目标像点在像面上匀速运动的规律。根据这一规律,研究人员可以更直观地理解空间相机像移的原理。提出利用差分的方法计算像移速度矢量,该方法无需通过微分方法来计算,简化了像移速

度计算过程。基于差分法的计算结果与坐标变换法的计算结果相对误差在 0.1% 以内,证明了该方法的正确性。该方法的数学模型是通过坐标变换法建立的,因此与坐标变换法一样能够耦合影响像移速度矢量计算的各种因素,实现像移速度矢量的精确计算。该方法可以作为空间相机像移补偿一种补充计算方法,也可以推广到其它类似遥感器的像移速度矢量计算中。

参考文献:

[1] 赵贵军,陈长征,万志,等. 推扫型 TDICCD 光学遥感器动态成像研究[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(2):291-296.
ZHAO G J, CHEN CH ZH, WAN ZH, *et al.*. Study on dynamic imaging on push-broom TDI CCD optical remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2):291-296. (in Chinese)

[2] 王家骥,于平,颜昌翔,等. 航天光学遥感器像移速

度矢计算数学模型[J]. 光学学报, 2004, 24(12): 1585-1589.
WANG J Q, YU P, YAN CH X, *et al.*. Space optical remote sensor image motion velocity vector computational modeling [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(12):1585-1589. (in Chinese)

[3] 袁孝康. 星载 TDI-CCD 推扫相机的偏流角计算与补偿[J]. 上海航天, 2006, 23(6):10-13.
YUAN X K. Calculation and compensation for the deviant angle of satellite borne TDI-CCD push scan

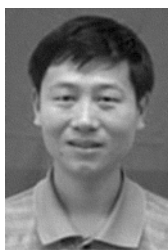
- camera[J]. *Aerospace of ShangHai*, 2006, 23(6): 10-13. (in Chinese)
- [4] 周庆才, 王志坚. 应用动态物像矢量共轭关系计算航天相机像移[J]. *空间科学学报*, 2003, 23(1): 74-79.
ZHOU Q C, WANG ZH J. Calculating image motion of aerospace camera based on dynamic object-image conjugate relation[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2003, 23(1): 74-79. (in Chinese)
- [5] 葛任伟, 吴清文, 王运, 等. 联合变换相关器像移测量试验系统设计[J]. *中国光学与应用光学*, 2008, 2(3): 218-224.
GE R W, WU Q W, WANG Y, *et al.*. Design of test system for image motion measurement based on joint transform correlation[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2008, 2(3): 218-224. (in Chinese)
- [6] 颜昌翔, 王家骥. 航相机像移补偿计算的坐标变换方法[J]. *光学 精密工程*, 2000, 8(3): 203-207.
YAN CH X, WANG J Q. Method of coordinate transformation for IM & IMC calculation in aerospace camera system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(3): 203-207. (in Chinese)
- [7] 郭强, 张晓虎. 地球同步轨道二维扫描像移补偿技术建模与分析[J]. *光学学报*, 2007, 27(10): 1779-1787.
GUO Q, ZHANG X H. Image shift compensation Modeling and analysis for two-dimensional scanning on geostationary orbit[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(10): 1779-1787. (in Chinese)
- [8] 闫得杰, 徐抒岩, 韩诚山. 飞行器姿态对空间相机像移补偿的影响[J]. *光学 精密工程*, 2008(11): 2199-2203.
YAN D J, XU SH Y, HAN CH SH. Effect of aircraft attitude on image motion compensation of space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2199-2203. (in Chinese)
- [9] 闫得杰, 韩诚山, 李伟雄. 飞行器侧摆和前后摆及控制误差的优化设计[J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(9): 2223-2229.
YAN D J, HAN CH SH, L W X. Optimization design of scroll and pitch and their control errors on aircraft[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9): 2223-2229. (in Chinese)
- [10] 王家骥. 光学仪器总体设计[M]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所教材, 2003.
WANG J Q. *Optical Instrument Collectivity Design*[M]. Changchun: Teaching Material of Department of Graduate of Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2003. (in Chinese)

作者简介:



王 运(1984—), 男, 湖北洪湖人, 博士研究生, 2006 年于长春理工大学获得学士学位, 主要从事遥感图像处理、像移补偿方面的研究。E-mail: qin-ghyun2007@163.com

导师简介:



颜昌翔(1973—), 男, 湖北洪湖人, 博士, 研究员, 2001 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得工学博士学位, 主要从事空间光学遥感技术方面的研究。E-mail: yanxc@ciomp.ac.cn