基于星图匹配的小视场空间图像畸变校正

张 淳 秦世引 赵丹培 刘尊言

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院，北京 100191) (北京航空航天大学 宇航学院，北京 100191)

摘 要：小视场星载相机受发射振动和空间环境等影响，会使所拍摄的空间图像产生畸变，并且畸变模型和参数也时有变化. 针对小视场空间图像所含恒星点相当稀少的特点，提出一种基于 Hausdorff 距离多帧星图匹配的空间图像畸变校正方法，利用恒星点作为控制点实现畸变参数的计算. 针对卫星姿态漂移所造成的相机光轴指向系统误差对校正的影响，给出一种自适应补偿方法. 仿真实验结果表明，该方法计算量小、精度高，能够有效抑制图像噪声和输入误差的影响.

关 键 词：图像处理；光学畸变；星载相机；星图匹配

中图分类号：TP 391.41

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2008)09-1016-04

Distortion correction for small-field space image based on star map matching

Zhang Chun Qin Shiyin

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Zhao Danpei Liu Zunyan

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Due to the impacts from launching vibrations and complex space environment, it is inevitable to generate some distortions in images by the small-field space imaging, moreover, the distortion model and parameters may also change sometimes. In fact, there would be a few or a sparse stars in a single small-field space image, thus a kind of distortion correction method for space image was presented based on multi-frame star maps matching with Hausdorff distance. The distortion parameters were calculated by considering the stars as control points. Furthermore, the self-adaptation compensation method was given to remove the error from camera optical axis pointing system because of satellite attitude drift. Simulation experiment results show that the proposed correction method is characterized with small calculation quantity and high precision, so as to decrease the influence of image noise and input error efficiently.

Key words: image processing; optical distortion; aerial photography; star map matching

星载相机虽然在地面可以进行精确的标定，但由于其焦距长、分辨率高、作用距离远、通光口径较大和光学零件尺寸比较大等特点，容易受空间和相机内部环境的影响. 卫星内部发热和外部吸收的热辐射会使光学元件发生变形. 另外，卫星发射时的惯性力和冲击振动也会给光学元件带来影响[1]. 所以，星载相机所拍摄的空间图像会产生畸变，并且畸变模型、参数仍有可能发生变化. 若不考虑这些因素，会对后续图像处理工作带来不利影响. 本文旨在对小视场星载相机拍摄的多帧空间图像利用 Hausdorff 距离(HD, Hausdorff Distance)星图匹配方法，将恒星点作为特征点，实现畸变图像的几何校正. 并且对可能产生校正误差的原因进行分析，给出了一种自适应补偿卫

收稿日期：2007-08-07

作者简介：张 淳(1984—)，男，天津人，博士生，zhangchun@asee.buaa.edu.cn.

星姿态漂移造成的相机光轴指向系统误差对校正影响的方法.

1　基于 HD 的多帧图像星图匹配

HD 星图匹配方法[2]抗噪能力强,即使图像中星点被遮掩或退化,该方法仍能得到较好的匹配结果.

恒星星表为记载恒星各种参数(如位置、运动、星等、光谱型等)的表册.根据相机参数(光轴指向、旋转角、视场大小等)搜索星表,找到理论上应该落入视场的恒星,再利用式(1)将恒星从天球坐标转换为图像坐标[3],即得到理想图像控制点坐标,称之为理论坐标:

$$\left.\begin{aligned} X &= \frac{N_x}{2}\frac{1}{\tan(V_x/2)}\cdot \\ &\quad \frac{\cos\delta\sin(\alpha-\alpha_0)}{\sin\delta\sin\delta_0+\cos\delta\cos\delta_0\cos(\alpha-\alpha_0)} \\ Y &= \frac{N_y}{2}\frac{1}{\tan(V_y/2)}\cdot \\ &\quad \frac{\sin\delta\cos\delta_0-\cos\delta\sin\delta_0\cos(\alpha-\alpha_0)}{\sin\delta\sin\delta_0+\cos\delta\cos\delta_0\cos(\alpha-\alpha_0)} \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

其中,(X,Y)为恒星图像坐标;(N_x,N_y)为图像横纵方向分辨率;(V_x,V_y)为相机横纵方向视场角;(α_0,δ_0)为相机主轴指向;(α,δ)为恒星天球坐标.提取实拍图像中恒星光斑部分,并分别求取重心,得到实际拍摄图像控制点坐标,即实际坐标.

若相机视场角较小,则拍摄图像中星点较少.针对这种情况,本文提出一种多帧星图匹配方法:首先分别取多帧图像中星点的实际坐标,得到实际坐标数组.然后对每帧图像根据其相机参数计算落入视场中恒星的理论坐标,记入理论坐标数组.将所得到的两数组进行 HD 星图匹配,匹配成功点对即作为控制点对.

HD 经常利用点的距离描述两幅图的相似程度[4],这里通过点间距描述两个点的相似程度,假设 $A=\{A_1,A_2,\cdots,A_p\}$ 和 $B=\{B_1,B_2,\cdots,B_q\}$ 分别为理想坐标数组和实际坐标数组.首先,对 A 中点 A_i 用其到 A 中其它点的距离表征:

$$A_i=\{d_{A_{ik}}\mid k=1,2,\cdots,p,k\neq i\}\quad i=1,2,\cdots,p \quad (2)$$

式中,$d_{A_{ik}}$ 为 A_i 到点 A_k 的欧氏距离.

同样可得数组 B 中点的表征方法.再按式(3)、式(4)产生一个 $p\times q$ 的矩阵 $\boldsymbol{H}$ 表示 A 中点 A_i 和 B 中点 B_j 的 HD:

$$\left.\begin{aligned} h(A_i,B_j)&=\max_{a_{ik}\in A_i}\min_{b_{jl}\in B_j}\|a_{ik}-b_{jl}\| \\ h(B_j,A_i)&=\max_{b_{jl}\in B_j}\min_{a_{ik}\in A_i}\|b_{jl}-a_{ik}\| \end{aligned}\right\} \quad (3)$$

$$\boldsymbol{H}(i,j)=\max\{h(A_i,B_j),h(B_j,A_i)\} \quad (4)$$

最后,搜索 $\boldsymbol{H}$ 找出 HD 较小的值,其对应 A 和 B 中的点即为控制点对.

2　基于恒星控制点的畸变图像校正

图 1 给出了 3 种可选的校正方法流程图,流程 1 为:①读入多帧空间图像;②对图像去噪[5]后通过小目标检测提取恒星光斑部分;③计算图像中每颗星的面积及位置,并通过设定面积双阈值进一步去除孤立噪声点和其它大目标的影响;④利用重心法或高斯曲面法[6]等计算各恒星在图像中的精确坐标,即每颗恒星的实际坐标;⑤为了提高星图匹配成功率,对实际坐标数组利用相机在地面测定的畸变模型和参数进行校正,称之为预校正,使其更接近无畸变的坐标;⑥利用多帧图像 HD 星图匹配方法得到与各星点预校正后坐标相对应的理论坐标,进而将各星点实际坐标与理论坐标建立一一对应关系;⑦由于星载相机造成图像畸变的成因复杂,故采用三阶多项式拟合方法进行校正,可以避免畸变模型不准确造成的校正误差.将实际坐标数组和理论坐标数组代入拟合公式,并通过最小二乘法计算式中各参数;⑧对经过以上步骤得到的校正参数保存为文件;⑨通

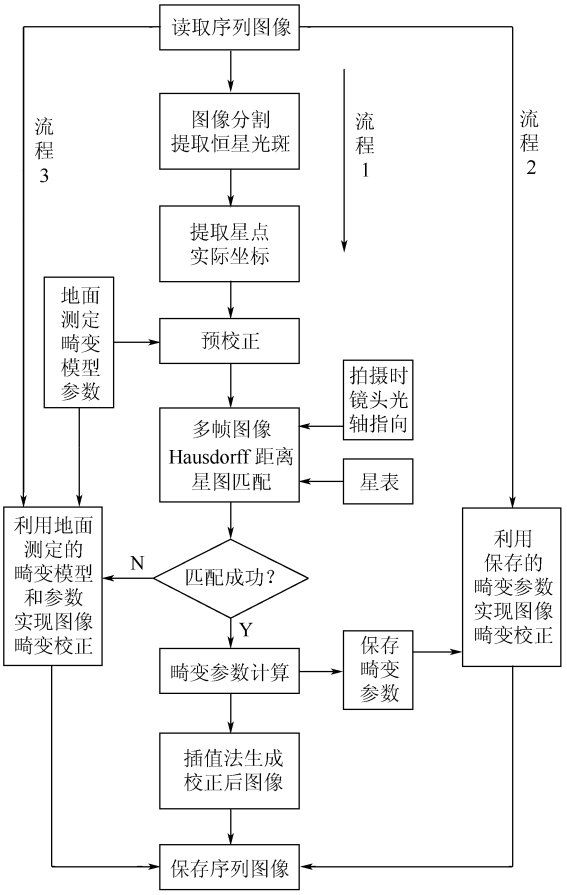


图 1　校正算法的整体流程

过插值法逐帧得到校正后的图像.

由于在太空中相机内外参数不再会有剧烈变化,所以通过流程1所保存的参数可以用于同一相机以后拍摄图像的校正,即流程2,直至认为需要再次通过流程1更新校正参数.当由于星点过少等原因无法通过流程1得到满意的校正图像时,可利用相机在地面的标定结果对图像进行校正,即流程3,以降低图像的畸变程度.

3 系统误差估计与自适应补偿

相机光轴指向、星表以及图像中星点实际坐标提取等方面均存在误差,会给校正带来影响.对于图像星点提取和星表误差补偿,目前研究较为成熟[7-8],在此不作讨论.

光轴指向误差主要源于卫星自身姿态误差和相机转台转角误差的累加,而前者为主要因素.当卫星姿态误差主要为漂移[9]造成的系统误差时,可认为短时间内所拍摄的序列图像光轴指向误差基本相同.针对多帧图像光轴指向误差较小且基本相同的情况,提出补偿方法如下.由式(1)可推知,当 α_0,δ_0 误差较小时,图像偏差不能忽略,但可以近似认为:赤经误差仅造成 X 方向偏差,赤纬误差仅造成 Y 方向偏差,且二者对图像的影响方式均为造成图像整体平移.

图像准确的畸变模型可表示为

$$\left.\begin{aligned} X_{\mathrm{d}} &= X_{\mathrm{d}}(X_{\mathrm{u}},Y_{\mathrm{u}}) \\ Y_{\mathrm{d}} &= Y_{\mathrm{d}}(X_{\mathrm{u}},Y_{\mathrm{u}}) \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

其中,$(X_{\mathrm{d}},Y_{\mathrm{d}})$、$(X_{\mathrm{u}},Y_{\mathrm{u}})$分别为校正前、校正后图像某点坐标,由于输入信息等方面的误差,仅能够得到带有误差的畸变模型估计式,表示为

$$\left.\begin{aligned} \hat{X}_{\mathrm{d}} &= \hat{X}_{\mathrm{d}}(X_{\mathrm{u}},Y_{\mathrm{u}}) \\ \hat{Y}_{\mathrm{d}} &= \hat{Y}_{\mathrm{d}}(X_{\mathrm{u}},Y_{\mathrm{u}}) \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

其中,$(\hat{X}_{\mathrm{d}},\hat{Y}_{\mathrm{d}})$为$(X_{\mathrm{d}},Y_{\mathrm{d}})$的估计值.

当校正误差主要由光轴指向系统误差$(e_{\alpha_0},e_{\delta_0})$造成时,由于$(e_{\alpha_0},e_{\delta_0})$对校正图像的影响为整体平移,所以存在不随$(X_{\mathrm{u}},Y_{\mathrm{u}})$变化的常数误差量$(\varepsilon_x,\varepsilon_y)$使式(6)可写为式(7)的形式:

$$\left.\begin{aligned} \hat{X}_{\mathrm{d}} &= X_{\mathrm{d}}(X_{\mathrm{u}},Y_{\mathrm{u}})+\varepsilon_x \\ \hat{Y}_{\mathrm{d}} &= Y_{\mathrm{d}}(X_{\mathrm{u}},Y_{\mathrm{u}})+\varepsilon_y \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

设(X_0,Y_0)为图像畸变中心,当 $X_{\mathrm{d}}=X_0,Y_{\mathrm{d}}=Y_0$ 时,有 $X_{\mathrm{u}}=X_0,Y_{\mathrm{u}}=Y_0$[10],代入式(7)即可求得误差量的估计值:

$$\left.\begin{aligned} \hat{\varepsilon}_x &= \hat{X}_{\mathrm{d}}(X_0,Y_0)-X_0 \\ \hat{\varepsilon}_y &= \hat{Y}_{\mathrm{d}}(X_0,Y_0)-Y_0 \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

其中,$(\hat{\varepsilon}_x,\hat{\varepsilon}_y)$为$(\varepsilon_x,\varepsilon_y)$的估计值.

基于误差量的估计,可以对式(6)进行误差补偿,联立式(5)~式(8)可得

$$\left.\begin{aligned} X_{\mathrm{d}} &= \hat{X}_{\mathrm{d}}(X_{\mathrm{u}},Y_{\mathrm{u}})-\hat{X}_{\mathrm{d}}(X_0,Y_0)+X_0 \\ Y_{\mathrm{d}} &= \hat{Y}_{\mathrm{d}}(X_{\mathrm{u}},Y_{\mathrm{u}})-\hat{Y}_{\mathrm{d}}(X_0,Y_0)+Y_0 \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

式(9)即为经过误差补偿的畸变校正模型.

在利用插值方法生成校正后图像时,用式(9)代替式(6)进行计算,可以自适应补偿由于光轴指向输入不准确对图像校正的误差影响.

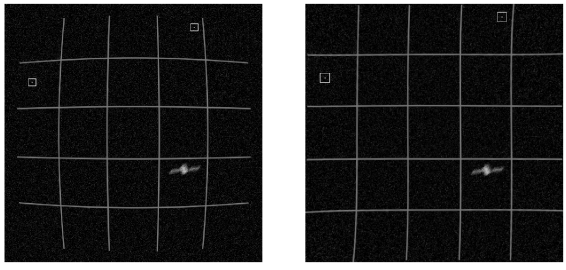
光轴指向误差可由式(1)求解偏微分方程并代入式(10)进行估算:

$$\left.\begin{aligned} e_{\alpha_0} &= \frac{\varepsilon_x}{\dfrac{\partial X}{\partial \alpha_0}\dfrac{1^\circ}{60}\dfrac{\pi}{180^\circ}} \\ e_{\delta_0} &= \frac{\varepsilon_y}{\dfrac{\partial Y}{\partial \delta_0}\dfrac{1^\circ}{60}\dfrac{\pi}{180^\circ}} \end{aligned}\right\} \tag{10}$$

可给出卫星姿态漂移量的参考值,有助于卫星惯导系统的误差校正.

4 仿真实例与比较分析

仿真实验所使用的空间图像为512像素×512像素,视场角为2°×2°,最大敏感星等为6.5等级,假设图像中存在均值为0、方差为0.01的高斯噪声和卫星等干扰,图2a为多帧存在多种畸变的模拟空间图像中的一帧.为了便于观察,图像上添加了与自身畸变程度相同的网格,并且图中的星点用方框标出.



a 校正前图像 b 校正后图像

图2 校正前后图像对比

令(X_{si},Y_{si})、$(X_{\mathrm{d}i},Y_{\mathrm{d}i})$分别为标准和存在畸变空间图像上第 i 个星点的重心坐标,计算图像的相对误差为

$$E_{\mathrm{r}}=\frac{\sum\limits_i\sqrt{(X_{si}-X_{\mathrm{d}i})^2+(Y_{si}-Y_{\mathrm{d}i})^2}}{\sum\limits_i\sqrt{X_{si}^2+Y_{si}^2}}100\% \tag{11}$$

得到校正前图像相对误差为 7.16%;当输入的光轴指向参数准确时校正后相对误差为 0.54%,误差降低了 92.5%.

当输入的光轴指向参数赤经、赤纬各存在 2′ 的系统误差时,由式(11)可知,当未考虑误差补偿时,校正后图像的相对误差为 6.42%;误差补偿后,校正后图像相对误差为 1.05%,与未校正图像和未考虑误差补偿情况时校正后图像相比误差分别降低了 85.3%和 83.6%,图像畸变程度下降显著,校正效果明显.图 2b 为光轴指向(α_0,δ_0)分别存在 2′系统误差时,利用本文方法进行校正和误差补偿后的多帧图像中的一帧.从图 2 可以看出,校正后图像不再存在明显畸变.

图 3 给出了实验结果仿真图.由图 3 可知,当存在输入误差时,若不考虑误差补偿,则各星点与无畸变情况相差较大,不能满足精度要求;加入误差补偿后,校正后图像与标准图像间的偏差明显减小,校正效果良好.

由式(10)可算得,光轴指向误差(e_{α_0},e_{δ_0})的估计值为(2.083 6′,2.100 2′),与准确值(2′,2′)基本相同.在实现空间图像校正的同时,可以对卫星本身姿态漂移的校正提供有利的帮助.

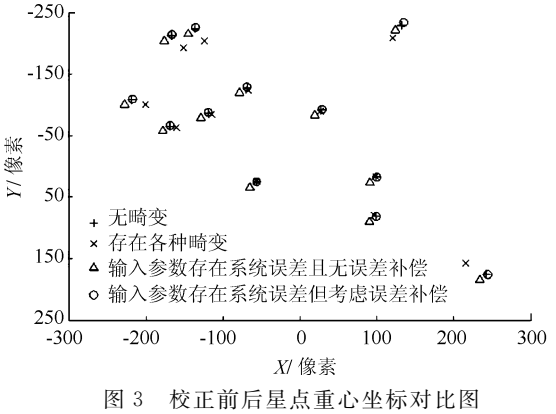


图 3　校正前后星点重心坐标对比图

5　结　论

本文针对小视场星载相机所拍摄的空间图像畸变校正问题,提出了一种利用图像星空背景中的恒星,通过多帧图像星图匹配将星点作为参考点,实现图像畸变校正的方法.同时,本文分析了可能造成校正误差的影响因素,并给出了一种针对由卫星姿态漂移引起的光轴指向系统误差对校正所带来的影响的自适应补偿方法.仿真实验表明,本文方法运算量小、图像校正效果明显,并能够有效抑制图像噪声以及输入的光轴指向参数系统误差给校正所带来的影响.

参考文献(References)

[1] 张志伟,马骏,俞信.微小型自适应光学系统及其在星载光学遥感器上的应用[J].红外与激光工程,2000,29(1):49－52
Zhang Zhiwei, Ma Jun, Yu Xin. Micro adaptive optics and its application in air-brone optical remote sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2000, 29(1): 49－52(in Chinese)

[2] 全伟,王广君,房建成.一种基于 Hausdorff 距离的改进星图识别方法[J].北京航空航天大学学报,2006,32(1):8－12
Quan Wei, Wang Guangjun, Fang Jiancheng. Improved star map identification algorithm based on Hausdorff distance [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(1): 8－12(in Chinese)

[3] 王广君.星敏感器及其星图处理技术研究[D].北京:北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院,2005
Wang Guangjun. Study for star sensor and star pattern processing technology[D]. Beijing: School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005(in Chinese)

[4] Daniel P H, Gregory A K, William J R. Comparing images using the Hausdorff distance[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1993, 15(9): 850－863

[5] Seongjai Kim. PDE-based image restoration: a hybrid model and color image denoising[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(5): 1163－1170

[6] 王广君,房建成.一种星图识别的星体图像高精度内插算法[J].北京航空航天大学学报,2005,31(5):566－569
Wang Guangjun, Fang Jiancheng. High precision interpolation algorithm for star pattern[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005,31(5):566－569 (in Chinese)

[7] 魏新国,张广军,江洁.星敏感器中星图图像的星体细分定位方法研究[J].北京航空航天大学学报,2003,29(9): 812－815
Wei Xinguo, Zhang Guangjun, Jiang Jie. Subdivided locating method of star image for star sensor[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(9): 812－815(in Chinese)

[8] 陈元枝,郝志航,王国辉,等.适用于星敏感器的导航星星库制定[J].光学精密工程,2000,8(4): 331－334
Chen Yuanzhi, Hao Zhihang, Wang Guohui, et al. Constitution of guide star catalog for star sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(4): 331－334(in Chinese)

[9] Koifman M, Bar-Itzhack I Y. Inertial navigation system aided by aircraft dynamics[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1999, 7(4): 487－493

[10] 张建新,段发阶,叶声华.简便的高精度摄像机标定技术[J].仪器仪表学报,1999,20(2):193－196
Zhang Jianxin, Duan Fajie, Ye Shenghua. An easy accurate calibration technique for camera[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1999, 20(2): 193－196(in Chinese)

(责任编辑:刘登敏)