

卫星位置视觉测量*

李 想^{1,2}, 朱遵尚^{1,2}, 卜彦龙³, 尚 洋^{1,2}

- (1. 国防科技大学 航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;
2. 图像测量与视觉导航湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073;
3. 北京航天飞行控制中心, 北京 100094)

摘 要:目前卫星轨道参数的测量主要依靠地面测控站的无线电测量,使得测量受限于测控站的观测弧段;另一方面随着深空探测的不断深入,也对现有测控方法提出了新的挑战。利用卫星上已有的相机通过景象匹配对卫星自身位置进行精确测量,可以有效摆脱地面测量观测弧段和测量距离的约束。本文提出了一种基于星载实时图与基准图匹配的视觉测轨方法;通过景象匹配建立实时图中特征点与基准图的对应关系,再根据成像关系解算卫星的三维位置。利用卫星获取的立体图像和轨道测量数据进行了验证实验,证明了本文提出的方法具有较高的精度,实现了地基无线电测轨和视觉测轨的相互验证。本文提出的视觉测轨方法可以弥补现有测轨方式的不足,减轻地面测控系统负担,在深空探测等领域具有良好的应用前景。

关键词:视觉导航;卫星轨道测量;图像匹配;深空探测

中图分类号:TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2014)03-0063-05

Vision-based satellite position measurement

LI Xiang^{1,2}, ZHU Zunshang^{1,2}, BU Yanlong³, SHANG Yang^{1,2}

- (1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Hunan Key Laboratory of Videometrics and Vision Navigation, Changsha 410073, China;
3. Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China)

Abstract: Satellite orbit measurement based on ground station, such as USB and VLBI, is restricted in its observation arcs. In addition, the long distance of deep space explorer mission forms a new challenge to current satellite TT&C system. If the satellite can estimate its position by its own CCD camera, the time and distance constraints will be eliminated. With a view of this, a vision-based position estimation method for satellite was proposed. It registered satellite image with a reference image and then estimated the satellite's position according to photogrammetry. An experiment using the image, orbit data of space mission was conducted. By mutually verifying the vision method and the traditional method, it illustrates the effectiveness and accuracy. Our vision-based position estimation method is a good complement to the traditional method; it can save work of ground observation stations and have a promising application prospect in deep space exploration.

Key words: vision navigation; satellite orbit measurement; image match; deep-space exploration

对卫星、飞船的轨道参数进行精确测量是航天器安全运行及执行任务的重要基础。目前,卫星的轨道参数(即位置测量)主要由地基的无线电测量手段获得^[1],主要包括统一S波段测量(Unified S Band, USB)和甚长基线干涉测量(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)^[2]等。USB依靠载波信号中提取的副载波相位延时进行距离信息解算,并通过载波信号多普勒进行卫星速率解算;VLBI采用三基站回波信号间的干涉获取时延和时延率,二者联合起来可以确定卫星在地面观

测弧段内的位置和速度,并由此计算轨道根数。虽然这种深空测定轨体制可以胜任目前的任务需求,但仍存在一些不足:(1)测量精度受航天器与地球的影响,远距离测量需要长基线,对地面测控系统硬件要求高。尽管目前VLBI能满足要求,但对更远的深空探测,也将会显得力不从心;(2)轨道测量严重受地面站观测弧段限制,在地面站测控弧段外,或者受其他天体阻挡时,无法获取测量信息;(3)低轨卫星轨道参数的测量,受无线电干扰的影响,测量精度反而比高轨卫星低;(4)地

* 收稿日期:2013-09-10

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2013CB733100);国家自然科学基金资助项目(41204026);国防预研基金资助项目(9140A24060712KG13290)

作者简介:李想(1984—),男,湖南邵阳人,博士,工程师,E-mail:lixiang_nudt@foxmail.com

基无线电测轨对径向和迹向的位置测量精度较高,但对垂直轨道面法向的位置测量精度相对要低一些。因此,为降低地面测控系统的负担,对地基无线电测轨进行有效的完善补充,有必要研究其他的轨道测量手段。

视觉导航是新兴的一种导航方式,具有被动测量、自成体系、不易受干扰、体积小、成本低、功耗小等诸多优点。目前在航天领域,利用视觉手段进行卫星轨道参数测量的研究尚不多见。Bevilacqua^[3]研究了利用图像单应求解卫星相对于轨道某一位置的姿态测量方法,并利用仿真生成的卫星图像进行了实验。证明了该方法具有较高的精度,但只能求解卫星的相对姿态变化。欧空局利用火星快车获取的火星表面高分辨率彩色立体图像,火星轨道器激光测高数据进行特征匹配,进行火星表面测量点的高精度提取,并协同地面测站信息实现了相机外方位元素的精确解算。

在航空领域,利用视觉来帮助飞行器定位和测姿则较为普遍,在巡航导弹、无人机等平台上已有成熟应用。按其实现方式大致可分为四类:1)视觉辅助位姿测量^[4-5];2)基于前后帧图像配准的相对位姿测量^[6-10];3)基于实时图与基准图配准的绝对位姿测量^[11-14,19];4)视觉同步定位与地图生成^[15-16,20]。Garratt^[17]基于光流和神经网络实现了无人机控制算法,可以实现地形跟踪以及悬停等功能。Michaelsen^[18]提出了一种通过分解单应矩阵求解飞行器姿态的方法,作者还同时分析了过长的焦距以及成像畸变对姿态求解的不利影响。Stevens^[19]等人研究了通过重建三维地形图与基准 DEM 地形图匹配确定飞行器位置、姿态导航信息的方法。传统的景象匹配导航只进行单点匹配,需要惯导和高度计测量实时姿态和高度,只能进行二维位置测量。

1 基于星载实时图与基准图匹配卫星位置的测量原理

基于视觉的卫星位置姿态自测量需要已知地面景象基准图和三维地形基准图,利用摄影测量原理对卫星的绝对位置、姿态进行自测量。其原理如图 1,其中 O_1 为卫星, I_1 是卫星图像, $T_1 \sim T_4$ 是地面上的目标。通过图像匹配建立了像点与物点的对应关系,利用对应点的图像坐标和世界坐标,结合成像关系就可以求解卫星的位置姿态。式(1)为中心透视投影模型,其中: \tilde{x} 、 \tilde{y} 为物点的图像坐标, X 、 Y 、 Z 为物点的世界坐标, F_x 、 F_y 、 C_x 、 C_y 为相机等效焦距和主点坐标,通过标定事

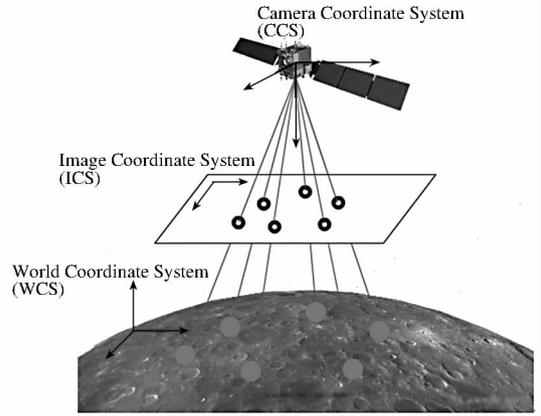


图 1 基于视觉的卫星位置自测量原理

Fig. 1 Vision-based satellite position measurement

先已知; R 、 T 分别是世界坐标系到相机坐标系的旋转矩阵、平移矩阵, Z_c 是物点到光心的距离在光轴方向的投影, R 、 T 、 Z_c 都是相机三维位置姿态的函数,因此未知量个数是 6。每个匹配点对可以提供两个方程,因此只需匹配足够多点对,上述问题即是可解的。

$$Z_c \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x & 0 & C_x & 0 \\ 0 & F_y & C_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

1.1 位姿参数初值估计

精确标定的基准图提供了地面匹配点的大地坐标,在已知当地数字高程模型或地面可近似成平面的条件下,求解相机位置姿态就变成摄影测量领域经典的 PNP 问题。当存在 6 个以上异面特征点或者 4 个以上共面特征点时,此 PNP 问题有唯一解^[21],并且可以线性求解。

将式(1)展开移项可以得到

$$\begin{cases} Xr_0 + Yr_1 + Zr_2 + T_x - \frac{\tilde{x} - C_x}{F_x}(Xr_6 + Yr_7 + Zr_8 + T_z) = 0 \\ Xr_3 + Yr_4 + Zr_5 + T_y - \frac{\tilde{y} - C_y}{F_y}(Xr_6 + Yr_7 + Zr_8 + T_z) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$R = \begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 \\ r_3 & r_4 & r_5 \\ r_6 & r_7 & r_8 \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}$$

相机内参 F_x 、 F_y 、 C_x 、 C_y 通过标定已知,且 T_z 是世界坐标系原点在相机坐标系中的 Z 坐标,通常世界坐标系原点取在地面,位于相机镜头前方,因此 $T_z > 0$ 。令 $s_i = r_i/T_z$, $i = 0, 1, \dots, 8$, $s_9 = T_x/Y_z$, $s_{10} = T_y/T_z$, 上式化为关于 $s_0 \sim s_{10}$ 的线性方程组:

$$\begin{cases} Xs_0 + Ys_1 + Zs_2 + s_9 - \frac{\tilde{x} - C_x}{F_x}(Xs_6 + Ys_7 + Zs_8) = \frac{\tilde{x} - C_x}{F_x} \\ Xs_3 + Ys_4 + Zs_5 + s_{10} - \frac{\tilde{y} - C_y}{F_y}(Xs_6 + Ys_7 + Zs_8) = \frac{\tilde{y} - C_y}{F_y} \end{cases} \quad (3)$$

通过匹配6个以上点对,得到匹配点的图像坐标以及世界坐标。求解上述线性方程组即可得到 $s_0 - s_{10}$ 。根据 $r_6^2 + r_7^2 + r_8^2 = 1$, 求出 $T_z = \sqrt{1/(s_6^2 + s_7^2 + s_8^2)}$, 继而求出旋转和平移矩阵 R 、 T 。根据姿态角的定义,可以从旋转矩阵求解出三个姿态角,从而求解出卫星的位置、姿态参数。

1.2 光束平差法求位姿精确解

上述方法求解出来的位置、姿态数据精度有限,实际测量中,可以将上述方法的结果作为初值,使用光束平差方法进一步优化,得到精确解。光束平差法以共线方程为数学模型,将重投影误差非线性函数线性化,按最小二乘法原理进行计算自变量参数,通过逐次迭代趋近于最佳值。图2中,CCS_0是卫星真实的位置姿态,CCS_1是有误差的位姿初值,Image_Points_0是真实的像点集合,Image_Points_1是根据位姿CCS_1计算的重投影像点集合。利用光束平差迭代搜索一组更优的位置、姿态解使得重投影结果和实际像点间的偏差最小。

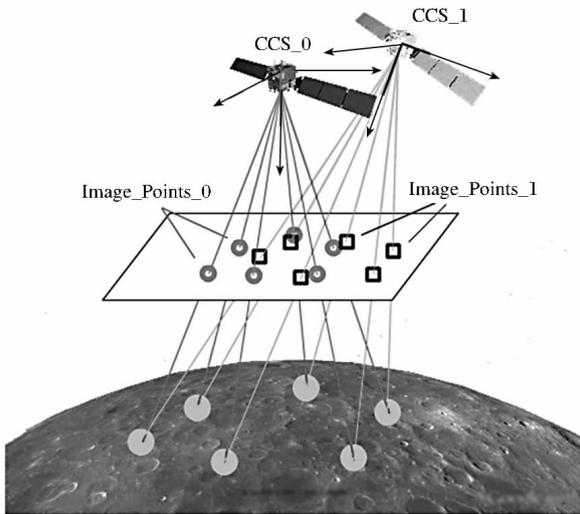


图2 光束平差法求解位姿精确解

Fig.2 Position and attitude estimation by bundle adjustment

2 CCD 图像数据测轨实验

试验卫星搭载了双线阵的高分辨率立体相机,实现了对月球表面7m分辨率的高清晰成像。地面测控获得了卫星高精度的轨道测量数据。基于上述数据,我们对本文提出的视觉测轨方法进行了实验。

文献[22]给出了相机设计参数:双线阵每条线阵6144个像元,CCD像元尺寸如为 $10.1\mu\text{m} \times 10.1\mu\text{m}$,光学焦距约为144.22mm,两条线阵CCD的配置为前视 7.98° 及后视 -17.24° ,如图3所示。

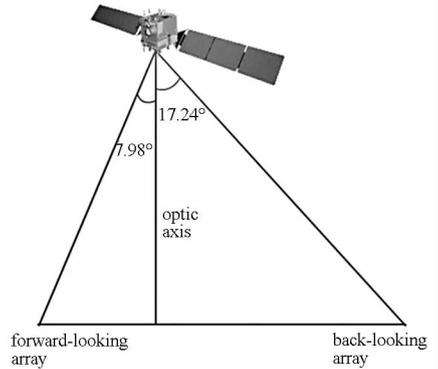


图3 立体相机参数

Fig.3 Architecture and parameter of CE-2 stereo camera

2.1 景象匹配

卫星获取的实时图像是7m分辨率,通过重采样并几何校正到与基准图同一分辨率和相同视角。使用美国LROC月图作为基准图,其分辨率为100m,基准图定位精度在百米量级。通过对18464个点的匹配测试,正确17790,配错674,匹配成功率96.3%。月球表面最大的景象变化是太阳照射角的变化,匹配错误主要发生在三维特征明显且太阳光照角度不同的区域,以及一些特征不明显的区域。

2.2 卫星三维位置解算

对双线阵立体图像,每条线阵匹配9个特征点,这样每幅实时图有18个匹配点对。运用前述的卫星位置解算方法,可以解算成像时刻卫星的三维位置。某段时间的实时图像数据的匹配和解算结果,以及与同时刻的地面站测控数据的对比如下。其中,图4、5、6是三方向(经度、纬度和高度)位置,图7、8、9是三方向的位置误差。

可以看出:

1)视觉测轨与地面站无线电测轨结果存在较小的随机误差。在100m分辨率基准图的基础上,三方向的随机误差分别为南北方向57.0m (1σ),东西方向35.8m (1σ)和高度方向142.8m (1σ),水平方向测量精度优于1像素。这证明了我国无线电测轨数据、美国测轨数据以及本文视觉测轨结果的精度和可信性,实现了三种测量结果的相互验证。

2)本文的视觉测轨与地面站无线电测轨结果暂存在一定的系统误差,三方向的系统误差分

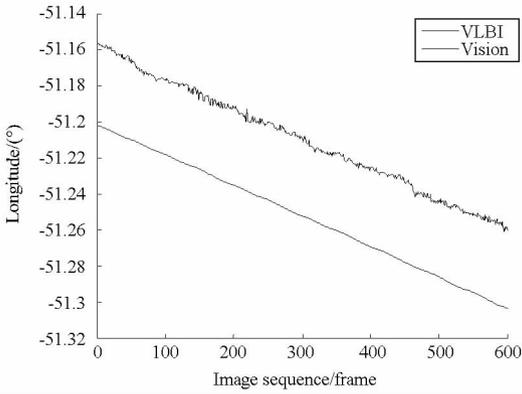


图 4 经度测量结果

Fig. 4 Result of longitude measurement

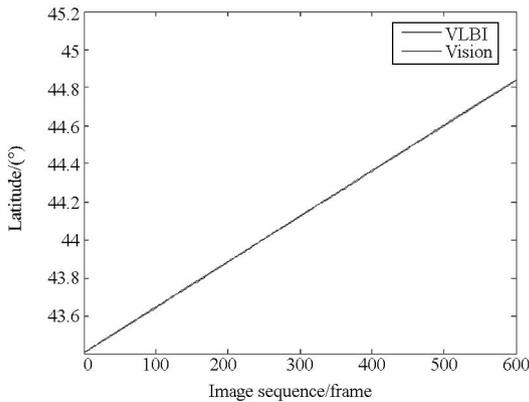


图 5 纬度测量结果

Fig. 5 Result of latitude measurement

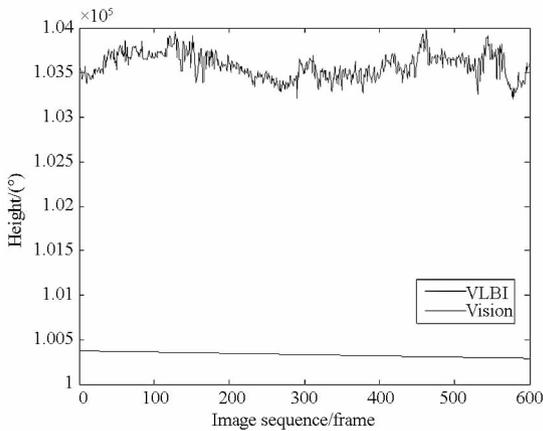


图 6 高度测量结果

Fig. 6 Result of height measurement

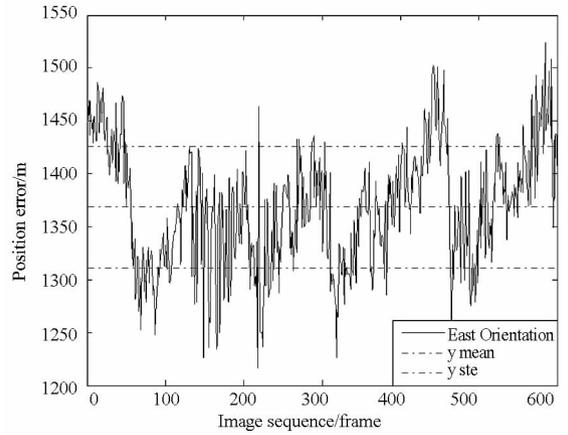


图 7 东西方向位置测量误差

Fig. 7 Position error in east orientation

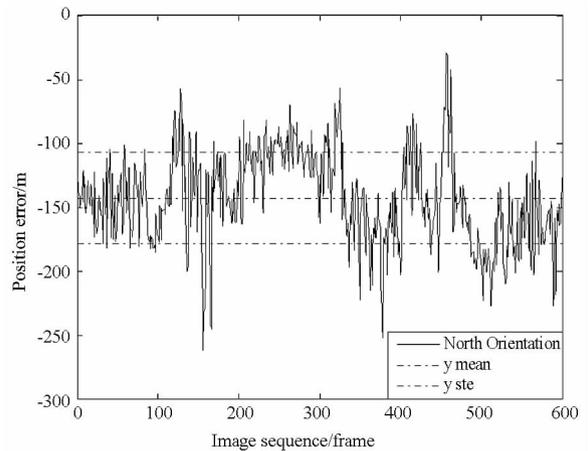


图 8 南北方向位置测量误差

Fig. 8 Position error in north orientation

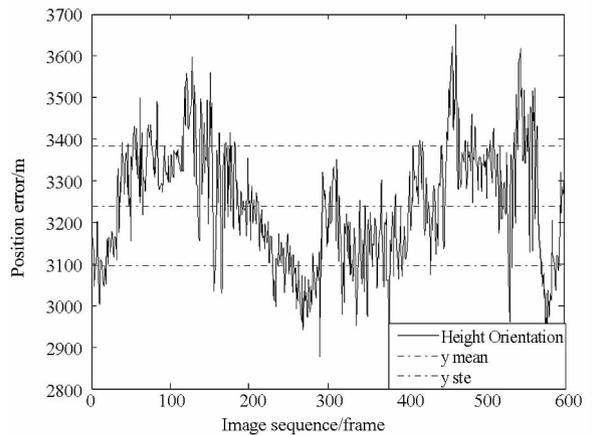


图 9 高度方向位置测量误差

Fig. 9 Position error in height orientation

别为南北方向 1368m,东西方向 -143m 和高度方向 3239m。实际上,由于本文所载的计算结果未采用精确的标定的星载相机内参,而是采用文献发表的公开参数。相机内参的误差比如等效焦距的误差会造成高度求解的系统误差,主点坐标误差会造成水平方向位置求解的系统误差。由成像公式,在 100km 轨道,每像素 (10.1 μ m) 的主点位置或距离误差能在三方向产生约 7m 的系统误

差。利用其他方法的测轨结果,对卫星相机参数进行精确在轨标定,可一定程度上消除系统误差。其他造成误差的原因,尚需进一步研究并改进。

3) 视觉测轨对高度的测量比水平方向要差一些,而地面站无线电测轨测距精度更高。因此,将两种测轨方式融合能够相互取长补短,进一步

提高测轨精度。

3 结论

本文提出了一种利用卫星图像与基准景象数据匹配,根据成像关系对卫星三维位置参数进行精确解算的视觉测轨方法。利用实际飞行获取的双线阵 CCD 图像数据和卫星轨道数据,本文进行了匹配和位置解算实验。结果证明了该方法的可行性,并具有较好的精度。该方法有助于提高卫星的自主性,减轻地面测控的负担,在深空探测等方面具有较好的应用前景。

参考文献 (References)

- [1] 刘林,王海红,胡松杰. 卫星定轨综述[J]. 飞行器测控学报, 2005,24(2):28-34.
LIU Lin, WANG Haihong, HU Songjie. Summary on satellite orbit determination [J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2005, 24(2):28-34. (in Chinese)
- [2] 朱新颖,李春来,张洪波. 深空探测 VLBI 技术综述及我国的现状和发展[J]. 宇航学报. 2010,31(8):1893-1899.
ZHU Xinying, LI Chunlai, ZHANG Hongbo. A survey of VLBI technique for deep space exploration and trend in China current situation and development[J]. Journal of Astronautics. 2010, 31(8):1893-1899. (in Chinese)
- [3] Bevilacqua A, Carozza L, Gherardi A. An image registration approach for accurate satellite attitude estimation [C]//Proceedings of the 5th International Symposium on Advances in Visual Computing: Part II, 2009: 827-836.
- [4] Amidi O. An autonomous vision-guided helicopter [D]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 1996.
- [5] Kendoul F, Nonami K, Fantoni I, et al. An adaptive vision-based autopilot for mini flying machines guidance, navigation and control [J]. Autonomous Robots, 2009, 27(3): 165-188.
- [6] Caballero F, Merino L, Ferruz J, et al. A visual odometer without 3D reconstruction for aerial vehicles. Applications to building inspection [C]//Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005: 4673-4678.
- [7] Kaiser K, Gans N, Dixon W. Localization and control of an aerial vehicle through chained, vision-based pose reconstruction [C]//Proceedings of American Control Conference, 2007:5934-5939.
- [8] Kaiser K. Vision-based estimation, localization, and control of an unmanned aerial vehicle [D]. Gainesville: University Of Florida, 2008.
- [9] Soatto S, Perona P. Recursive 3-D visual motion estimation using subspace constraints [J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 22(3):235-259.
- [10] Ready B B, Taylor C N. Improving accuracy of mav pose estimation using visual odometry [C]//Proceedings of the 2007 American Control Conference, 2007:3721-3726.
- [11] Sim D G, Jeong S Y, Lee D H, et al. Hybrid estimation of navigation parameters from aerial image sequence [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(3):429-435.
- [12] Sim D G, Park R H, Kim R C, et al. Integrated position estimation using aerial image sequences [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(1):1-18.
- [13] Sim D G, Park R H. Localization based on DEM matching using multiple aerial image pairs [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(1): 52-55.
- [14] Samadzadegan F, Hahn M, Saeedi S. Position estimation of aerial vehicle based on a vision aided navigation system [C]//Proceedings of Visualization and Exploration of Geospatial Data, Stuttgart, 2007.
- [15] Caballero F, Merino L, Ferruz J, et al. Vision-based odometry and slam for medium and high altitude flying UAVs [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2009, 54(1-3):137-161.
- [16] Caballero F, Merino L, Ferruz J, et al. Unmanned aerial vehicle localization based on monocular vision and online mosaicking [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2009, 55(4-5):323-343.
- [17] Garratt M. Biologically inspired vision and control for an autonomous flying vehicle [D]. Canberra: Australian National University, 2007.
- [18] Michaelsen E, Kirchoff M, Stilla U. Sensor pose inference from airborne videos by decomposing homography estimates [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2004, 35: 1-6.
- [19] Stevens M R, Snorrason M, Eaton R, et al. Motion imagery navigation using terrain estimates [C]//Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, 2004, 4:272-275.
- [20] Fuentes-Pacheco J, Ruiz-Ascencio J, Rendón-Mancha J M. Visual simultaneous localization and mapping: a survey [J]. Artificial Intelligence Review, 2012: 1-27.
- [21] 于起峰,尚洋. 摄像测量学原理与应用研究 [M]. 北京:科学出版社,2009.
YU Qifeng, SHANG Yang. Videometrics: principles and researches [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [22] 赵葆常,杨建峰,汶德胜,等. 嫦娥二号卫星 CCD 立体相机设计与验证 [J]. 航天器工程, 2011,20(1):14-21.
ZHAO Baochang, YANG Jianfeng, WEN Desheng, et al. Chang'e-2 lunar orbiter CCD stereo camera design and validation [J]. Spacecraft Engineering, 2011, 20(1): 14-21. (in Chinese)