

文章编号: 1001-2486(2004)03-0015-05

基于卫星编队序列图像的摄影测量*

陆宏伟¹, 邱志强¹, 于起峰¹, 王 威²

(1. 国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南长沙 410073;

2. 国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

摘 要:在现代卫星摄影测量中,由多颗小卫星组成的卫星编队具有比单颗卫星更优越的性能,能提供更高的空间分辨率和时间分辨率。卫星编队拍摄的序列图像可组成多轨道区域网,通过区域网光束法平差解算就可以获得目标点坐标。介绍了几种适于卫星摄影测量的卫星编队,讨论了影响卫星摄影测量精度的几个因素,给出了仿真实验结果,所得结论可为发展基于卫星编队的摄影测量提供参考。

关键词:卫星编队;序列图像;区域网光束法平差**中图分类号:**P231;V412 **文献标识码:**A

Photogrammetry Based on the Image Sequence Acquired by the Satellite Formation

LU Hong-wei¹, QIU Zhi-qiang¹, YU Qi-feng¹, WANG Wei²

(1. College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In modern satellite photogrammetry, clusters of low-performance satellite flying in formation may provide enhanced performance over single high-performance satellite. This is especially true for photogrammetry based on the satellite formation where stereographic imaging may provide higher resolution data. A block is formed by the image sequence acquired with the satellite formation, and the block aerotriangulation by bundle method is applied to get coordinate of ground point. Some satellite formation suit for satellite photogrammetry is introduced and the factors which effect accuracy of satellite photogrammetry is described. The experimental result is given, which would be useful for the development of satellite photogrammetry based the satellite formation.

Key words: satellite formation; image sequence; block aerotriangulation by bundle method

卫星摄影测量的原理是^[1]:利用卫星定轨条件确定拍摄时刻的摄像机空间位置,利用恒星摄像机或姿态测量仪确定摄像机光轴姿态角度,通过对图像上目标点的识别和提取,根据摄影三角测量原理,以确定目标的地面坐标。CCD 摄像机是目前摄影测量卫星上常用的成像设备,主要分为线阵和面阵两种。线阵 CCD 摄像机由于靠卫星的运行扫描形成二维图像,这种成像方式属于动态成像方式,其每一扫描行都具有各自不同的外方位元素。面阵 CCD 摄像机属于静态成像方式,与线阵 CCD 摄像机成像方式相比,整幅图像具有投影方式一致(外方位元素相同)、对平台的振动和稳定性要求较小、对卫星定姿依赖较小和各种误差易于修正等优点。随着制造工艺和现代成像技术的不断发展,面阵 CCD 摄像机的分辨率和尺寸正逐步达到高精度卫星摄影测量的要求。

卫星编队是 20 世纪 90 年代后期,随着现代小卫星技术迅速发展而出现的一种新的卫星组网方式^[2,3]。在卫星编队中,卫星间的距离较小(一般为几百米到几十千米),各卫星的覆盖目标基本相同,多颗卫星可同时对同一地区进行观测,这就构成了摄影三角测量的基本条件。同时随着 GPS 定位技术的不断发展,为卫星高精度定轨提供了新的技术手段,因此基于卫星编队的摄影测量具有很大的发展潜力和应用前景。

* 收稿日期:2003-10-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10072076)

作者简介:陆宏伟(1975-),男,博士生。

1 传统卫星摄影测量的不足

传统卫星摄影测量存在的不足主要有:(1)单颗卫星相邻轨道的旁向重叠率难以满足垂直立体测量的要求,目前一般是通过相邻轨道倾斜拍摄构成交向立体来解决,例如法国 SPOT 卫星,但倾斜拍摄造成图像几何畸变,对测量精度有较大的影响;(2)采用线阵 CCD 摄像机扫描形成的图像,其内部几何特性不稳定,在没有合适地面控制点的条件下,无法用于高精度测量;(3)卫星轨道一般采用准回归轨道来减小地面相邻轨道的间隔,在此条件下,无法进行实时或准实时测量;(4)由于卫星一般运行在几百千米高的轨道上,因此卫星单航带前向交会定位的精度受姿态角度测量精度影响较大,尤其是对于恒星摄像机确定姿态角的情况。由恒星摄像机的测量特性可知,其绕光轴旋转角 κ 的误差最大,当误差传递到对地摄像机时, κ 的误差变成对测量影响最大的航向倾斜角 φ 的误差,这对于测量是很不利的。

2 基于卫星编队的摄影测量

基于卫星编队的摄影测量是指:用卫星编队中位于不同轨道面的星载面阵 CCD 摄像机对地面拍摄,摄影时刻对应的摄像机空间坐标由卫星定轨方法确定,在满足航向和旁向重叠的条件下,多个卫星拍摄的序列图像可形成多轨道像片区域网,利用摄影测量区域网平差法就可以解算出目标坐标点。

在高精度确定拍摄时刻摄像机空间坐标的条件下,理论上可以由空中控制完全代替地面控制,这一点在 GPS 辅助航空三角测量研究中已经获得验证^[4]。此时卫星姿态信息和地面控制点都不是测量的必要条件,但可以作为辅助平差限制条件来提高测量精度。由于可以避免卫星上携带测姿仪器和繁重的地面测绘工作,因此基于卫星编队的摄影测量具有巨大的应用前景。

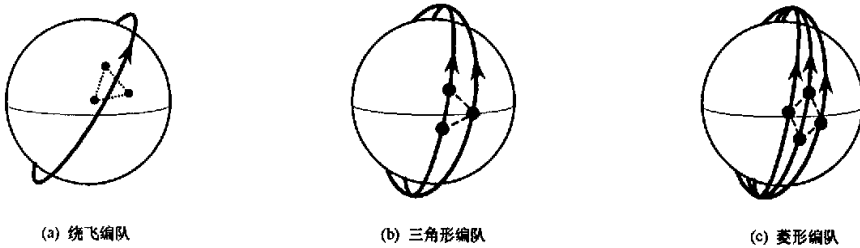


图 1 卫星编队

Fig. 1 Satellite formation

满足不共轨道面条件的常见卫星编队有:

1. 绕飞编队

绕飞编队是由若干颗小卫星围绕某一中心飞行而形成的一种具有特定形状的编队^[5-7],编队的空间结构在飞行过程中基本保持不变,如图 1(a)所示。编队中的小卫星绕地心飞行和绕其中心飞行的周期相同。

2. 三角形编队

三角形编队如图 1(b)所示,其中两颗卫星在同一轨道面内。这种编队具有所有卫星均能运行于圆轨道,队形简单和稳定等优点。但由于其编队形状在飞行过程中是变化的,即在一个轨道周期内的测量性能不能保持一致,因此这种编队只适合于特定地区的观测。可以通过轨道设计将最优观测形状布置在任何地区。

3. 菱形编队

菱形编队如图 1(c)所示,其组成类似于三角形编队。

3 影响卫星摄影测量精度的因素

3.1 以摄影时刻为变量的星历表精度

以摄影时刻为变量的星历表精度是影响摄影测量定位的一个主要因素,其获取是通过对卫星星历进行滤波、插值等运算来进行。传统卫星星历的提供方式有预报星历和后处理星历两种。预报星历包括相对某一参考历元的开普勒轨道参数和必要的轨道摄动改正参数,这种方法的误差较大。后处理星历虽然其精度较高,但是不能实时提供,具有很大的局限性。目前 GPS 定位技术已经成功地应用于摄影测量与遥感,可以实时提供米级甚至分米级的坐标定位,这不仅可以使卫星摆脱传统定轨方法的约束,而且能进一步拓宽卫星遥感图像数据的应用领域。

3.2 图像变形误差

对于采用面阵 CCD 摄像机的卫星图像,引起图像几何变形的主要因素有:摄像机镜头畸变、摄像机外方位元素变化、地形起伏误差、地球曲率和大气折射等。由于面阵 CCD 摄像机成像属于静态成像方式,因此不必考虑地球自转的影响,而对于线阵 CCD 摄像机等动态成像方式,就必须考虑地球自转的影响。另外还有卫星的高速运动和姿态变化,都会产生运动模糊,降低了图像分辨率。目前卫星上采用的像移补偿装置只能消除或减小卫星沿轨道运动引起的图像移动,而不能消除姿态变化引起的偏移。

3.3 地面目标检测和匹配精度

地面目标点的检测和匹配精度也是影响三维定位精度的重要因素。图像畸变、噪声、遮挡等情况都会对目标定位和匹配的精度有较大的影响。

4 卫星摄影三维定位仿真

常见的两种满足不共轨道面条件的卫星编队是:水平圆绕飞编队和三角编队。水平圆绕飞编队由于其在水平面内的投影是圆,因此具有良好的立体交会性能;三角形编队是具有同轨交会和异轨交会特性的典型编队形状。本文对上述两种卫星编队进行三维定位仿真研究。

4.1 卫星编队设计

参考卫星的特性代表了整个编队的飞行特性,因此首先要根据摄影测量任务要求来确定参考卫星的轨道。这里参考卫星采用太阳同步圆轨道,可以保证拍摄区域光照条件一致,获得亮度一致的图像。设计参考卫星轨道如下:半长轴 $a = 6879.8\text{km}$,回归周期为 29 恒星日,轨道倾角 $i = 97.4^\circ$,升交点赤经 $\Omega = 10^\circ$,选取卫星处于升交点的时刻为时间零点,初始时刻的纬度幅角 $u = 0^\circ$ 。根据准回归轨道性质,可计算得到赤道上相邻轨迹间距为 91.1km 。

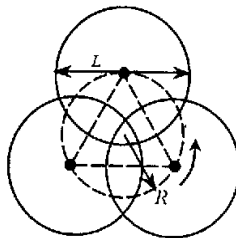


图2 水平圆卫星编队

Fig.2 The projected circular flying formation

设水平圆绕飞编队中卫星数目为 3,绕飞半径 $R = 25\text{km}$,星载面阵 CCD 摄像机的分辨率为 5120×5120 像素,像元宽度为 $12\mu\text{m}$,镜头焦距为 500mm ,则摄像机相应的地面覆盖宽度 $L = 60.2\text{km}$ 。卫星编队在赤道上初始时刻编队形状如图 2 所示。通过分析可知卫星编队覆盖宽度满足相邻轨道图像重叠的要

求。

采用运动学方法进行卫星编队轨道设计^[6],结果如表 1 所示。

表 1 水平圆绕飞编队轨道

Tab.1 The projected circular flying formation orbits

轨道根数	长半轴 a/km	偏心率 $e(\times 10^{-3})$	轨道倾角 $i/^\circ$	升交点赤经 $\Omega/^\circ$	近地点角距 $\omega/^\circ$	真近点角 $f/^\circ$
1	6879.8	1.8169	97.4074	9.79	0	359.973
2	6879.8	1.8169	97.5877	10.105	120	239.8332
3	6879.8	1.8169	97.2270	10.105	240	120.1938

三角形编队采用文献[8]中的方法来设计。设三颗卫星均运行于圆轨道,轨道半长轴均等于 6879.8km,卫星编队最大星间距为 50km,最优几何形状布置在赤经为 30°、地心纬度为 20°的地区,则编队中各卫星的轨道根数计算结果如表 2 所示。

表 2 三角形编队轨道

Tab.2 The tri-satellite formation orbits

轨道根数	长半轴 a/km	轨道倾角 $i/^\circ$	升交点赤经 $\Omega/^\circ$	平近点角 $M/^\circ$
1	6879.8	90.0617	29.8306	19.7917
2	6879.8	90.0617	29.8306	20.2081
3	6879.8	89.9383	30.1694	19.9999

4.2 坐标系转换和地面目标点仿真

卫星运动的地心惯性坐标系 ECI(earth-centered inertial)是以 J2000.0 为标准历元的协议天球坐标系。地面目标点所在的地心地固坐标系 ECF(earth-centered fixed)为协议地球坐标系 WGS-84。坐标系 ECI 到坐标系 ECF 的变换可通过下式来完成。

$$[x \ y \ z]_{\text{ECF}}^T = \mathbf{MGNP}[X \ Y \ Z]_{\text{ECI}}^T \quad (1)$$

其中, \mathbf{M} 为极移矩阵, \mathbf{G} 为格林尼治恒星时矩阵, \mathbf{N} 为章动矩阵, \mathbf{P} 为岁差矩阵。

地面目标点仿真的方法为:首先给定某时刻的摄像机光心空间坐标和光轴姿态角度,然后计算卫星在 WGS-84 椭球面上的星下点轨迹的大地坐标,在摄像机覆盖范围内的椭球面上任意选取一些地面点,随机赋给高程值来作为目标点的大地坐标,将目标点的大地坐标转换成为直角坐标,最后通过后方交会计算得到地面目标的图像坐标值。

4.2 三维定位解算方法

考虑到 GPS 技术在航天遥感与摄影测量上的巨大应用前景,因此选取 WGS-84 大地坐标系作为卫星摄像机空间坐标和进行区域网平差解算的坐标系。三维定位解算方法思路为:基于卫星编队获得的序列图像,在对图像中的目标进行提取和匹配后,采用一种基于矩阵分解的算法,在相似变换(三维刚体变换加比例变换)意义下恢复摄像机光轴姿态信息^[9],再利用定轨获得的摄像机光心坐标进行空间前方交会得到地面目标点的初始坐标值,最后对全局进行光束法区域网平差^[1,10]解算获得目标三维坐标的精确值。

4.3 仿真结果

设仿真生成的卫星空间点坐标即为摄像机光心坐标,对目标点的图像坐标加入不同强度的随机噪声来模拟实际目标定位的误差。水平圆绕飞编队和三角编队三维定位仿真实验结果分别如表 3 和表 4 所示。

表3 水平圆绕飞编队仿真实验结果

Tab.3 Results by using the projected circular flying formation

图像噪声/pixel	平面 $\Delta x/m$	平面 $\Delta y/m$	高程 $\Delta z/m$
0.2	0.217	0.170	0.237
0.4	1.444	1.264	1.421
0.6	1.442	1.274	1.450
0.8	3.060	2.595	2.830
1.0	3.524	3.203	3.947

从上面的仿真结果可以看出:在卫星高度为500km左右,无地面控制点和图像目标点定位误差不大于1个像素,利用光束法区域网平差法进行三维解算等条件下,两种卫星编队的三维定位误差均小于5m。基于三角编队的测量精度要高于基于水平圆绕飞编队,主要原因是:(1)三角编队中卫星运行于圆轨道,这保证了卫星图像比例尺的一致,而水平圆编队的卫星绕飞轨道面和当地水平面存在一定的倾角,造成绕飞卫星高度不同,并且绕飞卫星运行于椭圆轨道,这些因素导致了卫星图像比例尺的不一致;(2)三角编队在局部区域同时具有同轨立体和异轨立体能力,可以得到较好的区域网图像。

表4 三角形编队定位仿真实验结果

Tab.4 Results by using the tri-satellite formation

图像噪声/pixel	平面 $\Delta x/m$	平面 $\Delta y/m$	高程 $\Delta z/m$
0.2	0.189	0.270	0.199
0.4	0.562	0.550	0.401
0.6	0.894	0.831	0.604
0.8	1.049	1.041	0.879
1.0	1.678	1.387	1.312

5 结论

仿真实验结果表明:在对卫星进行高精度定轨的条件下,基于卫星编队拍摄的具有航向和旁向充分重叠的序列图像,利用空中控制点完全代替地面控制点来对地进行三维定位在理论上是可行的。由于卫星摄影测量还具有轨道约束条件,因此更具有实践上的可行性。文中没有考虑卫星定轨的误差、姿态角度变化,以及定轨位置与实际光心的偏移量等因素对摄影测量精度的影响,这也是下一步研究的内容。

参考文献:

- [1] 钱曾波,刘静宇,肖国超.航天摄影测量[M].北京:解放军出版社,1992.
- [2] 林来兴.小卫星编队飞行及其轨道构成[J].中国空间科学技术,2001,21(1).
- [3] Sabol C, Burns R, McLaughlin C A. Satellite Formation Flying Design and Evolution[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2001, 38(2).
- [4] 李德仁. GPS用于摄影测量与遥感[M].北京:测绘出版社,1996.
- [5] 郝晓宁,王威.近地航天器轨道基础[M].长沙:国防科技大学出版社,2003.
- [6] 张玉钺.卫星编队飞行的动力学与控制技术研究[D].国防科技大学博士学位论文,2002.
- [7] 王威,郝晓宁,韩龙.利用星间伪距观测进行编队星座相对状态测量[J].国防科学技术大学学报,2002,24(1).
- [8] 王海丽.军用侦察卫星星座技术研究[D].国防科技大学博士学位论文,2001.
- [9] Poelman, Kanade. A Paraperspective Factorization Method for Shape and Motion Recovery[J].IEEE Transaction on Pami, 1997, 19(3).
- [10] 唐纳德.卫星摄影测量[M].北京:测绘出版社,1985.

