

线阵推扫式光学卫星 几何高精度处理

张 过 著



科学出版社

线阵推扫式光学卫星 几何高精度处理

张 过 著

科 学 出 版 社

北 京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

内 容 简 介

本书研究了线阵推扫式光学卫星几何定位模型与误差改正、在轨几何检校、高频误差探测、无畸变影像生成、区域网平差等方面的一批关键技术,开发相关处理软件并推广应用,形成了一套线阵推扫式光学卫星高精度几何处理理论方法以及配套软件,在多颗国产卫星数据处理与应用中心业务化实际使用。

本书可供测绘、国土、航天、规划、农业、林业、资源环境、遥感、地理信息系统等空间地理信息相关行业的生产技术人员和科研工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

线阵推扫式光学卫星几何高精度处理/张过著. —北京:科学出版社, 2016. 11
ISBN 978-7-03-050509-5

I. ①线… II. ①张… III. ①卫星遥感—遥感图象—数字图象处理
IV. ①TP751.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 271454 号

责任编辑:张颖兵 杨光华 / 责任校对:董 丽
责任印制:彭 超 / 封面设计:苏 波

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉中远印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2016 年 11 月第 一 版 印张:15

2016 年 11 月第一次印刷 字数:380 000

定价:108.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

提升国产光学卫星几何质量,保障国产卫星数据应用效果,是真正解决国内遥感数据自主化的关键。自 1999 年发射中巴地球资源卫星(China & Brazil Earth Resource Satellite,CBERS-01)后,我国陆续设计并发射了系列高分辨率光学遥感卫星,使得我国可以快速获取全球范围的高分辨率光学影像;但因为国内卫星硬件水平限制和设计缺陷,国产高分辨率光学卫星影像几何质量差,应用效果不理想,导致我国长期无法在高分辨率影像数据上自给自足。在 2010 年启动实施的高分辨率对地观测系统重大专项(简称“高分专项”)推动下,天绘系列卫星、资源三号卫星及高分系列卫星陆续发射,我国在航天遥感领域取得了系列突破和可喜成果。其中,2012 年发射的资源三号卫星解决了我国 1:50 000 比例尺测图自主数据供应难题,实现了我国民用高分辨率立体测绘卫星领域零的突破;2014 年发射的“高分二号”卫星全色分辨率达到 0.8m,标志着我国民用遥感卫星跨入亚米级时代。但时至今日,我国资源系列、遥感系列卫星的大量数据仍然因质量问题得不到较好应用而造成堆积浪费。

从 2002 年起,针对国产线阵推扫式光学卫星图像数据几何内外精度低这一问题开展了相关研究,在多个项目的支持下,在高精度几何处理方面取得了初步进展:①创建了国产线阵推扫式光学卫星的高精度在轨几何检校方法集,实现了国产线阵推扫式光学卫星在轨几何检校突破,支持了我国测绘卫星、遥感卫星、资源卫星和商业卫星的高精度几何定标;②提出了基于平行观测的国产光学卫星的“高频姿态误差”探测原理及方法,在无需地面控制数据的条件下实现了高频误差的探测与量化表征;③针对单相机多线阵和多相机多线阵高精度拼接问题,提出了虚拟 CCD、虚拟相机的传感器校正产品概念,构建了制作满足理想线中心投影的无畸变影像产品技术体系;④针对区域卫星影像正射纠正控制点需求多和影像间接边精度差问题,提出了 DEM 辅助的卫星影像平面区域网平差方法;⑤针对线阵推扫式光学卫星基于标准景的立体区域网平差需求控制点多问题,提出了基于轨道约束的标准景卫星影像立体区域网平差方法;⑥提出了以 SRTM-DEM 为控制的光学卫星立体影像几何纠正方法,解决了全球部分无控制点区域卫星影像纠正问题。

为了加强与各位同仁交流,促进我以及团队在光学卫星影像精处理方向的创新发

展,将多年来在线阵推扫式光学卫星高精度几何处理方向的研究成果进行归纳总结,以几何定位模型与误差改正、在轨几何检校、高频误差探测、无畸变影像生成、区域网平差等方面

的发展现状、问题原因、理论方法、误差模型、算法流程、试验验证、应用情况为章节主线,形成了本书的主体内容。希望本书对丰富线阵推扫式光学卫星高精度几何处理技术体系,促进航天摄影测量学的发展起到一定的推动作用。

在十多年研究过程中,得到多项课题的资助,在此对这些课题资助单位的领导与管理人员表示感谢。还要对完成课题研究合作单位的相关研究伙伴一并致谢,感谢他们在我研究中的无私关怀、鼓励与奉献。

感谢研究团队人员蒋永华、汪韬阳、潘红播、李立涛、张浩、黄文超、徐凯、崔子豪、祝小勇、刘斌等为本书编辑工作和相关试验做出的努力。

由于卫星信息精处理方向发展迅速,而我的水平有限,本书中还存在许多不足,敬请各位同仁批评指正,本人深表感谢!

作 者

2016年9月于武汉

目 录

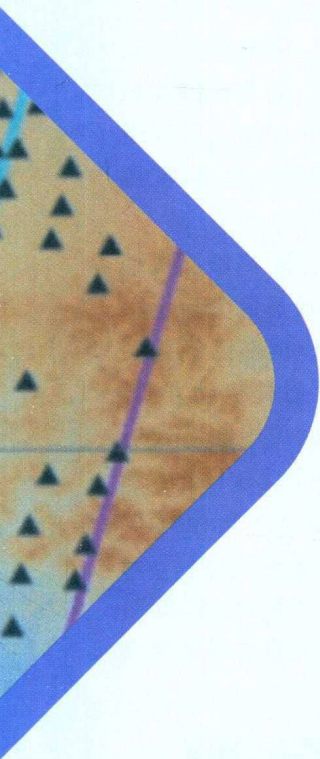
第 1 章 绪论	1
1.1 国内外高分光学卫星发展现状	2
1.2 基本概念	4
1.3 相关坐标系定义及转换	6
1.3.1 影像坐标系	6
1.3.2 相机坐标系	7
1.3.3 本体坐标系	7
1.3.4 轨道坐标系	8
1.3.5 地心惯性坐标系	8
1.3.6 地固坐标系	9
参考文献	10
第 2 章 线阵推扫式光学卫星几何定位模型与误差分析	11
2.1 几何定位模型研究进展	12
2.2 严密成像几何模型	14
2.2.1 轨道模型	15
2.2.2 姿态模型	16
2.2.3 行时模型	17
2.3 几何定位误差分析	17
2.3.1 轨道位置误差对几何定位的影响规律	18
2.3.2 姿态误差对几何定位的影响规律	19
2.3.3 内方位元素误差对几何定位的影响规律	21
2.3.4 设备安装误差对几何定位的影响规律	23
2.3.5 时间同步误差对几何定位的影响规律	23
2.4 有理函数模型描述误差能力分析	23
2.4.1 一元有理函数定性分析	24
2.4.2 有理函数模型的定性分析	28
2.4.3 试验验证	29
2.5 小结	30
参考文献	30

第3章 在轨几何检校	33
3.1 在轨几何检校研究进展	34
3.2 基于检校场的外/内方位元素检校	35
3.2.1 外方位元素检校	35
3.2.2 内方位元素检校	38
3.2.3 抗外/内相关性的几何检校策略	42
3.2.4 资源三号检校场几何检校应用试验	44
3.3 几何交叉定标	53
3.3.1 几何交叉检校机理	54
3.3.2 基于同名点交会约束的几何交叉检校模型	55
3.3.3 遥感6号几何交叉检校验证	56
3.4 无场定标	63
3.4.1 偏航 180° 外定标模型	63
3.4.2 仿真影像无场外定标验证	65
3.4.3 相似角度无场内定标模型	68
3.4.4 资源一号02C相似角度无场内定标验证	69
3.5 基于基准波段的多(高)光谱内定标	72
3.5.1 基准波段内定标原理	72
3.5.2 资源三号多光谱内定标应用试验	72
3.6 小结	74
参考文献	75
第4章 高频误差探测	77
4.1 高频误差探测研究进展	78
4.2 基于平行观测的高频误差探测机理	82
4.2.1 多TDI CCD线阵的拼接与平行观测	83
4.2.2 高频误差探测机理与探测流程	85
4.2.3 试验与分析	88
4.3 基于平行观测的高频误差探测方法	92
4.3.1 国产光学卫星高频误差源及特性分析	92
4.3.2 基于同名点交会约束的高频误差探测	94
4.4 资源一号02C姿态量化误差引起高频误差试验验证	97
4.4.1 试验数据	97
4.4.2 高频误差探测	98

4.4.3 几何精度验证	100
4.5 遥感 10 号时间同步误差引起高频误差探测试验验证	103
4.5.1 试验数据	103
4.5.2 高频误差探测	104
4.5.3 几何精度验证	106
4.6 遥感 6A 号姿态抖动引起高频误差探测试验验证	111
4.6.1 试验数据	111
4.6.2 高频误差探测	112
4.7 小结	118
参考文献	118
第 5 章 无畸变影像生成方法	121
5.1 问题及研究进展	122
5.2 虚拟重成像方法	123
5.2.1 虚拟相机几何定位模型	123
5.2.2 虚拟重成像技术	124
5.2.3 虚拟重成像算法	126
5.3 虚拟重成像引起的误差分析	127
5.3.1 可能引入误差的原因	127
5.3.2 平面误差分析	127
5.3.3 高程误差分析	129
5.4 单相机无畸变影像资源三号应用试验	130
5.4.1 试验数据介绍	130
5.4.2 RFM 替代精度验证	132
5.4.3 传感器校正产品立体平差	134
5.4.4 DSM 精度验证	138
5.4.5 多光谱谱段配准	141
5.5 双相机无畸变影像生成遥感 14A 号应用试验	143
5.5.1 试验数据介绍	143
5.5.2 双相机相对关系定标	144
5.5.3 双相机拼接精度验证	150
5.6 小结	156
参考文献	157

第 6 章 区域网平差方法	159
6.1 立体区域网平差研究进展	160
6.1.1 严密成像几何模型的区域网平差	160
6.1.2 通用传感器模型的区域网平差	162
6.2 平面区域网平差研究进展	163
6.3 轨道约束的卫星影像立体区域网平差	163
6.3.1 标准景影像之间的几何约束	163
6.3.2 基于条带约束的平差模型	166
6.3.3 资源三号测绘卫星应用试验	168
6.4 DEM 约束卫星影像平面区域网平差	174
6.4.1 平面平差的基本原理	174
6.4.2 平面与立体平差对比试验结果与分析	176
6.4.3 卫星影像正射纠正试验结果与分析	180
6.5 以 SRTM-DEM 为控制的遥感影像纠正	186
6.5.1 组建单元模型	186
6.5.2 独立模型法 DEM 区域网平差	186
6.5.3 数据试验及结果分析	187
6.6 小结	191
参考文献	192
第 7 章 相关软件系统功能介绍	197
7.1 线阵推扫式光学卫星地面应用系统组成与功能	198
7.2 预处理分系统	198
7.2.1 分系统功能	198
7.2.2 分系统组成和流程	199
7.3 处理分系统	200
7.3.1 分系统功能	200
7.3.2 分系统组成和处理流程	200
7.5 几何辐射检校分系统	201
7.6 小结	201
第 8 章 试验数据分析	203
8.1 吉林一号 A 星试验	204
8.1.1 几何定标数据说明	204

8.1.2 几何定标结果与分析	205
8.1.3 无畸变产品生产验证	208
8.1.4 平面区域网平差试验	213
8.2 资源三号 02 星首轨数据定标与处理试验	214
8.2.1 数据说明	215
8.2.2 几何交叉定标	216
8.2.3 立体平差处理精度验证	219
8.3 资源三号 02 星场地几何定标与处理试验	219
8.3.1 几何定标数据说明	219
8.3.2 正视相机几何定标	220
8.3.3 前视相机/后视相机几何定标	222
8.3.4 多光谱相机几何定标	224
8.3.5 立体区域网平差验证试验	224
8.4 小结	227



第 1 章

绪 论

本章简要介绍国内外高分光学卫星的发展现状与存在的问题,指出国内外光学卫星朝着高空间分辨率、高敏捷机动能力、高定位精度方向发展,但我国光学卫星存在的几何质量问题也就是“测不准”的问题日益凸显,影响我国高分光学遥感卫星的应用效果。本章还描述与定义了和高精度几何处理与应用相关的基本概念,并对影像处理常用的相关坐标系的定义及转换模型进行了论述。

1.1 国内外高分光学卫星发展现状

光学遥感卫星能够长时间、周期性地对地球成像,具备数据获取快速、成本低且不受区域限制的优势,已经成为人们获取地球空间信息的重要手段。长期以来,世界各国竞相发展遥感对地观测技术,陆续发射了系列光学卫星,如美国的 Landsat、IKONOS 系列卫星,法国的 SPOT 系列卫星、日本的 ALOS 系列卫星等。这些卫星为各国国防建设、能源监测、农业估产、自然灾害评估等提供了大量的数据。

近年来随着航天技术的不断发展,国外光学遥感卫星朝着高空间分辨率、高敏捷机动能力、高定位精度等方向发展,主要体现在:①空间分辨率方面,国外亚米级甚高分辨率卫星已经得到大规模应用,美国于 2014 年发射的 WorldView-3 卫星全色分辨率已经达到 0.31 m(图 1.1)(Digitalglobe,2014),成为当前最高分辨率的商业卫星;②敏捷机动方面,美国最早于 1999 年发射敏捷卫星 IKONOS-2,得到广泛关注及应用;此后美国陆续发射了 Quickbird、WorldView 等敏捷卫星(表 1.1)(张新伟等,2011);2011~2012 年法国发射的 Pleiades 系列卫星展现出了更为优秀的敏捷机动能力(Greslou et al.,2012);③定位精度方面,卫星影像的定位精度由早期的千米量级(Wong,1975),逐渐提升至 SPOT5 的 50 m(Bouillon et al.,2003)、IKONOS 的 12 m(Grodecki et al.,2005),直至当前 WorldView、GeoEye 的 3 m 左右(Aguilar et al.,2013)。国外光学遥感卫星的发展呈现出蓬勃生机。



图 1.1 WorldView-3 示意图

表 1.1 国外敏捷卫星性能参数

卫星	IKONOS	Quickbird-2	WorldView-1	WorldView-2	GeoEye-1
发射时间	1999 年	2001 年	2007 年	2009 年	2008 年
设计寿命/年	7	7	7.25	7.25	7
轨道高度/km	681	450	496	770	684
质量/kg	1 100	950	2 500	2 800	1 955

续表

卫星	IKONOS	Quickbird-2	WorldView-1	WorldView-2	GeoEye-1
全色分辨率/m	1	0.61	0.5	0.46	0.41
多光谱分辨率/m	4	2.44	2	1.8	1.64
成像幅宽/km	11	16.5	17.6	16.4	15.2
角速度	4°/s	10°/20 s 50°/45 s	4.5°/s	3.5°/s	—

在国际高分辨率(简称高分)对地观测技术的发展热潮中,我国也积极开展相关研究。自1999年发射中巴地球资源卫星(CBERS-01)后,我国陆续设计并发射了系列高分辨率光学遥感卫星。2006年我国政府将高分专项列入《国家中长期科学与技术发展规划纲要(2006~2020年)》,并于2010年5月经国务院批准启动实施。在高分专项的推动下,我国高分光学卫星快速发展。2012年,我国发射资源三号(ZY3-01)卫星,解决了1:50 000比例尺测图自主数据供应难题,实现了我国民用高分辨率立体测绘卫星领域零的突破,是我国卫星测绘发展史上一座新的里程碑(李德仁,2012);2013年,高分专项首发星“高分一号”卫星成功发射,卫星上搭载了2 m/8 m分辨率的全色/多光谱相机和16 m分辨率的多光谱宽幅相机,其宽幅相机的覆盖幅宽达到800 km,突破了高空间分辨率、多光谱与高时间分辨率的结合;2014年,“高分二号”卫星发射成功,其全色分辨率达到0.8 m,标志着我国民用遥感卫星跨入亚米时代,国内迎来了高分光学卫星发展的高潮。表1.2列举了我国现役主流高分辨率光学卫星。

表 1.2 我国现役主流高分辨率光学卫星基本参数

卫星	发射时间	轨道高度/km	分辨率/m	成像幅宽/km	实际定位精度/m
遥感6号	2008年	650	2	48	无控制定位精度200 m(随着时间漂移),有控制定位精度优于20 m
资源一号02C	2011年	780	P/MS:5/10 HR:2.36	P/MS:60 HR:54	无控制优于150 m
天绘一号01	2010年	500	P/MS:2/10 F/B/N:5	60	—
天绘一号02	2012年	500	P/MS:2/10 F/B/N:5	60	无控制平面10.3 m,高程5.7 m
资源三号	2012年	505	F/B:3.5 N:2.1 MS:5.8	51	无控制平面优于10 m,高程优于5 m
实践九A	2012年	640	P:2.5 M:10	30	无控制定位精度200 m(随着时间漂移)

续表

卫星	发射时间	轨道高度/km	分辨率/m	成像幅宽/km	实际定位精度/m
遥感 11 号	2012 年	479	0.8	23	无控制定位精度 100 m,有控制定位精度优于 20 m
高分一号	2013 年	645	P/MS:2/8 宽幅相机:16	P/MS:60 宽幅相机:800	——
高分二号	2014 年	631	P:1 MS:4	45	——
遥感 10 号	2014 年	500	P:1 MS:4	12	无控制定位精度 200 m,有控制定位精度优于 20 m
遥感 6A 号	2014 年	640	P:1 MS:3	64	——
遥感 14A 号	2014 年	500	P:0.5 MS:2	24	——
吉林一号	2015 年	648	P:0.7 MS:2.8	11.7	无控制定位精度 200 m,有控制定位精度优于 1.5 个像素

注:P 表示全色;MS 表示多光谱;F 表示三线阵前视;N 表示三线阵正视;B 表示三线阵后视。

随着在轨光学卫星数量的增多,我国具备了快速获取全球区域高分辨率光学影像的能力;但与强大的数据获取能力相矛盾的是,多数国产卫星影像数据没有得到充分的利用,造成大量的卫星数据浪费。究其原因,国产光学卫星影像的几何质量问题(表 1.2)是影响其应用效果的重要因素。随着遥感影像分辨率及辐射质量的提高,我国逐渐解决了卫星“看不清”的问题,但伴随着遥感应用研究的逐步深入,“测不准”的问题却日益凸显。国民经济的发展与国防建设的需要,对我国高分光学卫星的定位精度提出了较高的要求,而当前大多数的卫星数据难以满足要求。目前,地面高精度的处理方法研究已经成为一个非常重要的研究领域。

1.2 基本概念

本节主要介绍几个与高分辨线阵推扫式光学卫星影像处理相关的概念。

1. 线阵推扫成像

线阵推扫式光学成像卫星采用 TDI CCD(time delay integration charge-coupled device) 或 CCD 线阵推扫成像,单次曝光成像仅获取相机视场内的一行图像,而随着卫星

与地面的相对运动,相机随卫星运动扫描地面不同区域最终形成二维图像,如图 1.2 所示。线阵推扫式卫星单行成像符合线中心投影原理,可依据经典共线方程建立其几何定位模型。

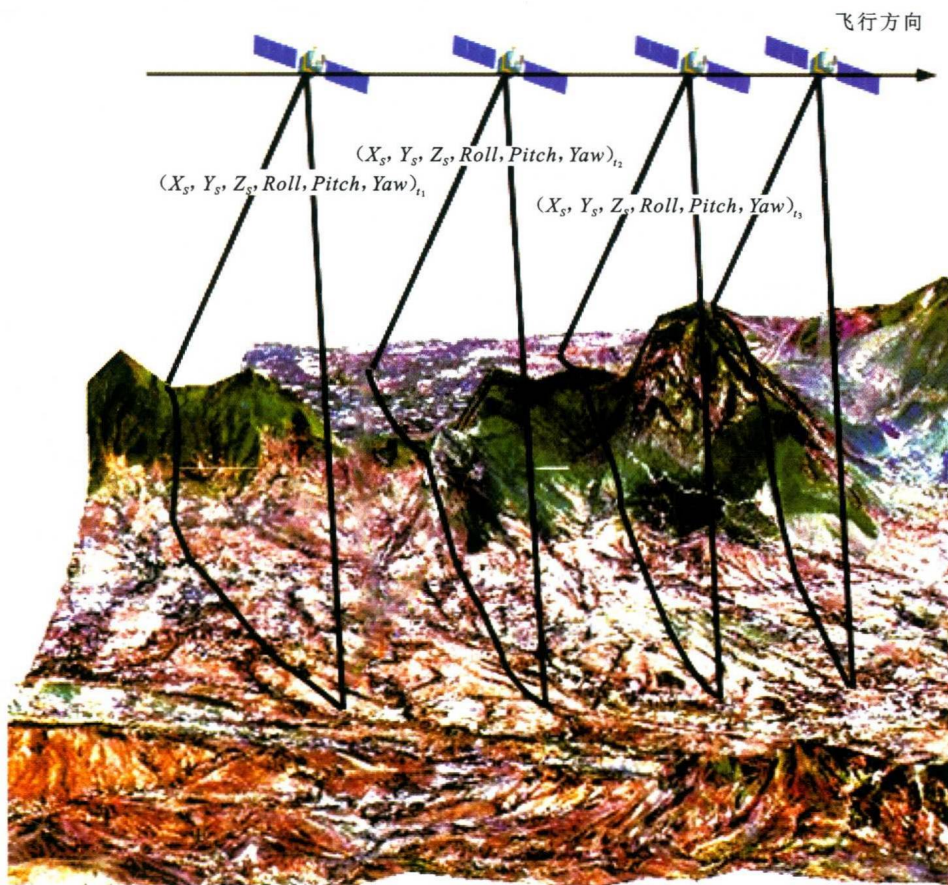


图 1.2 线阵推扫成像示意图

2. 内方位元素

内方位元素描述了图像坐标系下像点在相机坐标系的指向,对于星载线阵推扫式的传感器而言,内方位元素除主点和主距外,还包含镜头畸变、像素尺寸变化、CCD 像点位移、多 CCD 拼接等反映影像复杂变形的因素。

3. 外方位元素

用于描述摄影中心的空间坐标位置和姿态的参数,称为外方位元素。包含:三个线元素,用于描述摄影中心的空间位置;三个角元素,用于影像的空间姿态。

4. 高频误差

高频误差一般指误差产生频度大于某一频率的误差。为提高处理精度,本书将高频误差概念拓展定义为星上姿轨量化精度不高、测量频率不够而无法准确采样记录的如姿态轨道误差、时间同步误差等统称为高频误差,而不仅仅局限于姿态抖动等常规的高频率误差。

对应高频误差的还有静态误差、动态误差,其基本定义见几何内/外定标。

5. 平行观测

将相邻 CCD 阵列对同一地物成像获取的同名点对(包含点对位置关系、成像时间间隔)定义为平行观测。

6. 几何内/外定标

根据星上误差随时间变化特性,可以分为动态误差及静态误差。其中,动态误差主要包括姿轨测量误差、设备安装误差,这些误差在短时段内(如单景成像时间内)主要表现为系统误差,而长时段内会发生变化且变化幅度不可忽略;静态误差主要包括相机内方位元素误差,其在一定时间内(如三个月内)不会发生变化或变化幅度可以忽略。针对动态误差的检校称为外方位元素检校,而针对静态误差的检校称为内方位元素检校。

7. 几何定位模型

由于卫星的轨道运动、相机的扫描运动和地球自转,遥感图像定位是空间几何和时序的结合。所谓几何定位模型,指的是地物点的影像坐标 (x, y) 和地面坐标 (X, Y, Z) 之间的数学关系。对任何一个传感器成像过程的描述都可以通过一系列点的坐标来进行。

8. 区域网平差

区域网平差是以影像为基本平差单元,根据控制点内外业坐标相等、加密点的内业坐标相等,按照几何定标模型列出误差方程,在全测区统一进行平差处理,求解测区内所有影像的定向参数和加密点的三维坐标。

1.3 相关坐标系定义及转换

光学卫星几何定位涉及的坐标系主要包括:影像坐标系、相机坐标系、本体坐标系、轨道坐标系、地心惯性坐标系及地固坐标系。

1.3.1 影像坐标系

影像坐标系以影像的左上角点为原点,以影像的列方向为 y 轴方向,以影像的行方向为 x 轴方向,如图 1.3 所示,其大小由像素点的行列号确定。

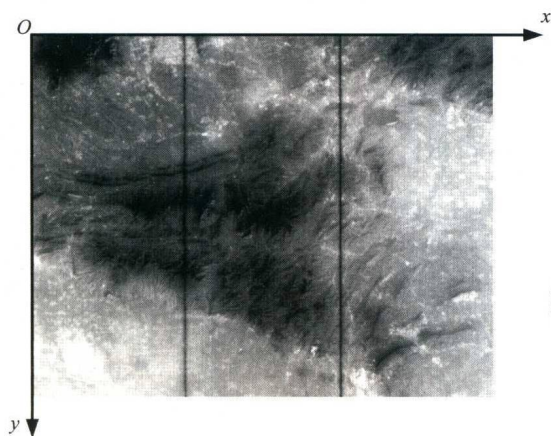


图 1.3 图像坐标系示意图

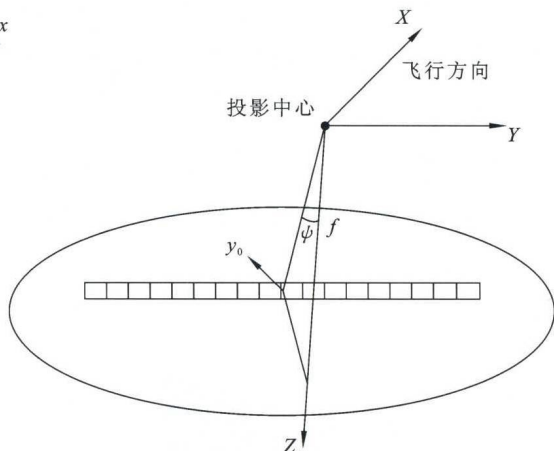


图 1.4 相机坐标系示意图

1.3.2 相机坐标系

相机坐标系原点位于相机投影中心, Z 轴为相机主光轴且指向焦面方向为正, Y 轴平行于 CCD 阵列方向, X 轴指向卫星飞行方向, 三轴指向满足右手坐标系规则, 如图 1.4 所示。

对于影像坐标 (x_i, y_i) (以 x_i 为影像行, y_i 为影像列), 其对应的相机坐标 (x_c, y_c, z_c) 如下:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \cdot \tan \psi \\ (y_i - y_0) \cdot \lambda_{cd} \\ f \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

其中: f 代表相机主距; ψ 为 CCD 阵列沿轨向偏场角; y_0 为主视轴(过主点垂直于 CCD 线阵的垂点)对应位置; λ_{cd} 为探元大小。

1.3.3 本体坐标系

卫星本体坐标系是与卫星固联的坐标系。通常取卫星质心作为原点, 取卫星三个主惯量轴为 X, Y, Z 轴。其中, OZ 轴由质心指向地面为正, OX 轴指向卫星飞行方向为正, OY 轴由右手坐标系规则确定(图 1.5)。

相机坐标系与本体坐标系的转换关系由相机安装决定, 该安装关系在卫星发射前进行测量。对于相机坐标 (x_c, y_c, z_c) , 其对应的本体坐标 (x_b, y_b, z_b) 为

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} + \mathbf{R}_{\text{camera}}^{\text{body}} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_{\text{camera}}^{\text{body}} = \mathbf{R}_y(\varphi_c) \mathbf{R}_x(\omega_c) \mathbf{R}_z(\kappa_c) \quad (1.2)$$