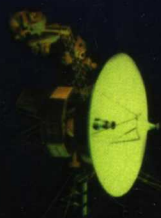


GAOFENBIANLU WEIXING YINGXIANG JIHE CHULI FANGFA

高分辨率卫星影像 几何处理方法

柴登峰 张登荣 编著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

高分辨率卫星影像几何处理方法

柴登峰 张登荣 编著

浙江大学出版社

内容简介

本书介绍高分辨卫星影像几何处理方法,包括摄影测量基础知识、成像模型、几何校正、核线几何、三维重建和立体匹配等内容。本书既阐述传统理论和方法,又介绍最新研究成果,可以作为地球信息科学与技术相关专业高年级本科生和研究生教材,也可作为相关领域技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高分辨率卫星影像几何处理方法 / 柴登峰, 张登荣编著. —杭州:
浙江大学出版社, 2007. 8
ISBN 978-7-308-05553-6

I. 高… II. 柴… III. 高分辨率—卫星图像—图像处理
IV. TP75

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 142190 号

高分辨率卫星影像几何处理方法

柴登峰 张登荣 编著

责任编辑 王大根 张 真

封面设计 刘依群

出版发行 浙江大学出版社

(杭州天目山路 148 号 邮政编码 310028)

(E-mail: zupress@mail. hz. zj. cn)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 浙江大学出版社电脑排版中心

印 刷 富阳市育才印刷有限公司

开 本 787mm×960mm 1/16

印 张 7.5

字 数 139 千

版 印 次 2007 年 8 月第 1 版 2007 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-05553-6

定 价 15.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话(0571)88072522

前 言

自 20 世纪 60 年代初至今,对地观测卫星经历了四个发展阶段。在目前阶段,具有高空间分辨率、高光谱分辨率和高时间分辨率的高分辨率卫星发展迅猛。1999 年 9 月 24 日,美国空间成像公司将 IKONO 卫星成功送入预定轨道,标志着高分辨率卫星遥感时代的开始。高分辨率卫星遥感在军用和民用方面都具有广阔应用前景,得到许多国家的高度重视,我国已经把高分辨率对地观测系统列入 2006—2020 年国家中长期科学和技术发展的 16 个重大科技攻关专项,启动并实施高分辨率对地观测系统工程。

高分辨率卫星搭载新型传感器获取地面影像,影像具有很高的空间分辨率,采用立体成像方式所获取的立体影像是地表三维信息获取的重要数据源。新型传感器与传统传感器的成像机理有所不同,所获取的高分辨影像包含了更丰富的几何信息,因此高分辨卫星影像几何处理的重要性已经突现出来。国内外学者针对高分辨率卫星遥感影像几何处理的理论和方法开展了大量研究工作。

高分辨率卫星遥感具有广阔的应用领域,这些应用领域的学生和科技人员需要掌握影像几何处理的理论和方法。实际上,遥感影像几何关系理论和处理方法是摄影测量的研究课题,这一学科的理论 and 实践知识相当丰富,摄影测量专业的学生要学习好几本教材才能掌握这套理论和方法。这也是非摄影测量(特别是非测绘)专业的学生学习这套理论和方法的很大障碍。

本书针对这一现状,介绍高分辨率卫星影像几何处理的理论和方法,力求达到如下特点:

(1)既保证理论知识完备,又保持内容简明扼要,以有利于非测绘专业读者学习。

(2)既阐述经典理论,又介绍最新研究成果,以有利于相关领域研究人员了解研究进展。

本书的出版得到国家科技支撑计划(项目编号:2006BAK30B01)资助。

由于作者水平有限,书中难免存在差错和疏漏之处,敬请读者不吝指正。

作 者

2007 年夏

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 对地观测卫星发展概况	1
1.2 相关学科简介	3
1.3 立体视觉的理论和方法	4
1.4 本书的内容和结构安排	6
第 2 章 摄影测量基础	7
2.1 空间坐标系	7
2.2 内外方位元素	9
2.3 空间直角坐标变换.....	11
2.4 投影变换.....	13
2.5 单像解析.....	15
2.6 双像解析.....	21
2.7 解析法空中三角测量.....	28
2.8 小 结.....	30
第 3 章 物理传感器模型	31
3.1 CCD 传感器	31
3.2 卫星运动轨迹.....	32
3.3 线性传感器模型.....	33
3.4 基于共线方程的传感器模型.....	35
3.5 基于仿射变换的传感器模型.....	39
3.6 小 结.....	44
第 4 章 通用传感器模型	45
4.1 基于多项式的传感器模型.....	45

4.2	基于直接线性变换的传感器模型	46
4.3	基于有理函数的传感器模型	49
4.4	小 结	55
第 5 章	影像几何校正	56
5.1	几何变形的来源	56
5.2	几何校正的方法	57
5.3	小 结	61
第 6 章	核线几何	62
6.1	框幅式中心投影影像的核线几何	62
6.2	线阵 CCD 推扫式影像的核线几何	66
6.3	小 结	71
第 7 章	三维重建	72
7.1	三维重建方法概述	72
7.2	基于线性模型的三维重建	73
7.3	基于仿射变换模型的三维重建	74
7.4	基于有理函数模型的三维重建	74
7.5	小 结	78
第 8 章	立体匹配	79
8.1	立体匹配研究概述	79
8.2	密集匹配	82
8.3	特征匹配	90
8.4	小 结	99
第 9 章	线阵 CCD 推扫式影像的立体匹配	100
9.1	线阵 CCD 推扫式影像的特点	100
9.2	核线关系的利用	102
9.3	辐射差异的处理	104
9.4	小 结	109
参考文献		110

第 1 章 绪 论

1.1 对地观测卫星发展概况

1957 年 10 月 4 日,前苏联发射了第一颗人造地球卫星,标志着人类进入太空时代。20 世纪 60 年代初,人类获取了第一批从宇宙空间拍摄的地球卫星影像,实现了对地观测任务。在随后 40 余年中,对地观测卫星(Earth Observation Satellites—EOS)迅猛发展,为遥感技术的发展和應用奠定了坚实的基础。

1.1.1 对地观测卫星的历史与现状

对地观测卫星的发展历程已经有 40 多年,在不同时期表现出不同的特点,实际上可以划分为若干阶段。Guoqing Zhou 等将其划分为四个阶段^{[38][39]}:

1. 第一代 EOS

1960 年代初到 1972 年为对地观测卫星发展的第一阶段。在这一阶段,卫星大多为“冷战”产物,主要是用于军事侦察和制图的军事卫星,譬如,CORONA、ARGON 和 LANYARD 等军事侦察卫星。第一代对地观测卫星的主要特点是其成像系统都按照典型的摄影测量相机设计,譬如,ARGON 9034A 卫星仅载有一个全色的框幅式相机(KH-5),地面分辨率达到 140m。

2. 第二代 EOS

1972 年到 1986 年为对地观测卫星发展的第二阶段。在这一阶段,卫星技术已经走向民用,譬如,最具代表性的 Landsat-1 卫星能持续提供一定分辨率的卫星影像,从而为地球资源调查提供影像数据。Landsat-1 搭载的多光谱扫描仪(MSS)能提供 $0.5\sim 1.1\mu\text{m}$ 四个波段的影像数据,地面分辨率达到 80m。

3. 第三代 EOS

1986 年到 1997 年为对地观测卫星发展的第三阶段。在这一阶段,对地观测卫星在技术和应用上经历了一场深刻变革,线阵 CCD 传感器、合成孔径雷达(SAR)等新型传感器得到广泛使用,大大提高了对地观测卫星的遥感探测能力。譬如,法国 SPOT 搭载线阵 CCD 传感器,地面分辨率达到 10m。ERS-1 卫星搭

载合成孔径雷达(SAR)传感器,实现微波遥感,地面分辨率达到 30m。

4. 第四代 EOS

1997 年到 2010 年为对地观测卫星发展的第四阶段。在这一阶段,新一代高分辨率卫星发展迅猛。第四代对地观测卫星的主要特点表现在其高空间分辨率、高光谱分辨率、轨道高度、回访能力、条带宽度、立体成像能力和多种成像模式等方面。譬如,IKONOS 卫星的平均地面分辨率达到 1m 左右。

由此可见,目前正处于对地观测卫星发展的第四阶段,高分辨率遥感卫星代表了目前对地观测卫星的技术水平和发展趋势。

1. 1. 2 高分辨率遥感卫星的特点

1994 年,美国克林顿政府取消了对 10~1 米级分辨率卫星遥感影像数据的商业销售禁令,为高分辨率商业遥感卫星的运营铺平了道路。1999 年 9 月 24 日,美国空间成像公司(Space Imaging)将 IKONO 卫星成功送入预定轨道,标志着高分辨率卫星遥感时代的开始。同一时期,美国数字地球公司(DigitalGlobe)发射了 EarlyBird(晨鸟)和 QuickBird(快鸟)卫星,法国发射了 SPOT-5 卫星,以色列等国家也发射了高分辨率卫星。

这些高分辨率卫星搭载线阵列 CCD 传感器,采用推扫方式获取地面的高分辨率全色和多光谱影像,遥感影像的空间分辨率、时间分辨率和光谱分辨率都得到很大提高,空间分辨率已经达到 1m 以内,能够满足 1:10000 比例尺地形图测绘的需求。传感器机械系统具有快速、灵活的指向能力,能在穿轨方向上以一定的角度左右侧视,获取相邻轨道的星下点影像,形成异轨立体像对,还能在沿轨方向上前视和后视成像,获取无明显时间差的立体覆盖,形成同轨立体像对,确保其能够获取地面的高分辨率立体影像数据,是地表三维信息的重要来源。高分辨率卫星搭载 GPS 接收机,能够提供高精度卫星星历和姿态数据,进而提高影像的定位精度,减少对地面控制点的需求。一些卫星还搭载合成孔径雷达(SAR)等传感器,地面分辨率也达到 3m,能够满足测图需要,高分辨率卫星给地理信息等行业提供了高效的数据获取手段。

但是,高分辨率卫星普遍采用新型传感器,其成像机理不同于传统传感器,因此,必须针对新型传感器的成像原理及其几何处理方法开展研究,特别需要研究传感器的成像模型、遥感影像的核线几何、立体匹配等问题和方法。只有这样才能真正挖掘高分辨率卫星遥感的潜能和优势。

1.2 相关学科简介

摄影测量、计算机视觉等学科已经针对单张或多张像片的几何关系和处理方法等问题开展广泛、深入的研究,并发展了成熟的理论和方法,有些可以直接应用于高分辨率卫星影像的处理,有些则对其具有借鉴意义^{[1][3][4][5]}。

1.2.1 摄影测量

传统摄影测量学是利用摄影机摄影所得的像片,研究和确定被摄物体的形状、大小、位置、性质和相互关系的一门科学和技术。通常在不同位置拍摄同一物体获取影像,然后通过影像处理和分析确定物体的几何特性。摄影测量是一门古老的学科,已有150多年的历史。1851—1859年,法国陆军上校劳塞达特提出和进行交会摄影测量,标志着摄影测量学的诞生。1903年,莱特兄弟发明了飞机,使航空摄影成为可能。随着航空摄影机在第一次世界大战中问世,航空摄影测量开始迅速发展,经历了模拟摄影测量、解析摄影测量和数字摄影测量三个发展阶段。

1. 模拟摄影测量

模拟摄影测量采用光学或机械方法模拟摄影过程,使用模拟测图仪实现摄影过程的几何反转,即使两个投影器恢复摄影时的位置、姿态和相互关系,形成一个比实地缩小了的几何模型,然后在此模型上进行量测,将所得结果输出到绘图桌上,绘制地形图和各种专题图。

2. 解析摄影测量

解析摄影测量利用电子计算机完成摄影测量中复杂的几何解算和大量的数值计算,控制解析测图仪完成几何反转、立体量测等任务,并将结果传送到数控绘图机上绘制地图。在对单张和多张像片几何关系深入研究基础上,人们提出了航带法、独立模型法和光束法等平差方法,发展了解析空中三角测量方法,能够精确测定地面点的空间位置。

3. 数字摄影测量

数字摄影测量利用计算机完成摄影测量与遥感影像的数字化、影像存储和管理,影像处理和分析,生产数字地图、数字高程模型等数字产品。在这一阶段,人们针对立体影像匹配开展了广泛、深入的研究,设计了许多立体匹配算法,实现立体影像的自动匹配。针对影像特征提取开展研究,取得丰硕成果,能够自动或半自动提取道路、桥梁以及房屋等建筑物。

1.2.2 计算机视觉

计算机视觉是研究如何为计算机和机器人开发与人类水平相当的视觉能力的一门学科。计算机视觉系统可以应用于制造、医疗和军事等等领域,能够替代或部分替代人脑活动。作为一门学科,计算机视觉开始于 20 世纪 60 年代,已有 50 年左右历史,它吸引了计算机科学、物理学、数学、生理学和心理学等众多领域学者的研究兴趣,发展了视觉计算理论等理论和方法。

三维感知是人类视觉的重要组成部分,也是计算机视觉的重要研究课题。一般计算机视觉系统采用两个或多个摄像机获取场景的立体影像,通过立体视觉方法获取场景的三维信息。20 世纪 70 年代,马尔等系统概括了心理物理学、神经生理学及临床神经病理学等方面取得的重要成果,提出立体视觉的计算理论,为立体视觉研究和算法设计奠定了理论基础^[22]。20 世纪 80 年代初,Barnard 等归纳和剖析已有立体视觉方法,将立体视觉方法划分为图像获取、相机建模、特征提取、图像匹配、深度确定和内插等六个步骤^[8]。这一剖析对后续研究产生很大影响。相机建模和深度确定涉及单幅和多幅视图的几何关系,这个问题引起了人们很大研究兴趣,在 20 世纪八九十年代,人们以射影几何和向量代数为工具对视图几何关系问题开展了深入研究,在相机模型、两幅视图之间的极线几何(即摄影测量领域中的核线几何)、三幅及更多幅视图之间的几何关系、三维重建的层次方法以及相机的自定标方法等方面取得了系统性研究成果,对立体视觉研究产生深远影响^[17]。同时,人们还针对特征提取和图像匹配开展研究,譬如,人们将图像视差场描述为马尔科夫随机场,将密集匹配归结为马尔科夫随机场最大后验估计问题,为立体匹配问题的描述提供了有效理论框架,在此基础上采用图割算法和置信传播算法求解,取得很好的实验效果,为问题求解找到了有效的工具。

摄影测量和计算机视觉两个学科都是针对单张和多张像片几何关系、三维重建以及立体匹配等立体视觉问题和方法开展了系统研究,两个学科所采用的描述和分析工具略有差异,研究问题的侧重点也不尽相同,但是,它们都对高分辨率卫星遥感影像的几何处理提供了重要的理论和方法基础。

1.3 立体视觉的理论和方法

Barnard 等剖析立体视觉方法,将其划分为图像获取(image acquisition)、相机建模(camera modeling)、特征提取(feature acquisition)、图像匹配(image matching)、深度确定(depth determination)和内插(interpolation)等六个步

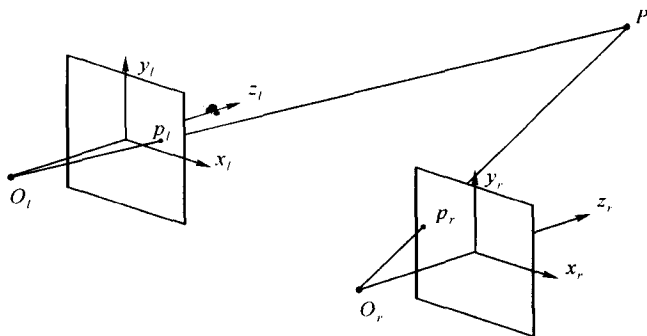


图 1-1 立体视觉示意图

骤^[8],为基于图像的三维重建构建了一个基本框架和流程。

如图 1-1 所示,图像获取步骤在左右视点 O_l 和 O_r 处获取了场景的两幅图像。相机建模步骤建立相机几何模型,相机模型的形式通常已经确定,具体模型参数需要标定,因此,相机建模就是确定相机的定标参数,又称相机定标。以左像为例,相机建模实际上确定由视点 O_l 发射到像素 p_l 的射线 $\overrightarrow{O_l p_l}$ 的空间方位。特征提取步骤从图像中检测出显著特征,显著特征包含丰富纹理信息,为特征点的可靠匹配奠定基础,譬如在左右图像中分别检测出 p_l 和 p_r 。图像匹配步骤建立左图像中特征点和右图像中特征点之间的对应关系,譬如建立左像中的 p_l 和右像中的 p_r 之间的对应关系,它们分别是同一场景点 P 在左右图像中的投影点。深度确定步骤根据建立起来的对应特征点 p_l 和 p_r 以及相机模型确定射线 $\overrightarrow{O_l p_l}$ 和 $\overrightarrow{O_r p_r}$ 的空间方位,交会确定场景点 P 的空间位置。上述步骤重建了稀疏分布的三维场景点,在此基础上,内插步骤根据稀疏场景点内插生成密集分布的场景点,或者确定一些先验几何模型的待定参数,重建几何模型。

三维重建的层次方法则将其分为射影重建、仿射重建及度量重建等不同层次,首先进行射影重建,所恢复场景与真实场景之间存在一个射影变换,然后进行仿射重建,所恢复场景与真实场景之间存在一个仿射变换,最后进行度量重建,所恢复场景与真实场景达到一致。

在摄影测量领域通常将三维重建分为相对定向和绝对定向两个阶段,相对定向恢复立体像对的相对几何关系并重建自由立体模型,绝对定向恢复立体模型的绝对位置和大小。

总体上,分辨率卫星遥感影像的几何处理也采用上述框架,但是,由于影像获取的传感器不同于传统的针孔相机,成像方式不同于中心投影方式,其处理方法也必然有所不同,本书将围绕这一问题展开讨论,介绍新型传感器的成像原理

及其影像的处理方法。

1.4 本书的内容和结构安排

本书介绍高分辨率卫星遥感影像几何处理的理论和方法,包括摄影测量基础知识、线阵 CCD 传感器的成像模型、影像几何校正、核线几何、三维重建以及立体匹配等方面的内容,具体章节安排如下:

第 1 章为绪论,首先介绍高分辨率卫星的发展概况及其在三维空间信息获取中的应用前景,其次介绍摄影测量和计算机视觉等相关学科的研究内容和历史,然后介绍立体视觉的理论和方法,最后给出本书的内容和结构安排。

第 2 章介绍摄影测量基础知识,首先介绍摄影测量中常用的坐标系统及转换方法、摄影测量中常用的投影方法,然后介绍单像解析、双像解析以及解析法空间三角测量等概念和方法。

第 3 章介绍物理传感器模型,首先介绍 CCD 传感器,然后分别介绍线性模型、基于共线方程的传感器模型以及基于仿射变换的传感器模型。

第 4 章介绍通用传感器模型,首先介绍基于多项式的传感器模型,然后介绍基于直接线性变换的传感器模型,最后介绍基于有理函数的传感器模型。

第 5 章介绍影像几何校正,首先介绍影像几何变形的来源,然后介绍几何校正的原理和方法。

第 6 章介绍核线几何,首先介绍框幅式中心投影影像的核线几何,然后介绍线阵 CCD 推扫式影像的核线几何。在介绍核线几何时,分别给出几何和代数模型。

第 7 章介绍三维重建的理论和方法,首先概述三维重建方法,然后分别介绍基于线性模型的三维重建方法、基于仿射变换模型的三维重建方法和基于有理函数模型的三维重建方法。

第 8 章介绍立体匹配方法,首先概述立体匹配方法,然后分别介绍密集匹配和特征匹配方法。

第 9 章介绍线阵 CCD 推扫式影像的立体匹配方法,首先介绍线阵 CCD 推扫式影像的特点,然后分别介绍核线关系的利用和辐射差异的处理等问题和方法。

第2章 摄影测量基础

摄影测量领域采用解析方法描述二维影像点和三维场景点的位置及相互关系,建立了单张像片和多张像片几何处理的理论与方法。解析摄影测量的理论与方法已经成熟,并已成功地应用于生产实践。高分辨率卫星影像几何处理和航空影像几何处理具有相似之处,可以借鉴、解析摄影测量的理论和方法。本章介绍解析摄影测量的基础知识,包括坐标系统及转换方法、投影方法、单像解析、双像解析以及解析法空中三角测量等内容。

2.1 空间坐标系

为描述像点和物点的空间位置及其关系,首先必须建立空间坐标系。总体上,空间坐标系分为两大类:一类用于描述像点的位置,称为像方空间坐标系;另一类用于描述物点的位置,称为物方空间坐标系。

2.1.1 像方空间坐标系

像方空间坐标系可以分为像平面坐标系、像空间坐标系和像空间辅助坐标系。

1. 像平面坐标系

像平面坐标系用于描述像点在像片平面上的位置,对于摄影像片,坐标原点和坐标轴通常由框标所确定。如图 2-1 所示,连接对边框标,以两条连线作为 x 轴和 y 轴、以连线交点作为坐标原点,就建立了像平面坐标系。

2. 像空间坐标系

像空间坐标系用于描述像点的空间位置,坐标原点和坐标轴通常由摄影中心和摄影方向所确定。如图 2-2 所示,以摄影中心 S 为坐标原点,选择 x 轴和 y 轴分别平行于像平面坐标系的 x 轴和 y 轴,选择 z 轴与主光轴(即摄影方向)重合,并与 x 轴和 y 轴构成右手坐标系,就建立了像空间坐标系。

利用像空间坐标系可以描述像点在三维空间中的位置,可以变换到物方空间坐标系中与物点建立对应关系。但是,由于不同位置拍摄所得像片的姿

态不同,每张像片的像空间坐标系统相互不平行,不同坐标系统的坐标需要换算,相对比较麻烦。为此,通常建立像空间辅助坐标系作为过渡坐标系。

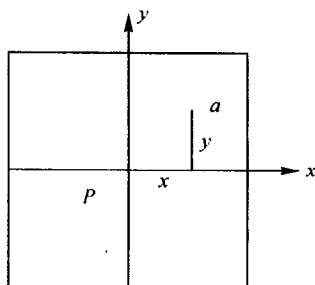


图 2-1 像平面坐标系

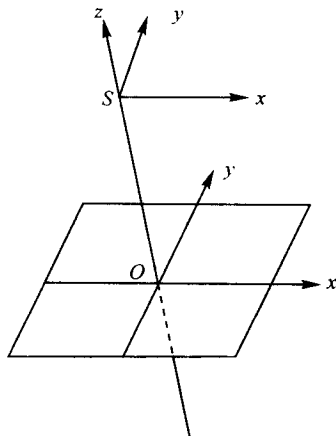


图 2-2 像空间坐标系

3. 像空间辅助坐标系

像空间辅助坐标系用于描述像点空间位置,是像空间坐标系统和物方空间坐标系统以及不同像片像空间坐标系统之间的过渡坐标系,坐标原点仍然选在摄影中心 S ,坐标轴系的选择通常有三种方法。第一种方法取铅垂方向为 Z 轴,航向为 X 轴,构成右手直角坐标系,如图 2-3(a)所示。第二种方法取每条航线内第一张像片的像空间坐标系作为像空间辅助坐标系,如图 2-3(b)所示。第三种方法取每个像片对的左片摄影中心为坐标原点,摄影基线方向为 X 轴,以摄影基线及左片主光轴构成的面作为 XZ 平面,构成右手直角坐标系,如图 2-3(c)所示。

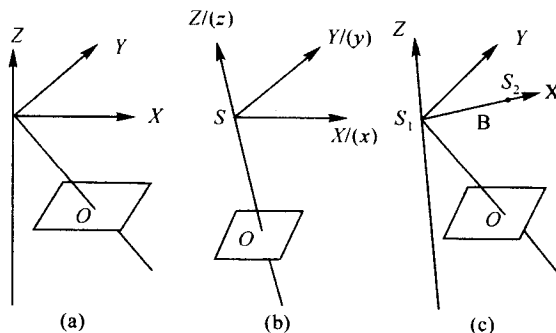


图 2-3 像空间辅助坐标系

2.1.2 物方空间坐标系

物方空间坐标系用于描述物点的空间位置,包括摄影测量坐标系、地面测量坐标系和地面摄影测量坐标系三种坐标系。

1. 摄影测量坐标系

如图 2-4 所示,将像空间辅助坐标系 $S\text{-}XYZ$ 沿着 Z 轴反方向平移至地面点 P ,得到的坐标系 $P\text{-}X_P Y_P Z_P$ 称为摄影测量坐标系。

2. 地面测量坐标系

地面测量坐标系是指地图投影坐标系,是测图所用的高斯—克吕格投影的平面直角坐标系和高程系,用 $T\text{-}X_t Y_t Z_t$ 表示,如图 2-4 所示,地面测量坐标系为左手系。

3. 地面摄影测量坐标系

地面摄影测量坐标系是上述两种坐标系之间的一种过渡坐标系,用 $D\text{-}X_{ip} Y_{ip} Z_{ip}$ 表示,如图 2-4 所示,地面摄影测量坐标系是右手直角坐标系,其坐标原点在测区内某一地面点上, X_{ip} 轴为水平方向且与 X_P 轴方向大致相同, Z_{ip} 轴为铅垂方向。

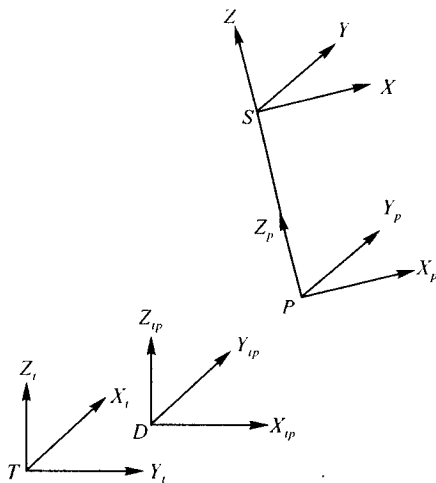


图 2-4 物方空间坐标系

2.2 内外方位元素

空间坐标系为描述像点和物点的空间位置提供了参照系,也为描述像点

和物点的关系奠定了基础。为描述像点与物点的数学关系,首先必须引入空间方位元素的概念,以描述不同坐标系间的相对关系。

空间方位元素用于描述摄影中心与像片的位置和姿态,其中,内方位元素用于描述摄影中心和像片之间相对位置关系,外方位元素用于描述摄影中心与像片在物方空间坐标系统中的位置和姿态。

1. 内方位元素

如图 2-5 所示,摄影中心 S 沿主光轴方向在像平面上的投影点称为像主点,像主点在像平面坐标系中的坐标记为 (x_0, y_0) ,摄影中心 S 沿主光轴方向到像片的距离称为主距,记为 f ,上述三个参数构成了内方位元素,内方位元素取决于相机内部结构。

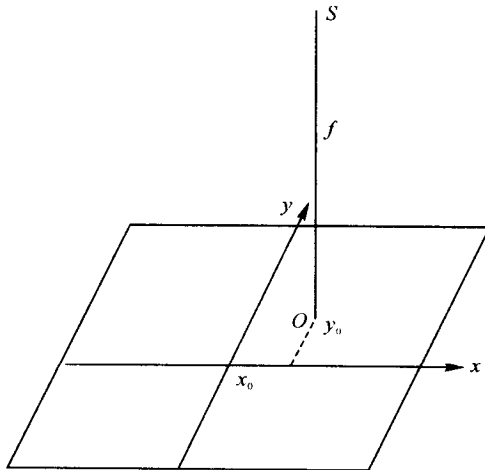


图 2-5 内方位元素

2. 外方位元素

摄影中心 S 在物方空间坐标系中的坐标记为 (X_s, Y_s, Z_s) ,它们构成了外方位元素的三个直线元素,用于描述摄影中心的空间位置。给定像空间辅助坐标系,先绕其第一轴旋转一个角度,其余两轴的空间方位随同变化,再绕变动后的第二轴旋转一个角度,则可以恢复摄影机主光轴的空间方位,最后绕经两次变动后的第三轴旋转一个角度,即像片在其自身平面内绕像主点旋转一个角度,就可使变动后的坐标系与像空间坐标系重合。这三个角度构成了外方位元素的三个角元素,用于描述像片的空间姿态。角元素有多种表达形式,如图 2-6 所示是比较常用的 $\varphi\omega\kappa$ 系统,像空间辅助坐标系 $S-XYZ$ 绕第一轴(Y 轴)旋转 φ 角,然后绕旋转后的第二轴(X 轴)旋转 ω 角,最后绕旋转后的第三轴(Z 轴)旋转 κ

角,最终与像空间坐标系重合。三个直线元素和三个角元素组成外方位元素,外方位元素取决于相机位置和姿态。

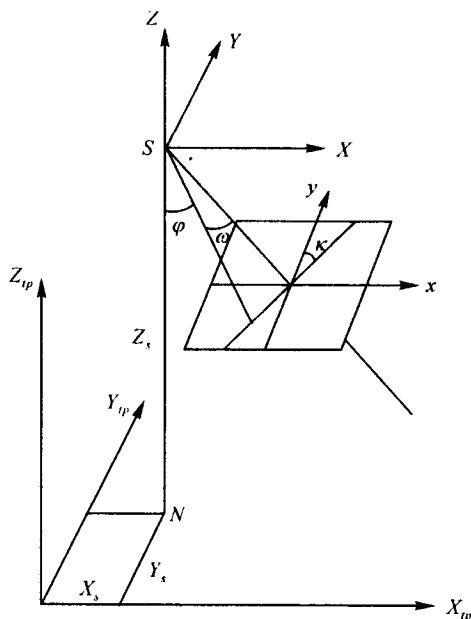


图 2-6 外方位元素

2.3 空间直角坐标变换

空间坐标系为像点和物点建立了参照系,空间方位元素描述了不同坐标系的相对关系,同一点在不同坐标系中有不同坐标,它们可以通过空间直角坐标变换进行相互转换。

2.3.1 空间直角坐标变换关系式

如图 2-7 所示, $S-XYZ$ 和 $S-xyz$ 是坐标原点互相重合的两个直角坐标系,记点 P 在两个坐标系中的坐标分别为 (X, Y, Z) 和 (x, y, z) ,根据解析几何知识,它们存在如下关系式:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2-1)$$