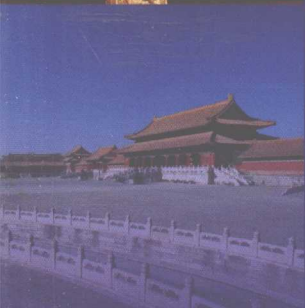




©尚涛 侯文广 宋靖华 张霞 编著

古代建筑保护 数字化技术

GUDAI JIANZHU BAOHU SHUZHUA JISHU



湖北科学技术出版社

本书受国家自然科学基金项目资助(编号 50478058)和(编号 50608061),国家 863 项目资助(编号 2006AA12Z151)

古代建筑保护 数字化技术

GUDAI JIANZHU BAOHU SHUZHUA JISHU

◎尚涛 侯文广 宋靖华 张霞 编著



湖北科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

古代建筑保护数字化技术 / 尚涛等编著. —武汉: 湖北科学技术出版社, 2009.8

ISBN 978-7-5352-4387-4

I. 古… II. 尚… III. 数字技术—应用—古建筑—保护
IV. TU-87

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 133616 号

5

责任编辑: 高诚毅

封面设计: 喻 杨

出版发行: 湖北科学技术出版社

电话: 027-87679468

地 址: 武汉市雄楚大街 268 号

邮编: 430070

(湖北出版文化城 B 座 12-13 层)

网 址: <http://www.hbstp.com.cn>

印 刷: 荆州市翔羚印刷有限公司

邮编: 434000

787 × 1092 1/16

11.25 印张

260 千字

2009 年 8 月第 1 版

2009 年 8 月第 1 次印刷

定价: 48.00 元

本书如有印装质量问题 可找本社市场部更换

序 言

历史古建筑延续了地域的历史文脉,是历史文化根源的具体体现,历史文化建筑历来就是一个民族、一个国家文明的重要组成部分。中国以木材为主要建筑材料的独特建筑体系从简单个体到城市布局,都有自己完善的做法和制度,形成一种完全不同于其他体系的建筑风格和建筑形式,是世界古代建筑中延续时间最久的一个体系。该体系在历史上还影响到日本、朝鲜和东南亚的一些国家,在技术和艺术上都达到了很高的水平,既丰富多彩又具有统一的风格,为我们留下了极为丰富的经验。特别是一些古老城市和聚落是当地居民在长期生活中按照自然的秩序形成的,相比较于现代城市,这些城市的城市空间结构有着非常优美的韵律,街巷和开放空间充满着浓厚的生活气息和人情味。学习这些宝贵的遗产,研究这些历史建筑和城市空间结构对建筑的设计创作和现代城市的建设发展都有着历史意义。

应该看到的是,在自然因素的影响和现代生活的冲击下,这些珍贵的历史建筑和城市空间正遭受各种各样的破坏从而慢慢消失。自然因素的影响:全球变暖,气候恶劣以及地震、台风等极端天气现象越来越频繁;工业排污导致大气污染,对建筑物造成严重侵蚀。人为因素的破坏:战争、火灾、文物走私所导致的历史建筑文化的破坏有历史为鉴;地方政府片面追求经济利益所造成的过度旅游开发也是对历史建筑遗产保护非常不利的因素。由此可见,古建保护现状极为严峻,必须采取积极有效的手段进行保护和利用。

保护和利用过程需要对古建筑进行维护、整理和修复,同时也需要保护或恢复历史街区的空间格局与尺度。国家重大古建筑在大规模修复前要求进行精确的测绘工作,以取得较完备的科学记录档案,为古建筑规划保护和修复提供第一手资料,同时也是研究中国古建筑史和建筑理论的重要资料。

传统的由建筑师手绘的结构图和由地面近景摄影测量方法测出的结构图都能够表达建筑的关键部位和整体结构,但由于技术手段的局限,难以对古建筑进行快速测绘和对整体立体空间进行清晰的表达。据文物部门统计,我国目前被列入保护范围的古建筑群有近 30 万处,古建筑的保护、抢救及修复的工作量非常大,而传统的建筑测绘和资料整理的方法和技术手段远远不能满足古建筑保护的实际需要。

数字化技术的高速发展为古建筑的保护和利用指明了新的发展方向,新型传感器、地面激光扫描仪和配套的专业数码相机融合了激光扫描及遥感等技术,可以同时获取空间三维点云和彩色数字图像两种数据,扫描点空间定位精度达到 5~10mm 的扫描精度。近年来欧美等地应用涉及到城市规划、资源调查、灾害管理、工程设计及国防等方面,特别在城市三维景观、古建重建、虚拟现实与仿真等方面。

古建筑在今天,除了保护,还涉及到建筑信息的保存。由于城市建设的快速发展,有些古建筑面临拆迁或拆除的问题,采用数字技术建立虚拟的三维仿真模型,把这些优秀的历史文化留给后代子孙,为古建筑的信息保存提供了一种新的思路和发展方向。

激光扫描技术可以快速重构整个建筑的全方位立体空间,完整描述建筑物的每一个关键

要素,因此可以为古建筑保护与更新提供真实准确的三维模型。保护方案依据真三维模型来制订,不仅提高工作效率,而且修复计划的精细程度和表现效果大为提高。因此,利用地面激光扫描仪进行古建筑的保护具有重要现实意义,也是一项高科技的文化工程。而对三维激光扫描数据处理、组织及古建筑三维重构技术和方法研究的成功应用是古建筑保护的关键。

利用数字技术除了可以对现有的古代建筑进行测量、存档、建模、展示之外,对于历史上存在过现在已消失的古代建筑也可以根据文献、图片资料将其快速地模拟出来,建立三维仿真模型,重现原有风貌,为古代建筑历史的研究提供了有效的新途径。

1. 古建筑复原

古建筑复原研究主要针对业已破损的甚至是已经消失的历史文化建筑遗迹,从历史文献、古地图、诗歌和绘画中获取信息资源,进行古建筑复原。由于历史的不可逆转性,这些有形和无形的文化资源成为我们重现珍贵历史建筑遗迹和历史场面的唯一并重要的依据。

数字技术的发展为古代建筑文化遗产资源的仿真重建和虚拟展示提供强大的技术支持。利用数字技术对文化遗产进行数字化记录,即文化遗产数字化(digital archives)的研究与实践开始于 90 年代初期。最初这项研究是用来记录和存储一些珍贵的馆藏,如法国的卢浮宫博物馆、意大利的乌菲奇博物馆、日本国立西洋美术馆、国立科学博物馆等欧美地区和日本的一些博物馆,本着将丰富的馆藏艺术作品用数字的形式进行记录和保存,并最终实现资源共享的愿望,最早利用 CD/DVD 的形式对馆藏品进行了数字化信息转换和保存,为学者和观众对古典艺术作品的研究和观赏提供了前所未有的便利。90 年代中期以来,虚拟现实、3D 扫描、动作捕捉、网络等技术开始普及,地理信息技术蓬勃发展,历史建筑遗产数字化的形态也开始从静态图片转向立体和动态影像,并且关联了建筑的地理空间信息,超越了时间、空间等物质形态的限制,成为一种新型的物质遗产数字化形式。

美国加州大学洛杉矶分校的城市仿真小组是世界上最为著名的城市仿真小组,一直致力于虚拟洛杉矶城市仿真的应用研究,应用 Multigen Creator 和 Vega 等软件至今已成功完成十多个城市仿真项目。他们还与来自全球的多名专家历时 10 年,运用电脑技术首次完整模拟出公元 320 年罗马帝国鼎盛时期的面貌。这一“恢复”罗马古城原貌的计划耗资 200 万美元,历时 10 年。参加者包括来自美国弗吉尼亚大学和加州大学洛杉矶分校的考古学家、建筑学家、电脑专家,以及来自意大利、德国和英国的研究人员。在公开的数字模拟图上,人们不仅能看到罗马圆形竞技场的内部,还可以从空中“俯瞰”凯旋门顶端的浅浮雕和碑铭,真切感受到古罗马帝国的辉煌。

这项模拟计划的牵头人、美国弗吉尼亚大学专家弗里希介绍说,通过对罗马城的激光扫描,并参考考古学家的意见,他们几乎“重建”了公元 320 年时的古罗马城,当时罗马国王康斯坦丁重修了罗马城 7 000 座建筑,城墙长 21km,城内居民达 100 万人。同时,模拟图还再现了城内 30 座建筑的内部景象,包括参议院、圆形竞技场和长方形大会堂,它们内部全是壁画和装饰。

另外,专家们还“高度精确”地恢复了那些几乎已完全毁坏的建筑,比如维纳斯窗体顶部窗体底部、罗马神庙、圆形竞技场附近的梅塔·苏丹斯喷泉等。目前,人们可以在网上看到模拟图的片断。不过,由于允许数千名用户同时访问需要强大的功能,网上暂时只提供图片和视频。

新加坡国立大学早在 20 世纪 90 年代就进行了古代唐城的虚拟仿真研究。

2. 三维模型重建

该技术主要针对现存珍贵的、有保护价值的历史建筑,提供建筑物的三维数字模型重建。

数字图像与近景摄影测量技术的发展为古建筑的保护、维修提供了一种新的先进手段,并将在这个领域中发挥越来越大的作用。历史悠久、数量巨大的古代建筑文化遗产的保护与维修工作是一项艰巨的任务,古建筑的保护、维修首先需要较为完整的基础资料,而准确、真实的图像资料是其中非常重要的环节。以往图像资料的收集大多采用测绘、照相、录像等综合性手段,这不仅需要较多的人力投入,图像的整体性、准确性因受多种因素的影响,也存在一定的局限。

在古建筑保护或重建过程中,构建建筑物构件的三维模型是一项基础工作。因而迅速而准确地建立古建筑构件的 DSM 是关键问题,但对于外型奇特、表面复杂的构件,用常规方法是很困难的,甚至是不可能的。数字近景摄影测量方法简捷可行,通过在作业现场,用数码照相机对构件摄影获取其数字影像,再用摄影测量软件 PhotoModeler 获取构件特征点的三维坐标,并转入 AutoCAD 建立构件的 DSM,从而对古建构件进行快速有效的三维重建(李振涛,许妙忠,2007)。PhotoModeler-AutoCAD-DSM 方法,在古建筑物重建工程中获取一些复杂表面构件 3D 模型,逼真地再现这些构件的空间艺术造型,组装到直接用 AutoCAD-DSM 构建的建筑模型上取得了令人满意的整体效果。在实际作业过程中,通过多余观测的分析,得知该方法的相对精度在 $1/200 \sim 1/400$ 之间,而中国古建筑测量的相对精度一般允许为 $1/100$ 。实践证明该方法可行、快捷且可靠。

在国内,据“故宫古建筑数字化测绘”项目负责人王宴民教授介绍,经过近 2 年的探索和实践,该院采用三维激光测绘技术,采集了完整的统一坐标系的高密度、高精度的太和殿三维模型数据;构建了太和殿的现状彩色立体模型;太和殿的每架梁、沿桐柱和屋脊都制作了现状剖面图;制作了太和殿的正射影像图;用逆向工程的方法构建了太和门的大木结构构件仿真模型;制作了太和殿的等值线图。

根据所要建模的对象及其应用的不同。

3. 古代建筑构件形态演变

该研究对台基、石雕、门窗、柱、柱础、屋檐、斗拱、梁、檩、屋顶等典型建筑构件的历史形态演变进行分析。这对于建筑历史是一个非常重要的研究内容。

应用实例——对斗拱的形态演变分析

斗拱是中国古代建筑中有代表性的一种构件,而且其在中国古代建筑历史上的变化也最为明显,选取斗拱为代表,利用数字建模技术对各个朝代的斗拱构件建立三维仿真模型,通过虚拟现实技术生动真实的可视化再现,对其进行比较研究,有助于了解中国古代各个时期的建筑构造特点,更好的进行古代建筑保护和历史文化发现。

1) 斗拱起源

斗拱是中国古代建筑上特有的构件,是由方形的斗、升、拱、翘、昂组成。它的产生和发展有着非常悠久的历史。从 2000 多年前战国时代采桑猎壶上的建筑花纹图案,以及汉代保存下来的墓阙、壁画上,都可以看到早期斗拱的形象。中国古典建筑最富有装饰性的特征往往被皇帝攫为己有,斗拱在唐代发展成熟后便规定民间不得使用。

斗拱用于柱顶、额枋和屋檐或构架间,它的产生和发展有着非常悠久的历史。宋《营造法式》中称为铺作,清工部《工程做法》中称斗科,通称为斗拱。斗是斗形木垫块,拱是弓形的短木。拱架在斗上,向外挑出,拱端之上再安斗,这样逐层纵横交错叠加,形成上大下小的托架。斗拱最初孤立地置于柱上或挑梁外端,分别起传递梁的荷载于柱身和支承屋檐重量以增加出

檐深度的作用。唐宋时,它同梁、枋结合为一体,除上述功能外,还成为保持木构架整体性的结构层的一部分。明清以后,斗拱的结构作用退化,成了在柱网和屋顶构架间起主要装饰作用的构件。

斗拱的种类很多,形制复杂。按使用部位分,它可以分为内檐斗拱、外檐斗拱、平座斗拱。外檐斗拱中,又可分为柱头科斗拱(用于柱头位置上的斗拱)、角科斗拱(用于殿堂角上的斗拱)和平身科斗拱。

2) 功能

斗拱在中国古建筑中起着十分重要的作用,主要有三个方面:

(1) 它位于柱与梁之间,由屋面和上层构架传下来的荷载,要通过斗拱传给柱子,再由柱传到基础。因此,它起着承上启下,传递荷载的作用。

(2) 它向外出挑,可把最外层的桁檀挑出一定距离,使建筑物出檐更加深远,造型更加优美、壮观。在它成型之后很长一段时间内,被作为构件大小的基本尺度(“模数”制)后来的斗拱逐渐变为装饰(后来采用砖墙,出檐变近许多,作用减少),也是区别建筑等级的标志。越高贵的建筑斗拱越复杂、繁华。

(3) 它构造精巧,造型美观,如盆景,似花篮,又是很好的装饰性构件。

3) 加固措施

(1) “斗”劈裂为两半,断纹能对齐的,粘牢后可继续使用;断裂不能对齐的或严重糟朽的应更换;斗耳断落的,按原尺寸式样补配,粘牢钉固。斗“平”被压扁的超过 0.3cm 的可在斗口内用硬木薄板补齐,要求补板的木纹与原构件木纹一致,不超过 0.3cm 的可不修补。

(2) “拱”劈裂未断的可灌缝粘牢,左右扭曲不超过 0.3cm 的可以使用,超过的应更换。

(3) 昂嘴断裂,甚至脱落,裂缝粘接与拱相同,昂嘴脱落时,照原样用干燥硬杂木补配,与旧构件相接,平接或榫接。

4. 营造法式分析

中国古代建筑体系庞大而复杂,每个建筑构件都自成一体,木构件之间的榫卯联系更是无限繁复,建筑物之间又用看似简单的层层院落形成独具特点的中国式建筑群落,这些复杂的建筑构造工艺和空间组合艺术构成了浩瀚精美的中国古代建筑文化,很多构造工艺现已失传,我们无法一一获知。因此,仅仅借助于现有的历史文献资料和建筑实物留存,不足以全面理解、分析和研究中国古代建筑的营造法式。

目 录

第 1 章	近景摄影测量学	(1)
1.1	概述	(1)
1.2	近景摄影测量的基本解析关系	(3)
1.3	近景摄影测量的解析处理方法	(10)
1.4	摄影机检校	(21)
1.5	结构光测量	(37)
1.6	数字影像处理	(40)
1.7	摄影测量的应用实例	(54)
第 2 章	激光扫描系统及应用	(63)
2.1	概述	(63)
2.2	三维激光扫描仪的原理	(65)
2.3	激光扫描数据的一般问题	(67)
2.4	激光点云的自动拼接	(67)
2.5	数据约简	(71)
2.6	曲面重建	(72)
2.7	纹理重建	(74)
第 3 章	古代建筑复原方法	(77)
3.1	三维数据获取及建模	(77)
3.2	快速成型	(81)
3.3	三维场景建立	(82)
第 4 章	视景仿真系统	(89)
4.1	视景仿真系统结构	(89)
4.2	视景仿真系统的环境	(90)
4.3	视景仿真系统关键技术	(92)
第 5 章	视景仿真系统的设计与实现	(98)
5.1	视景仿真系统功能设计	(98)
5.2	视景仿真平台 VEGA PRIME	(100)
5.3	VC6.0 MFC 环境下视景仿真系统的实现	(107)
5.4	视景仿真系统的功能实现	(110)
5.5	以五祖寺为例的三维视景仿真系统	(113)
第 6 章	视景仿真系统的数据库链接	(115)
6.1	数据库链接的意义和重要性	(115)
6.2	数据库访问接口模式	(115)

6.3	数据库链接的实现	(119)
第 7 章	《营造法式》的数字化仿真研究	(123)
7.1	《营造法式》概述	(123)
7.2	《营造法式》数字化仿真研究的意义	(126)
7.3	古建搭建过程分析	(128)
第 8 章	古建筑群布局辅助设计	(131)
8.1	导言	(131)
8.2	古建筑视景仿真系统介绍	(131)
8.3	中国古建筑群布局辅助设计	(132)
第 9 章	布局案例分析-黄梅五祖寺	(141)
9.1	导言	(141)
9.2	禅寺布局的演变	(141)
9.3	五祖寺概况	(142)
9.4	五祖寺场景虚拟漫游实现过程	(143)
9.5	五祖寺布局分析	(148)
9.6	五祖寺布局更新设计	(153)
第 10 章	建筑评价分析方法	(158)
10.1	建筑构件剖切分析	(158)
10.2	建筑审美评价数学模型的研究	(160)

第 1 章 近景摄影测量学

1.1 概述

1.1.1 摄影测量的基本原理

摄影测量的基本原理如图 1-1 所示,概括为:基于被摄目标在不同方位获取的多幅影像重构其三维几何模型,是摄影测量和计算机视觉研究中立体视觉方法的基本原理,通过计算同名像点在不同视角影像中的视差,目的是恢复物体表面形状或者恢复摄像机和物体之间的相对空间关系。

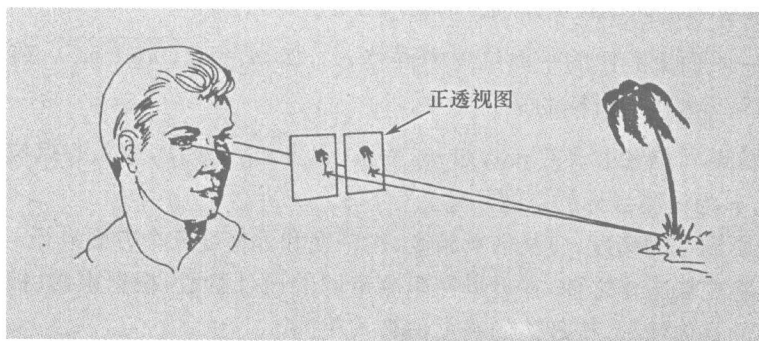


图 1-1 摄影测量的基本原理

1.1.2 近景摄影测量的定义

近景摄影测量是摄影测量与遥感(photogrammetry and remote sensing)学科的一个分支。传统认为:通过摄影的手段确定非地形目标的外形和运动状态的学科称为近景摄影测量(close-range photogrammetry),包括工业、生物医学、建筑学以及其他科技领域中的各类目标是其研究对象。随着技术的发展,现在人们认为摄影距离小于 100m 的摄影测量均称之为近景摄影测量。国际上把近景摄影测量的主要用途归结为三个方面:

- (1) 古建筑与文物摄影测量(architectural and archaeological photogrammetry);
- (2) 生物医学摄影测量(bio-medical photogrammetry);
- (3) 工业摄影测量(industrial photogrammetry)。

1.1.3 近景摄影测量的特点

(1) 能够在瞬间获取被摄目标表面大量物理信息和几何信息的手段,作为信息载体的影像容有被测目标最多的信息,特别适合于点众多的目标。

(2) 它是一种非接触性测量手段,不伤及目标,不干扰测量目标的自然状态,可以在恶劣的条件下(如水下、放射性强、有毒缺氧以及噪音)作业。

(3) 它是一种适合动态物体外形和运动状态测定的手段。

(4) 目标的多样性,凡是可以获取其影像的各类目标,都可以使用相关技术,以某种精度测定其形状、大小和运动参数。

(5) 就目前发展而言,它是一种基于数字信息和数字影像技术以及自控技术的手段,正在日益广泛地深入到工业生产流程中,成为工业产品分类、导向、监测、装配和自动化生产的重要组成部分。

(6) 可提供基于三维空间坐标的各种产品,包括各类数据、图形、图像、数字表面模型以及三维动态序列影像等。

1.1.4 近景摄影测量的精度

衡量精度的基本指标是被测点的坐标中误差(m_x, m_y, m_z)。依据不同用户的需要,指标可能有以下几种变化:

(1) 只关心某一方向的坐标中误差,如 m_x 或 m_y 或 m_z ,或关心某一方向的点位相对中误差,如 m_z/Z , Z 为被测目标在其坐标轴方向的尺寸。

(2) 关心某一平面上点位的平面位置中误差 m_s ,如 $m_s = \sqrt{(m_x^2 + m_y^2)}$,或关心平面位置相对中误差 m_s/S , S 为被测目标的平面尺寸。

(3) 关心点位空间位置中误差 m_p ,如 $m_p = \sqrt{(m_x^2 + m_y^2 + m_z^2)}$,或关心点位的空间位置相对中误差 m_p/T , T 为被测目标的空间尺寸。

估计近景摄影测量的精度,应从估算精度、内精度和外精度三个方面进行:

估算精度是在现场工作之前,在近景摄影测量网的设计阶段,根据摄影、控制、网形、设备和一些设计参数的具体情况,按理论的精度估算式获得。

内精度是在摄影测量的数字处理阶段,按照解算未知数的方程组的健康程度,直接计算而得,内精度的容易获取是经常使用此方法的原因,但内精度在极大程度上仅与摄影测量网形有关,即仅与解算未知数的线性方程组的构成有关,它不能客观地反映测量结果的质量,大多数的情况下其精度指标优于实际精度。

外精度检查方法是一种能给出客观精度的评价方法,最常用的方法是使用较大量的多余约束条件,包括多余的控制点或多余的相对控制。依据控制点的“实测坐标”,使之与近景摄影测量坐标相比较,并统计坐标的中误差和坐标误差分布。“实测坐标”是指真值或根据高一等级的测量方法获得。这些控制点的数量应该足够多,且分布在被测目标各个有代表性的部位。多余的相对控制,可用于精度检查,如在目标上布置的多条已知长度,就是一种简单又比较客观的检验方法。这些已知长度应尽量长,布置在坐标轴的不同方向。

1.1.5 摄影测量与计算机视觉

随着计算机科学与技术的发展,摄影测量由基于精密光学、机械仪器的模拟摄影测量,经解析摄影测量发展为数字摄影测量。数字摄影测量不但继承了解析摄影测量中的严密解算理论,而且重点研究如何将计算机视觉和模式识别理论应用于摄影测量,实现自动或半自动识

别,最终达到摄影测量的自动化。数字摄影测量以数字或数字化后的影像作为处理对象,以计算机视觉对影像框标和同名点的识别来代替人眼的观测从而自动获取目标点的三维信息。尽管发展阶段不同,基本原理都是通过双目视觉计算同名点的视差,然后基于三角测量的原理获取目标点的三维信息。而计算机视觉是较为年轻的学科,20 世纪 60 年代中期,Robert 把对二维图像的处理推广到三维景物的分析,标志着计算机立体视觉的诞生,随后以 Marr 为代表的研究者提出一整套从图像恢复物体的三维形状的方法,对计算机立体视觉的发展产生了巨大的影响。尽管二者的出发点、处理对象、处理流程和算法等存在一定差异,但二者存在密切的联系,问题的本质是一致的。由于发展历史的不同,计算机视觉领域中研究的许多问题早已被摄影测量领域所熟知,但是计算机视觉领域又发展了一套较为完善的理论体系,将研究对象放置在射影空间中进行描述和研究,更加符合人类认识事物的习惯,而摄影测量研究领域直接在欧氏空间中进行问题的讨论,相比较而言,计算机视觉的理论体系表达更加简洁。

1.2 近景摄影测量的基本解析关系

1.2.1 几种常用坐标系

本文中坐标系的定义如图 1-2 所示,内容如下。

(1) 像平面坐标系 Oxy 。该坐标系位于一张平面上,通常用像平面的中心点作为坐标原点, x 轴和 y 轴是量测像点坐标时定义的相互垂直的坐标轴,该坐标系唯一确定了像点在像平面上的位置。

(2) 物方空间坐标系 $D-XYZ$ 。表示物体在空间位置的参考坐标,如图 1-2 所示,某物方点 A 的空间坐标为 (X, Y, Z) 。

(3) 像空间坐标系 $S-xyz$ 。该坐标系以摄站点(或投影中心) S 为坐标原点,摄影机的主光轴 SO 为坐标系的 z 轴,像空间坐标系的 x, y 轴与像平面坐标系的 x, y 轴平行,像点在该坐标系中的坐标为 $(x, y, -f)$ 。

(4) 像空间辅助坐标系 $S-XYZ$ 。该坐标系以摄站点(或投影中心) S 为坐标原点, X, Y, Z 轴分别与物体空间坐标系的 X, Y, Z 平行,该坐标系是物方空间坐标系 $D-XYZ$ 和像空间坐标系 $S-xyz$ 之间的一种过渡坐标系。

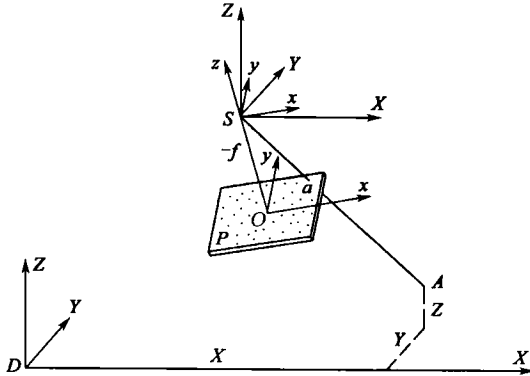


图 1-2 近景摄影测量中常用的几种坐标系

1.2.2 像片的内外参数

像片的内方位元素和外方位元素是确定像片(及光束)在物方空间坐标系 $D-XYZ$ 中的位置和朝向的要素。像片的内方位元素是恢复摄影时光束形状的要素;像片的外方位元素是确定此光束在物方空间坐标系中位置与朝向的要素。

1) 内方位元素

恢复摄影时光束形状的要素称为像片的内方位元素。内方位元素是确定摄影中心 S 和所摄像片 P 相对位置关系的要素,依据此相对位置即可恢复摄影时光束的形状。如图 1-3 所示,像主点在像平面坐标系中的坐标为 (x_0, y_0) ,主距为投影中心到像平面的垂直距离 f ,称之为像片 P 的内方位元素。借助于内方位元素可以唯一确定摄影中心与所摄像片之间的位置关系,即恢复光束(光线 $S_a, S_b, S_c, \dots$)在摄影时的形状。

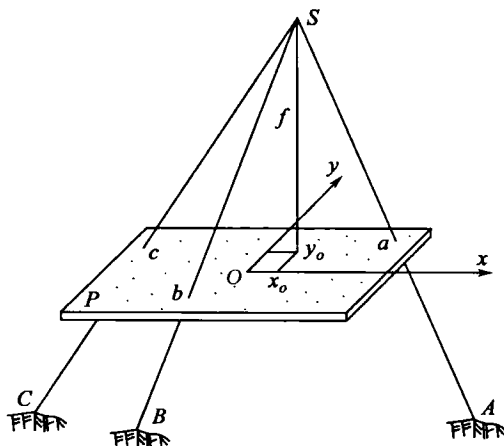


图 1-3 内方位元素的定义

2) 外方位元素

外方位元素是确定光束在给定物方空间坐标系 $D-XYZ$ 中位置和朝向的元素。外方位元素共有 6 个,3 个直线元素和 3 个方位角元素,线元素用投影中心的坐标值 (X_s, Y_s, Z_s) ,用以形容投影中心 S 在物方空间坐标系 $D-XYZ$ 中的位置;三个角元素表示光束在物方空间坐标系中朝向,如图 1-4 所示。

一般习惯采用以 Y 为主轴的 φ, ω, κ 转角系统,图中辅助坐标系 $S-XYZ$ 与物方空间坐标系 $D-XYZ$ 平行。过 y 轴以及主点光线 S_o 作平面 ω ,此平面 ω 与平面 $S-XZ$ 交于直线 Se' ,此平面 ω 与像平面 P 交于 $e'e''$ 。以角度 φ 和角度 ω 表示主光轴 S_o 在物方空间坐标系中的朝向,而以角度 κ 表示光束相对于主光轴 S_o 的方位,即相对于主点光线 S_o 所旋转的角度。其中, φ 是自直线 Sn 到 Se' 之间的夹角。这里,直线 Sn 与 Z 轴重合,但其方向与 Z 轴的正方向相反。角度 ω 是自直线 Se' 起到主点光线 S_o 之间的夹角。角度 κ 是直线 oe'' 起至像片坐标系 $o-xy$ 的 y 轴之间的夹角。

平面 ω 与平面 $S-xz$ 相垂直, Se' 是主光轴 SO 在平面 $S-XZ$ 内的投影,平面 ω 与像片面 P 相垂直。角度 φ 的转轴是 Sy ,从此 y 轴正方向看起来,顺时针旋转时 φ 角的角值增大。像片量测时所取 y 轴与 Y 轴在像片上投影线之间的夹角定义为 κ 角。角度 ω 的转轴 x_k 在平面 $S-XZ$ 内,它与 x 轴之间的夹角为 φ ,从此轴 x_k 的正方向看过去,逆时针旋转时 ω 角的角值增大。角度 k 的转轴时主光轴 SO ,以 k 角表示像片上的 y_k 轴(即 $e'e''$)与量测像片所选取的坐标轴 y 之间的夹角,从点 S 看下去,逆时针旋转时 κ 角值增大。

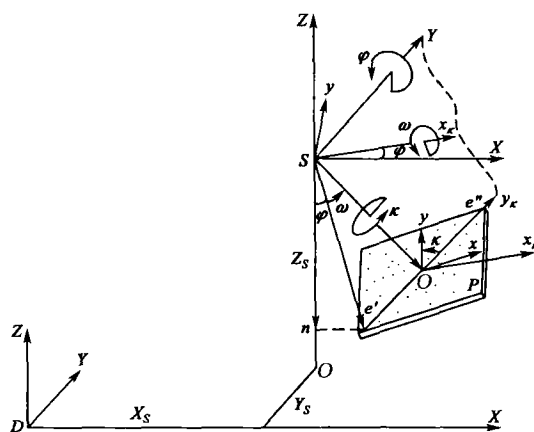


图 1-4 外方位元素的定义

1.2.3 共线条件方程式

共线条件方程式是描述像点、投影中心以及物方点应位于一直线上的一种条件方程式,是摄影测量中最重要和最基础的解析关系式。如图 1-5 和 1-6 所示,已知某像点 a 在像空间坐标系 $S-xyz$ 内的坐标 $(x, y, -f)$, 该像点在像空间辅助坐标系 $S-XYZ$ 中的坐标 (u, v, w) 。

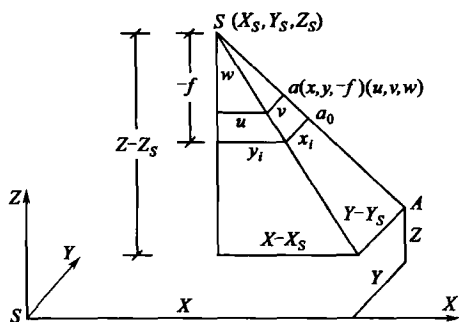


图 1-5 像点 a 与对应点 A 的坐标关系

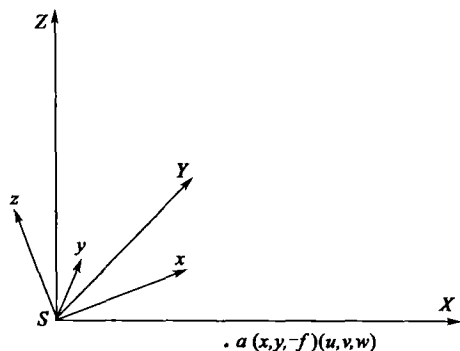


图 1-6 像点 a 在两坐标系中的坐标

从坐标系 $S-xyz$ 到坐标系 $S-XYZ$ 要经过顺序旋转 3 个角度 $(\varphi, \omega, \kappa)$ 得到, 上述图中的各角度值均为正值。像点 a 在坐标系 $S-x_k y_k z_k$ 与在坐标系 $S-xyz$ 之间的坐标关系式(图 1-7 所示)为:

$$\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \mathbf{R}_k \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} \quad (1-1)$$

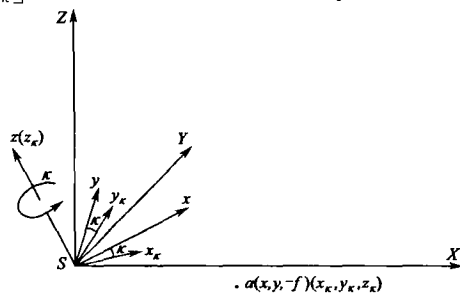


图 1-7 坐标 (x_k, y_k, z_k) 与坐标 $(x, y, -f)$ 间的变换

由于 z_k 轴与 z 轴为同一轴,故此方向上坐标值没有变化。

像点 a 在坐标系 $X-x_{kw}y_{kw}z_{kw}$ 在坐标系 $S-x_ky_kz_k$ 间的坐标关系式(图 1-8 所示)为:

$$\begin{bmatrix} x_{kw} \\ y_{kw} \\ z_{kw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix} = \mathbf{R}_\omega \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix} \quad (1-2)$$

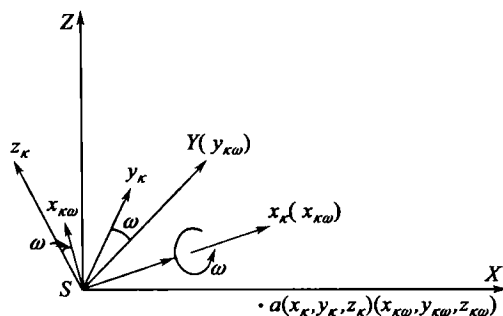


图 1-8 坐标 (x_{kw}, y_{kw}, z_{kw}) 与坐标 (x_k, y_k, z_k) 间的变换

此时, x_{kw} 轴与 x_k 轴为同一轴,故此方向上坐标值没有变化。

像点 a 在坐标系 $S-XYZ$ 与 $S-x_{kw}y_{kw}z_{kw}$ 间的坐标关系式(图 1-9 所示)为:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{kw} \\ y_{kw} \\ z_{kw} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_\varphi \begin{bmatrix} x_{kw} \\ y_{kw} \\ z_{kw} \end{bmatrix} \quad (1-3)$$

此时, y 轴与 y_{kw} 轴为同一轴,故此方向上坐标值没有变化。

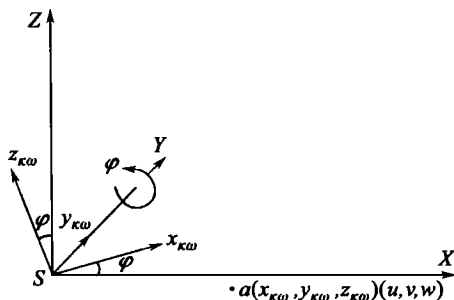


图 1-9 坐标 (u, v, w) 与坐标 (x_{kw}, y_{kw}, z_{kw}) 间的变换

将上述 3 个公式合并,则像点 a 在 $S-XYZ$ 中的坐标 (u, v, w) 为:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} &= \mathbf{R}_\varphi \mathbf{R}_\omega \mathbf{R}_\kappa \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} \quad (1-4) \end{aligned}$$

该公式中,旋转矩阵的表达式为:

$$\begin{cases} a_1 = \cos \varphi \cos \kappa - \sin \varphi \sin \omega \sin \kappa \\ a_2 = -\cos \varphi \sin \kappa - \sin \varphi \sin \omega \cos \kappa \\ a_3 = -\sin \varphi \cos \omega \\ b_1 = \cos \omega \sin \kappa \\ b_2 = \cos \omega \cos \kappa \\ b_3 = -\sin \omega \\ c_1 = \sin \varphi \cos \kappa + \cos \varphi \sin \omega \sin \kappa \\ c_2 = -\sin \varphi \sin \kappa + \cos \varphi \sin \omega \cos \kappa \\ c_3 = \cos \varphi \cos \omega \end{cases} \quad (1-5)$$

由于 R 为正交矩阵,故有:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \mathbf{R}^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (1-6)$$

参见图 1-4,则有:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \lambda^{-1} \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X-X_S \\ Y-Y_S \\ Z-Z_S \end{bmatrix} \quad (1-7)$$

这里的 λ 是 (u, v, w) 与 $(X-X_S, Y-Y_S, Z-Z_S)$ 的缩放系数。将上式展开为:

$$\begin{aligned} x &= \lambda^{-1} [a_1(X-X_S) + b_1(Y-Y_S) + c_1(Z-Z_S)] \\ y &= \lambda^{-1} [a_2(X-X_S) + b_2(Y-Y_S) + c_2(Z-Z_S)] \\ -f &= \lambda^{-1} [a_3(X-X_S) + b_3(Y-Y_S) + c_3(Z-Z_S)] \end{aligned} \quad (1-8)$$

上两式除以第三式,可得:

$$\begin{aligned} x &= -f \frac{a_1(X-X_S) + b_1(Y-Y_S) + c_1(Z-Z_S)}{a_3(X-X_S) + b_3(Y-Y_S) + c_3(Z-Z_S)} \\ y &= -f \frac{a_2(X-X_S) + b_2(Y-Y_S) + c_2(Z-Z_S)}{a_3(X-X_S) + b_3(Y-Y_S) + c_3(Z-Z_S)} \end{aligned} \quad (1-9)$$

这就是著名的共线条件方程式,不难理解,公式中的 x 表示一个平面方程,而 y 表示另一个平面方程;此两个平面的交线,即像点、投影中心和物点共线。

若要考虑像片的主点 (x_0, y_0) 以及系统误差的改正 $(\Delta x, \Delta y)$,共线条件方程表示为:

$$\begin{aligned} x - x_0 - \Delta x &= -f \frac{a_1(X-X_S) + b_1(Y-Y_S) + c_1(Z-Z_S)}{a_3(X-X_S) + b_3(Y-Y_S) + c_3(Z-Z_S)} \\ y - y_0 - \Delta y &= -f \frac{a_2(X-X_S) + b_2(Y-Y_S) + c_2(Z-Z_S)}{a_3(X-X_S) + b_3(Y-Y_S) + c_3(Z-Z_S)} \end{aligned} \quad (1-10)$$

1.2.4 共面条件关系

共面条件方程式是描述像片对的摄影基线以及同名光线应位于同一平面的一种条件方程式。依据此条件方程式,借助于像片对的内在关系(同名光线应该在同一平面内,同名核线应该在同一核面内),可直接构成与被摄物体相似的几何模型。共面条件方程式是近景摄影测量中的另外一个基本解析关系式。

1. 共面条件方程式

在选定的某过渡摄影测量坐标系 S_1-XYZ 内,若左像片 P_1 (左光束) 的位置确定,而在右光束的位置与朝向也已正确的情况下,应满足三矢量 $\vec{b}_1, \vec{s}_1\vec{m}_1$ 和 $\vec{s}_2\vec{m}_2$ 共面的条件,即应满足此三矢量的混合积为零的条件,如图 1-10 所示,以此三矢量为边的平行六面体的体积 F 应为零:

$$F = \vec{b} \cdot (\vec{R}_1 \times \vec{R}_2) = 0 \quad (1-11)$$

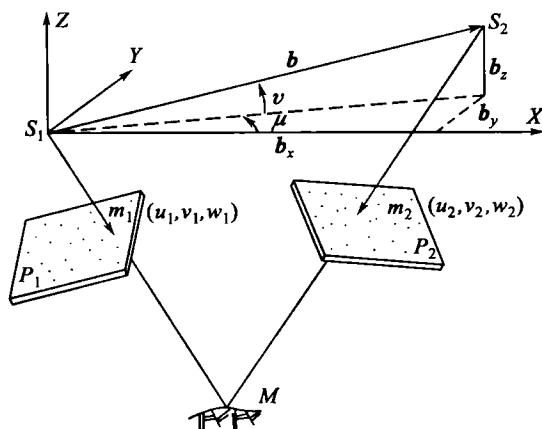


图 1-10 共面条件方程式示意图

相应的行列式表达式为:

$$F = \begin{vmatrix} b_x & b_y & b_z \\ u_1 & v_1 & w_1 \\ u_2 & v_2 & w_2 \end{vmatrix} = b_x \begin{vmatrix} v_1 & w_1 \\ v_2 & w_2 \end{vmatrix} - b_y \begin{vmatrix} u_1 & w_1 \\ u_2 & w_2 \end{vmatrix} + b_z \begin{vmatrix} u_1 & v_1 \\ u_2 & v_2 \end{vmatrix} = 0 \quad (1-12)$$

若旋转角为小角,则近似表达为:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{\text{左}} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ -f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\kappa_1 & -\varphi_1 \\ \kappa_1 & 1 & -\omega_1 \\ \varphi_1 & \omega_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ -f \end{bmatrix} \quad (1-13)$$

$$\begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ w_2 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{\text{右}} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ -f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\kappa_2 & -\varphi_2 \\ \kappa_2 & 1 & -\omega_2 \\ \varphi_2 & \omega_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ -f \end{bmatrix} \quad (1-14)$$

2. 连续像对相对定向的公式

若把左像片(左光束)在坐标系 S_1-XYZ 中的朝向认定为已知,改动右光束的位置(b_y, b_z)和朝向($\varphi_2, \omega_2, \kappa_2$),达到完成相对定向(恢复摄影时的相对空间关系)的过程称作连续像对的相对定向。现将非线性方程式,按照多元函数的泰勒级数公式展开。这类线性化展开步骤,是为了满足相对定向迭代过程中对线性关系式的需要以及满足最小二乘平差过程对线性关系式的需要。

$$F = F_0 + dF = F_0 + \frac{\partial F}{\partial \varphi} d\varphi + \frac{\partial F}{\partial \omega} d\omega + \frac{\partial F}{\partial \kappa} d\kappa + \frac{\partial F}{\partial b_y} db_y + \frac{\partial F}{\partial b_z} db_z = 0 \quad (1-15)$$

因此: