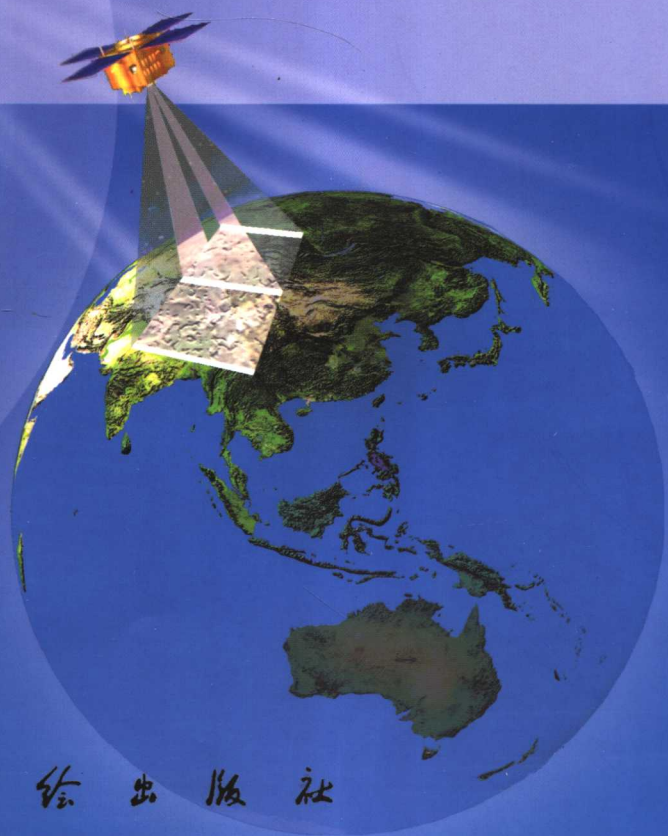


测绘院士专著

SATELLITE PHOTOGRAMMETRIC PRINCIPLE FOR  
THREE-LINE-ARRAY CCD IMAGERY

王任享 著

# 三线阵CCD影像 卫星摄影测量原理



测绘出版社

# 三线阵 CCD 影像卫星 摄影测量原理

Satellite Photogrammetric Principle for  
Three-line-array CCD Imagery

王任享 著

测绘出版社

· 北京 ·

© 王任享 2006

图书在版编目(CIP)数据

三线阵 CCD 影像卫星摄影测量原理/王任享著. —北京:测绘出版社,2006.8  
ISBN 7-5030-1311-7

I. 三... II. 王... III. 卫星测量法:摄影测量法  
IV. P236

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 056724 号

责任编辑:金 君/封面设计:杨耀辉/绘图:张 梅

**测绘出版社** 出版发行

地址:北京市西城区复外三里河路 50 号 邮编:100045  
电话:(010)68512386 68531558 网址:www.sinomaps.com  
北京通州区次渠印刷厂印刷 新华书店经销  
成品尺寸:169mm×239mm 印张:9.5 字数:180 千字  
2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷  
印数:0001—2000 册  
ISBN 7-5030-1311-7/P·432  
定价:30.00 元

如有印装质量问题,请与我社发行部联系



### 作者简介

1933年10月出生于福建长乐，1958年毕业于解放军测绘学院，1980—1982年赴荷兰航空航天测量与地球科学学院（ITC）进修摄影测量与遥感特殊课程。曾任西安测绘研究所所长，现任该所研究员，1997年当选为中国工程院院士。长期从事摄影测量与遥感科学研究，主要研究方向——卫星摄影测量。曾获国家科技进步一等奖。发表学术论文70余篇，个人论文选集一册。

通信地址：西安市雁塔路中段1号  
邮 编：710054

## 内容提要

本书比较系统地阐述了三线阵 CCD 影像卫星摄影测量理论与模拟实验成果。内容包括三线阵 CCD 影像的 EFP 光束法空中三角测量原理及误差特性、三线阵 CCD 影像无扭曲立体模型的建立、三线阵 + CCD 小面阵混合配置的 LMCCD 摄影机设计思想及其影像空中三角测量特点、卫星三线阵 CCD 摄影机内方位元素在轨动态检测、无地面控制点卫星摄影测量高程误差估算、三线阵 CCD 影像短航线立体模型的建立以及三线阵 CCD 影像立体测图等。各章都是作者的科研成果,并体现了作者的科研风格,其中 LMCCD 摄影机及其 EFP 光束法空中三角测量是三线阵 CCD 影像摄影测量的一个新的构思,颇有特色。

本书可供从事传输型卫星摄影测量研究的工程技术人员及研究生参考。

## **Abstract**

In this book, the satellite photogrammetric principle of using three-line-array CCD imagery and the experimental results of simulation are systematically discussed. its main content includes; the principle and error characteristics of EFP bundle triangulation by three-line-array CCD imagery, establishment strip stereomodel with tiny deformation using three-line-array CCD image, the design idea and the triangulation characteristics of imagery obtained from LMCCD camera composed of three-line-array and four small matrix CCD s, the dynamic calibration of the interior orientation elements of three-line-array CCD camera, elevation error estimation of satellite photogrammetry without ground control point, the setup of stereomodel of short strip three-line-array CCD image and stereo mapping. what presented in this book are author's research achievements. in this book, an innovative idea about LMCCD camera and EFP aerial triangulation for three-line-array CCD imagery is presented.

This book can be used as reference book for engineers and graduate students studying in the field of satellite photogrammetry.

## 序言

"摄影测量学"有着悠久的历史。1839年法国 Daguerre 报导了第一张摄影的产生,差不多同时就有"摄影测量学"这一学名首次见诸学术刊物。早在15世纪末叶起就有人利用中心投影的(透视)图象,用手描绘下来进行测量绘图。并且在16世纪末叶出现<sup>现</sup>这样用手素描的立体图象。那时候摄影还没有发明,把这种测绘技术<sup>(还没有)</sup>叫"摄影测量学",而称之为量影术 (Iconometry)。名称不同而实质相同,所以可以说摄影测量的历史已经有500年了。

②

摄影测量学这500年的发展是比较缓慢的,封闭式的。直到最近30~40年间才有了急剧的变化。这主要是由於其他依託学科的出现和发展,主要是电子计算机技术和空间技术的发<sup>展</sup>。摄影测量本身的重大变化是走向了数字化的道路,使得摄影测量的应用范围扩大,深入而且逐渐走向自动化<sup>摄影测量学</sup>。从能够从事地学信息工程<sup>的</sup>学科,可以概括地说1960年以前,称之为“摄影测量”学科,而在1960年以后,~~改称~~应该与新兴的遥感技术和地理信息系统<sup>(GIS)</sup>技术等综合到一起,改称为通过图象获取(广义的获取)地学信息的一门



③ 实际上遙感技术就是摄影测量的发展,地理信息系统是数字化摄影测量的必然成果。  
的基不~~是~~对~~于~~摄影测量

学科,按照这种意义(已名子叫做“影象信息工程”(Iconic Informatics)

也可以考虑,但有的单位已经正式改用类似的名称了。但总的说来,到现在还缺乏统一的~~共~~认识。

对这种名称方面的  
的问题

从事摄影测量学科的科学工作者,一方面要注意前沿发展,也就是所谓“影象信息工程”方面的发展新课题,另一方面也要保存~~和~~摄影测量<sup>的</sup>数百年的遗产,加以充分利用和作出有益的补充。欣闻西安测绘研究所将对资深中老科学家王任享同志的著作选编20余篇集编刊出,这是一件好事。

④ 王任享同志年过六旬,从事摄影测量工作卅五年,致力于摄影测量网平差,粗差定位,数字摄影测量,微分纠正影象,卫星摄影测量,以及三线阵(CCD)影象的利用等方面的研究

工作，孜孜不倦，建树甚多。王任享同志  
才华出众，勤奋治学，为人谦虚谨慎，虽  
已进入老年仍能坚持<sup>(科学)</sup>研讨，令人钦  
佩。乐于为共志者集作序。

王之卓 1996年11月  
于武汉

## 序 言

“摄影测量学”有着悠久的历史。1839年法国 Daguerre 报导了第一张摄影像片的产生,差不多同时就有“摄影测量学”这一学名首次见诸学术刊物。早在 15 世纪末叶起就有人利用中心投影的透视图像,用手描绘下来进行测量绘图。并且在 16 世纪末叶出现这样用手素描的立体图像。那时候摄影还没有发明,这种测绘技术还没有叫“摄影测量学”,而称之为量影术(Iconometry)。名称不同而实质相同,所以可以说摄影测量的历史已经有 500 年了。

摄影测量学在这 500 年的发展是比较缓慢的,封闭式的。直到最近 30~40 年间才有了急剧的变化。这主要是由于其他依托学科的出现和发展,主要是数字电子计算机的技术和空间技术的发展。摄影测量本身的重大变化是走向了数字化的道路,使得摄影测量的应用范围扩大,深入而且能够逐渐走向自动化。摄影测量学作为从事地学信息工程的一门学科,可以概括地说:在 1960 年以前,称之为“摄影测量”学科,而在 1960 年以后,应该与新兴的遥感技术和地理信息系统(GIS)技术综合到一起,改称为通过图像获取(广义的获取)地学信息的一门学科,实际上遥感技术就是摄影测量的发展,地理信息系统的基础数据库是数字化摄影测量的必然成果。按照这种意义起一名字叫做“影像信息工程”(Iconic Informatics)也可以考虑,有的单位已经正式改用类似的名称了。但总的来说,对这种名称方面的问题到现在还缺乏统一的共识。

从事摄影测量学科的科学工作者,一方面要注意前沿发展,也就是所谓“影像信息工程”方面发展的新课题;另一方面也要保存摄影测量学数百年的遗产,加以充分利用和作出有益的补充。欣闻西安测绘研究所将对资深中老年科学家王任享同志的著作选出 20 余篇准备刊出,这是一件好事。

王任享同志年过六旬,从事摄影测量科研工作 35 年,致力于摄影测量网平差,粗差定位,数字摄影测量,微分纠正影像,卫星摄影测量,以及三线阵 CCD 影像的利用等方面的研究工作,孜孜不倦,建树甚多。王任享同志才华出众,勤奋治学,为人谦虚谨慎,虽已进入老年仍能坚持科学研讨,令人钦佩。乐于为其专著集作序。

王任享

1996 年 11 月于武汉

---

注:此序言系王之卓院士为《王任享研究员学术论文选集》作的序,作者将此序言作为本书的序言,以示对已故的王先生的怀念和敬仰。

## 前 言

框幅式摄影机用于无地面控制点的卫星摄影测量,技术上突出的优点:一是静态摄影,对卫星平台稳定度要求较低;二是空中三角测量构建航线立体模型无扭曲(不计观测值偶然误差),平差后外方位元素观测值误差被较大幅度地削弱,使得满足制图精度的摄影测量工程技术难度大为降低。

三线阵 CCD 摄影机无疑是无地面控制点传输型摄影测量卫星的理想传感器,但利用动态摄影的三线阵 CCD 影像构建达到制图精度要求的立体模型,则对卫星平台的稳定度和外方位元素测定精度要求都很苛刻,卫星工程技术难度很大。长期以来,摄影测量工作者期望动态摄影影像与相当参数的框幅式像片在空中三角测量方面有相同的性能,以降低卫星工程技术难度,但始终未解决空中三角测量航线模型的无扭曲问题。

我研究的目标是无地面控制点的卫星摄影测量,长期以来定位在三线阵 CCD 影像的摄影测量理论研究,也曾经同王之卓先生谈起突破这一命题之难度,他一直鼓励我要不断努力。

2001年,我整理了自己长期以来的研究成果,尤其是1998年以来研究三线阵 CCD 影像空中三角测量的阶段成果,虽未解决航线模型的扭曲问题,但已找到解决的可能方向,并将手稿寄给了王先生。不料,此时王先生健康状况已经极度恶化,他只能由一个眼借用放大镜才能看到粗体的题目,已无能力看我的手稿,但还是吃力地写了“成就极多可喜可贺!”加以勉励。我看了信心里非常难受,之后试图加紧努力走出三线阵影像空中三角测量的阴影,但由于个人才智所限,历经两年之后才在理论上有所突破<sup>[1]</sup>,随后又同一起工作的同事推出线阵——面阵 CCD 探测器混合配置的所谓 LMCCD 摄影机思想,并用于卫星摄影测量的建议<sup>[2]</sup>,以此摄影机为主要传感器可以解决设计无地面控制点的卫星摄影测量系统,遗憾的是未能让先生在世之时看到这一结果。

王先生是我们最尊敬的前辈和师长,在高龄之际依然关心我们学科的发展。1994年给我的信中写道,“现在我们从事摄测的人,很少作摄测的经典性工作了。言必称遥感或 GIS 或计算机视觉。今后应该怎样安排咱们的专业或学科值得研究。”1997年欣然为我的个人学术论文选作序。序言中提出摄影测量学重新起名问题,并语重心长地提到,“从事摄影测量学科的科学工作者,一方面要注意前沿发展,也就是所谓‘影像信息工程’方面发展的新课题;另一方面也要保存摄影测量学数百年的遗产,加以充分利用和作出有益的补充。”

王先生给我个人学术论文集撰写的序言涉及的是摄影测量发展的重要问题,并对摄影测量工作者提出厚望,其学术价值比我所有论文之总和都重要。该论文

集出版后,我只赠送给少数我的朋友和学生,测绘界绝大多数同仁无缘拜读先生的教诲。为弥补这一缺陷和保存王先生的手迹,我将其作为本书的序言刊出。本书是我多年科研成果的系统集成,确切地说是份研究报告,其基本思路是对三线阵 CCD 影像空中三角测量方法及精度上存在的问题,找出原因,提出解决途径与方法,最终目标是实现无地面控制点的卫星摄影测量。研究内容主要包括三线阵 CCD 影像空中三角测量;三线阵 CCD 影像无扭曲立体模型建立的条件;LMCCD 摄影机的设计思想及其影像空中三角测量的特点;三线阵 CCD 摄影机在轨检测;短航线自由网立体模型的建立;无地面控制点卫星摄影测量高程精度估算以及三线阵 CCD 影像立体测绘等。所有以上研究内容均采取理论推导、计算机数字模拟和数字影像模拟加以计算验证。也正因为如此,所以本书的结果在将来实际卫星摄影影像处理中将不断完善与修正。

王作亨 2005, 8

# 目 录

|                                      |      |
|--------------------------------------|------|
| 第一章 概 述                              | (1)  |
| § 1.1 返回式卫星摄影测量                      | (1)  |
| § 1.2 传输型摄影测量卫星                      | (2)  |
| 第二章 三线阵 CCD 摄影机推扫式摄影测量基础数学关系         | (5)  |
| § 2.1 三线阵 CCD 摄影机                    | (5)  |
| 2.1.1 单镜头三线阵 CCD 摄影机                 | (5)  |
| 2.1.2 三镜头三线阵 CCD 摄影机                 | (6)  |
| § 2.2 三线阵 CCD 摄影机推扫式卫星摄影             | (8)  |
| § 2.3 三线阵 CCD 影像坐标                   | (10) |
| § 2.4 三线阵 CCD 数字影像空间坐标与地面坐标关系数学模型    | (11) |
| 2.4.1 框幅像坐标                          | (11) |
| 2.4.2 推扫像坐标                          | (14) |
| 第三章 三线阵 CCD 影像 EFP 光束法空中三角测量原理及数学模型  | (15) |
| § 3.1 EFP 光束法空中三角测量原理                | (15) |
| 3.1.1 地面点坐标及 $(x)$ , $(y)$ 的计算       | (18) |
| 3.1.2 EFP 框幅像坐标计算                    | (19) |
| § 3.2 EFP 光束法空中三角测量的数学模型             | (20) |
| 3.2.1 前方交会                           | (20) |
| 3.2.2 后方交会及附加条件方程                    | (20) |
| § 3.3 平差数据的数学模型                      | (22) |
| 第四章 三线阵 CCD 影像 EFP 光束法空中三角测量误差特性实验研究 | (24) |
| § 4.1 卫星摄影测量的基本参数                    | (24) |
| § 4.2 EFP 光束法空中三角测量几何特性              | (24) |
| 4.2.1 平差框图                           | (24) |
| 4.2.2 平差实验                           | (25) |
| § 4.3 自由网+4 控制点平差                    | (28) |
| 4.3.1 基线数、姿态变化率不同平差                  | (28) |
| 4.3.2 长航线误差特点                        | (29) |
| § 4.4 自由网+多控制点平差                     | (32) |

|            |                                |             |
|------------|--------------------------------|-------------|
| § 4.5      | 外方位元素观测值参与平差                   | (32)        |
| § 4.6      | 外方位元素带有常差的空中三角测量               | (35)        |
| § 4.7      | 区域平差                           | (36)        |
| 4.7.1      | 区域平差策略与方法                      | (36)        |
| 4.7.2      | 区域平差计算实例                       | (37)        |
| <b>第五章</b> | <b>三线阵 CCD 影像无扭曲立体模型的建立</b>    | <b>(42)</b> |
| § 5.1      | EFP 时刻像点误差方程式系数归算比较            | (42)        |
| 5.1.1      | 定向片法归算                         | (42)        |
| 5.1.2      | 两种归算法实验                        | (43)        |
| § 5.2      | 宽高比太小不是单航线 4 控点平差航线立体模型扭曲的主要原因 | (45)        |
| 5.2.1      | 定向片光束法平差实验结果摘要                 | (45)        |
| 5.2.2      | 应用 EFP 光束法空中三角测量计算宽高比对平差精度的关系  | (47)        |
| § 5.3      | 提高单航线 4 控点平差精度的措施              | (49)        |
| 5.3.1      | 空中三角锁间连接条件的建立                  | (49)        |
| 5.3.2      | 连接点影像投影方向控制原理                  | (50)        |
| 5.3.3      | 分步联合平差实验                       | (52)        |
| § 5.4      | 单航线平差精度与摄影机焦距的关系               | (53)        |
| § 5.5      | 外方位元素观测值参与平差计算                 | (56)        |
| <b>第六章</b> | <b>LMCCD 摄影机卫星摄影测量</b>         | <b>(57)</b> |
| § 6.1      | LMCCD 摄影机                      | (57)        |
| § 6.2      | LMCCD 影像自由网+4 控点空中三角测量         | (58)        |
| § 6.3      | LMCCD 摄影机推扫摄影的数字影像模拟           | (60)        |
| 6.3.1      | 数字模拟影像生成                       | (61)        |
| 6.3.2      | 数字模拟数据光束法平差                    | (62)        |
| § 6.4      | 具有框幅像片空中三角测量的特性                | (62)        |
| 6.4.1      | 自由网+4 控点平差精度与卫星姿态角变化关系         | (62)        |
| 6.4.2      | 外方位元素观测值参与平差(无地面控制点)           | (64)        |
| 6.4.3      | 空中三角测量偶然误差系统累积                 | (65)        |
| § 6.5      | 卫星三线阵 CCD 摄影测量系统预期精度与效能        | (66)        |
| § 6.6      | 无地面控制点卫星摄影测量的思考                | (68)        |

|   |       |
|---|-------|
| <b>第七章 利用地面控制点进行卫星摄影三线阵 CCD 摄影机动态检测</b> ..... | (69)  |
| § 7.1 动态检测内方位元素的基本问题.....                     | (69)  |
| 7.1.1 摄影测量摄影机内方位元素的规定 .....                   | (69)  |
| 7.1.2 摄影机内方位元素发生变化后的规定 .....                  | (72)  |
| 7.1.3 摄影机内方位元素检定项目 .....                      | (72)  |
| § 7.2 EFP 光束法空中三角测量反求内方位元素改正数的解算 .....        | (73)  |
| 7.2.1 前方交会第 $i$ 片,地面点 $j$ 的误差方程 .....         | (73)  |
| 7.2.2 后方交会数学模型 .....                          | (74)  |
| § 7.3 星地摄影机夹角变化值的检测.....                      | (77)  |
| § 7.4 模拟计算实验.....                             | (78)  |
| 7.4.1 卫星摄影参数 .....                            | (78)  |
| 7.4.2 控制数据精度 .....                            | (78)  |
| 7.4.3 平差计算 .....                              | (78)  |
| <br>  |       |
| <b>第八章 无地面控制点卫星摄影测量高程误差估算</b> .....           | (81)  |
| § 8.1 不同类型的立体交会高程误差估算.....                    | (81)  |
| 8.1.1 框幅式影像立体模型高程误差 .....                     | (82)  |
| 8.1.2 二线阵 CCD 影像空间交会高程误差.....                 | (83)  |
| 8.1.3 LMCCD 摄影机推扫式摄影测量高程误差估算 .....            | (87)  |
| § 8.2 结论与后语.....                              | (89)  |
| <br>  |       |
| <b>第九章 三线阵 CCD 影像短航线立体模型的建立</b> .....         | (90)  |
| § 9.1 相对定向及无 $y$ 视差立体的建立 .....                | (90)  |
| 9.1.1 自由外方位元素计算 .....                         | (90)  |
| 9.1.2 模型 DEM 的采集 .....                        | (93)  |
| § 9.2 模型绝对定向.....                             | (93)  |
| 9.2.1 地面—模型坐标变换参数计算 .....                     | (93)  |
| 9.2.2 生成地面坐标系的 DEM 及正射影像 .....                | (95)  |
| 9.2.3 外方位元素观测值参与定向元素的计算——绝对定向元素<br>.....      | (96)  |
| § 9.3 实验研究.....                               | (97)  |
| 9.3.1 应用数字模拟三线阵 CCD 影像坐标实验.....               | (98)  |
| 9.3.2 数字模拟三线阵 CCD 影像的实验研究.....                | (99)  |
| 9.3.3 利用真实三线阵 CCD 影像实验 .....                  | (101) |



|   |           |
|---|-----------|
| <b>第十章 三线阵 CCD 影像立体测图</b> .....                         | (104)     |
| § 10.1 数学模拟三线阵 CCD 摄影机推扫摄影及三线阵 CCD 影像生成<br>正射投影影像 ..... | (104)     |
| 10.1.1 三线阵 CCD 摄影机推扫摄影 .....                            | (104)     |
| 10.1.2 正射影像生成 .....                                     | (104)     |
| § 10.2 纠正为正射影像进行影像匹配 .....                              | (105)     |
| § 10.3 断面引导逼近影像匹配法采集 DEM .....                          | (107)     |
| 10.3.1 “断面引导逼近”原理 .....                                 | (107)     |
| 10.3.2 利用 PGA 原理将正射影像匹配的结果计算栅格点的高程<br>.....             | (110)     |
| 10.3.3 物方多点匹配中 PGA 原理的应用 .....                          | (112)     |
| § 10.4 栅格 DEM 生成栅格等高线 .....                             | (113)     |
| 10.4.1 直接计算栅格等高线原理及数学模型 .....                           | (113)     |
| 10.4.2 地形特征数据的应用 .....                                  | (115)     |
| § 10.5 实验研究 .....                                       | (116)     |
| 10.5.1 数字模拟泰山地区三线阵 CCD 影像 .....                         | (116)     |
| 10.5.2 三线阵 CCD 影像生成 DEM 的策略及框图 .....                    | (118)     |
| 10.5.3 应用纠正为正射影像匹配的方法采集 DEM .....                       | (120)     |
| <br><b>参考文献</b> .....                                   | <br>(123) |
| <br><b>附录</b> .....                                     | <br>(125) |
| <br><b>致谢</b> .....                                     | <br>(126) |