

GPS 辅助全自动空中三角测量*

李德仁 袁修孝 巫兆聪

张祖勋 张剑清 汪治宏 张 力

(武汉测绘科技大学信息工程学院 武汉 430070)

摘 要 该文在简要介绍 GPS 辅助空中三角测量和全数字自动空中三角测量的基础上,详述 GPS 与全数字化摄影测量结合的产物——GPS 辅助全自动空中三角测量的基本原理、方法和作业流程。介绍几个用到的软件系统,分析讨论哈尔滨测区的试验结果及新方法 with 常规方法在精度和效率上的对比,试验充分证明了 GPS 辅助全自动空中三角测量的先进性和在航空遥感定位中的广阔应用前景。

关键词 GPS 动态差分, GPS 辅助空中三角测量, 全数字自动空中三角测量, GPS 全自动空中三角测量

1 概述

摄影测量与遥感是通过非接触传感器获得所摄目标的影象,由影象提取各种语义和非语义信息即所谓的几何信息和属性信息,前者亦常称为空间定位问题。以航空摄影测量而言,其定位方法通称空中三角测量,其工作可分为两大主要部分:第一部分是数据采集,包括转点、象点坐标或模型点坐标量测、坐标规化和预改正。第二部分是数据处理,一般为区域网平差,平差过程中要引入非摄影测量信息,主要是地面控制点坐标,使空中三角测量网纳入规定的物方坐标系,同时对对象片系统误差进行有效地改正。传统的空中三角测量中,前者依靠人工选点、转点和在航测仪器上人工量测获得象点象片坐标或模型坐标,后者则主要利用大地测量方法测定在象片上满足良好分布条件的若干控制点。这其中的人工因素正是阻碍摄影测量和遥感向数字化、自动化和实时化发展的难点之一。在我们承担的国家“863”课题“航空对地观测软件集成”和国家自然科学基金重点项目“RS、GIS 与 GPS 的集成理论和关键技术研究”中,就需要解决这个关键问题。随着 GPS 辅助空中三角测量,自动空中三角测量的成功研制,加上自动粗差探测技术,已为解析空中三角测量走向全自动化奠定了坚实基础。

该文介绍我们利用李德仁教授主持研究成功的 GPS 辅助空中三角测量和张祖勋教授主持研究成功的全数字化自动空中三角测量成果进行两者集成的结果。包括集成的方法、软件的特点及用哈尔滨测区进行实际试验的结果。并将这种新方法 with 常规方法进行全面地比较,以了解新方法在质量、速度上的优势。

2 GPS 辅助空中三角测量

GPS 辅助空中三角测量是指利用机载 GPS 接收机与地面基准点的 GPS 接收机同时、快速、连续地记录相同的 GPS 卫星信号,通过相对定位技术的离线数据后处理获取摄影机曝光时刻摄站的高精度三维坐标,将其作为区域网平差中的附加非摄影测量观测值,以空中控制取代(或减少)地面控制;经采用统一的数学模型和算法,整体确定点位并对其质量进行评定的理论、技术和方法^[1,2]。图1表示利用差分模式获取空中控制的示意图。由此可获得在以 M 为原点的地面坐标系中,飞机上天线相位中心 $A(X_A, Y_A, Z_A)$ 和摄影中心 $S(X_S, Y_S, Z_S)$ 利用象片姿态角 φ, ω, κ 得到的变换关系式:

$$\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (1)$$

* 该文为国家863计划308主题项目(863-308-13-04(2))和国家自然科学基金重点项目(496J1050)资助研究成果之一。

收稿日期: 1997年3月28日; 收到修改稿日期: 1997年5月15日

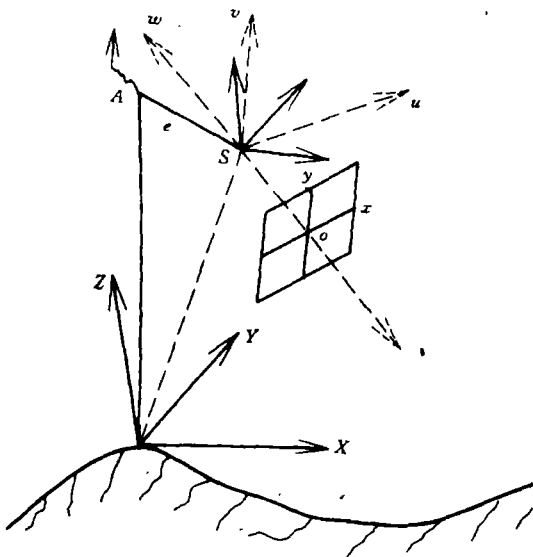


图 1 利用空—地两台 GPS 接收机的航摄系统
Fig.1 Aerial photograph system with airborne GPS receiver and ground GPS receiver

R 为由象片姿态角所表示的正交变换矩阵。 (u, v, w) 为 GPS 天线相位中心 A 在象片坐标系中的坐标。

由上式出发,顾及 GPS 观测值中的系统误差(主要为漂移误差),即可获得 GPS 摄影中心坐标方程的线性化误差方程式,与整体平差的其它误差方程式联立:

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_c \\ V_s \\ V_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & C & \cdot & \cdot \\ \cdot & E_x & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & E_c & \cdot & \cdot \\ \bar{A} & \cdot & \cdot & R & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t \\ X \\ c \\ r \\ d \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_x \\ L_c \\ L_s \\ L_g \end{bmatrix} \quad (2)$$

权矩阵 $P = \begin{bmatrix} 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & P_c & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & P_s & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & P_g \end{bmatrix}$

$t = [d\varphi \quad d\omega \quad d\kappa \quad dX_s \quad dY_s \quad dZ_s]^T$ 为象片外方位元素未知数增量,

$X = [dX \quad dY \quad dZ]^T$ 为加密点坐标未知数增量,

c 为自检校附加参数,

$r = [d_u \quad d_v \quad d_w]^T$ 为 GPS 天线—相机偏移向量未知数增量,

$d = [a_x \quad a_y \quad a_z \quad b_x \quad b_y \quad b_z]^T$ 为漂移改正参数。

对应的系数矩阵、常数项和权矩阵不再列述,详见参考文献 [1]。

在选取一定的权函数形式后,由最小二乘法求

解^[1]。

已有的研究和试验表明^[3]:

1. GPS 差分技术可获取亚米级精度的三维摄站坐标,可以有效地用于区域网平差。解算出的加密点坐标精度要优于 GPS 摄站坐标自身的精度,可满足各种比例尺测图的加密规范。

2. 在一个区域中, GPS 观测值如没有失锁、周跳等信号间断的情况,在不需考虑基准的情况下, GPS 摄站坐标可完全取代地面控制点用于区域网平差。

3. 为解决基准问题及有效改正由于周跳、失锁等导致的 GPS 系统误差,需加飞构架航线或加入少量地面控制点。

4. 大量的试验(太原、哈尔滨)和生产测区(如海南)的结果表明, GPS 辅助空三已成功用于不同象片比例尺、不同大小区域的联合平差,完全可以投入生产实用化。

3 自动空中三角测量

自动空中三角测量是利用模式识别与多片影像匹配等方法代替人工进行自动选点与转点、同时自动获取象点坐标,提供给区域网平差程序解算。其主要过程如下:

• 自动内定向 自动内定向建立数字影像中的各象元素行列数与其象点坐标之间的关系,其核心是数字影像中框标点的自动识别与定位。由于各种框标均具有对称性及任意倍数 90 度旋转不变性,对每一种相机,可用该特性自动建立标准模板。其后利用模板匹配自动快速识别与定位各框标点,再根据相机检校的理论框标值进行参数解算。

• 自动选点与自动相对定向 由点特征提取算子从每两幅相互重叠的影像的重叠范围内选取均匀分布的明显特征点,为了保证高可靠性,所选的点应充分多。对每一点进行局部多点松弛法影像匹配,得到其在另一幅影像中对应的点。然后进行相对定向解算,并根据相对定向结果剔除粗差,重新解算,直至没有粗差为止。

• 多片匹配自动转点 对每幅影像中所选取的点,在所有与其重叠的影像中,利用核线(共面)条件约束的局部多点松弛法影像匹配,进行自动转点,并对每一对点进行反向匹配,以检测并排除可能的粗差。

• 控制点半自动量测 对于 GPS 辅助空中三角测量,还需要量测少量地面控制点的影像坐标,

为此由作业员直接在计算机屏幕上对某一影象进行辨识并精确定位,然后通过多片匹配而实现自动转点。

以上工作自动化程度已达到目前世界最好水平。

4 GPS 全自动空中三角测量

由自动空中三角测量中的多片影象匹配自动转点技术取代常规航测中象点坐标的人工量测,由 GPS 动态差分技术获取 GPS 摄站坐标,以空中控制取代或减少地面控制,即可使解析空中三角测量实现全自动化(图 2),其作业流程为:

(1) 利用机载 GPS 接收机与地面参考点的 GPS 接收机同时、快速、连续地记录相同的 GPS 卫星之信号,同时在机载 GPS 接收机记录数据中加入摄影瞬间的时标信号。

(2) 利用后处理软件(如 DDKIN)进行离线数据后处理,内插获得摄影瞬间 GPS 天线相位中心的三维坐标。

(3) 利用自动空中三角测量中的多片影象匹配自动转点技术,对数字化后的影象进行整体影象匹配,获得较常规数量多、精度高、可靠性好的模型连接点的象片坐标。

(4) 由上所得的 GPS 摄站坐标,连接点象片坐标,外加摄影机数据,必要时加入少量地面控制,进行摄影测量与非摄影测量观测值的联合平差,求解加密

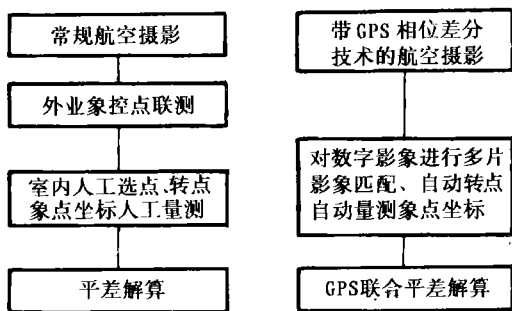


图2 常规空中三角测量与GPS辅助全自动空中三角测量

Fig.2 Conventional aerotriangulation and GPS supported automatic aerotriangulation

点坐标(物方坐标系)或象片定向参数。

5 试验及结果分析

5.1 实验所用软件

- 双频载波相位差分 GPS 动态定位软件 DDKIN

该软件由刘基余教授主持完成,为双频 GPS 接收机而研制。可处理 GPS 动态载波相位测量/伪距测量数据,利用动态图形数据检验法评定机载 GPS 数据质量,确认每一个摄站坐标的置信度,可计算三维 GPS 天线相位中心坐标协方差阵。已经模拟数据和实测数据的检验,证明可用于生产。

• 摄影测量与非摄影测量观测值联合平差系统软件 WuCAPS_{GPS}。

由李德仁教授主持研制的 WuCAPS_{GPS} 系统为以摄影测量与非摄影测量观测值的联合平差与高精度点位测定为目标的摄影测量加密程序包,它不仅能利用摄影测量信息而且还能利用各种非摄影测量信息,如大地测量观测值,惯性导航系统 INS 数据,全球定位系统 GPS 数据进行整体严密平差。具有自动剔除摄影测量观测值中的粗差和补偿系统误差的功能。平差后有一套完整的质量分析子系统,可计算未知数的精度矩阵和观测的可靠性矩阵,同时可进行各类观测值的验后方差分量估计,进一步指导各类观测值之间的权比确定。

- 全数字自动空中三角测量软件 VirtuoZo_AT

由张祖勋教授主持研制的 VirtuoZo_AT 软件是我国第一套实用数字摄影测量工作站 VirtuoZo 中的自动空中三角测量软件包,其影象匹配与系统的自适应诊断能力等具有创造性,具有全区域数字影象全自动内定向,相互重叠的任意两幅影象的全自动相对定向,快速自动选点及快速、可靠、高精度的多片影象匹配自动转点等功能,可完全取代传统方法的人工作业方式。其成果不仅能供上述 WuCAPS 联合平差系统软件解算,也能供 PAT-B, ALBENY 等其它区域网平差软件解算。

5.2 试验结果

借助上述软件,利用哈尔滨市 GPS 航飞实验的部分资料,按照上述 GPS 全自动空中三角测量的作业流程,进行了 GPS 全自动空中三角测量的试验研究。自获得原始影象资料始,在前后共计一周的时间内,成功完成了本次实验。

试验用航摄像片由威特 RC₁₀ 相机 ($f=152\text{mm}$) 摄得,摄影比例尺 1:8000,区域含两条航线,共计 29 张象片,有地面控制点 6 个。

自动空中三角测量按无地面控制情况和四角控制情况两种方案进行,在同种条件下以人工量测连接点象片坐标再进行空三解算作对比,结果如表 1,表 2。

表1 无地面控制方案的实验结果

Table 1 The result of aerotriangulation without ground control

量测方式	人工量测	自动转点
坐标量测中误差 σ_0	14.8 μ m	12.5 μ m
坐标理论精度 (m)	$X=\pm 0.332, Y=\pm 0.448, Z=\pm 0.491$	$X=\pm 0.239, Y=\pm 0.313, Z=\pm 0.351$
检查点数	6	6
检查点残差中误差 (m)	$X=\pm 2.728, Y=\pm 2.126, Z=\pm 1.082$	$X=\pm 2.383, Y=\pm 1.825, Z=\pm 1.077$
线元素最大差值 (m)	X: 0.902 Y: 0.949 Z: 0.467	
线元素差值中误差 (m)	X: ± 0.335 Y: ± 0.382 Z: ± 0.170	
角元素最大差值 (′)	$\varphi: 2.133$ $\omega: 3.650$ $\kappa: 3.000$	
角元素差值中误差 (′)	$\varphi: \pm 0.905$ $\omega: \pm 2.027$ $\kappa: \pm 1.019$	

表2 四角控制方案的实验结果

Table 2 The result of aerotriangulation with ground control (four in corners)

量测方式	人工量测	自动转点
坐标量测中误差 σ_0	14.3 μ m	12.2 μ m
坐标理论精度 (m)	$X=\pm 0.174, Y=\pm 0.217, Z=\pm 0.343$	$X=\pm 0.127, Y=\pm 0.147, Z=\pm 0.253$
控制点数	4	4
控制点残差中误差 (m)	$X=\pm 0.038, Y=\pm 0.029, Z=\pm 0.006$	$X=\pm 0.038, Y=\pm 0.026, Z=\pm 0.013$
检查点数	2	2
检查点残差中误差 (m)	$X=\pm 0.122, Y=\pm 0.491, Z=\pm 0.268$	$X=\pm 0.350, Y=\pm 0.331, Z=\pm 0.196$
线元素最大差值 (m)	X: 0.915 Y: 0.802 Z: 0.467	
线元素差值中误差 (m)	X: ± 0.331 Y: ± 0.327 Z: ± 0.170	
角元素最大差值 (′)	$\varphi: 1.867$ $\omega: 2.717$ $\kappa: 1.967$	
角元素差值中误差 (′)	$\varphi: \pm 0.774$ $\omega: \pm 1.139$ $\kappa: \pm 0.777$	

* 用于自动转点的数字影像为用摄影底片(负片)经扫描仪扫描而成,分辨率为 25 μ m。

* 表中 σ_0 反映象片坐标量测中误差,坐标理论精度系由未知数协方差阵求出的中误差,检查点残差中误差系由已知地面坐标的检查点上残差求出,线元素指摄影中心坐标,角元素为象片 3 个姿态角。

从表 1、表 2 可知:

(1) 在同种控制方案下,用两种量测方式获得的象点坐标解算结果,在理论精度、实际精度、解算出的外方位元素之间无实质性差异,自动量测方式下的精度还稍优于人工量测方式,其原因除了自动量测采用原始负片,人工量测采用的是复制正片外,也表明多片影像匹配自动转点的高可靠性和高精度。

(2) 在无地面控制情况下,两种方式都存在理论精度与实际精度不符的情况,已有的研究表明,其主要原因来自于作为空中控制的 GPS 摄站坐标带有一定的系统误差,在较大的摄影比例尺(1:8000)的情况下,其影响更为明显。如能在平差前很好地消除 GPS 摄站坐标的系统误差,使其达到足够的精度,那么无地面控制的空中三角测量,也是可行的。

(3) 四角控制方案下,自动转点方式获得实际

平面精度为 ± 0.482 m, 高程为 ± 0.196 m; 人工量测方式实际平面精度为 ± 0.506 m, 高程为 ± 0.268 m, 其它各项精度指标亦均能满足 1:2000 比例尺的测图规范。若用 1:5000 和 1:3000 摄影比例尺,则可满足 1:1000 和 1:500 比例尺测图要求。

(4) 前已提及,此次实验从获得原始摄影底片始,扫描数字化,数字影像匹配到 GPS 辅助空中三角测量,前后总计约一周左右时间。若为常规空三,同阶段还需接触晒印正片,室内选刺加密点并观测其象片坐标,实际耗时将不会少于一个月,若再考虑机载 GPS 取代(中小比例尺测图)或减少(大比例尺测图)地面控制换来的时间效益,其总体时效将非常可观,有望在航摄飞行一个月左右的时间即可获得加密成果。从几年试生产看,工期可提前一年,外业总成本可省 70%,内业效率可提高 5 倍以上(表 3)。

表3 GPS自动空中三角测量与常规空中三角测量在时间、效率上的比较

Table 3 A comparison between conventional aerotriangulation and GPS supported automatic aerotriangulation

比较项目	常规空中三角测量	GPS自动空中三角测量
航空摄影	测区常规摄影飞行	带GPS相位差分的航空摄影,增加15%费用, GPS导航提高摄影飞行质量
外业控制联测	需一个作业季节进行外业联测	只需少量地面控制点,可在航摄飞行时间同步完成
内业选点,转点	人工作业(慢、差、费)	全自动完成(快、好、省)
像片坐标量测	人工作业(慢)	全自动完成(快)
区域平差计算	精度取决于控制点的数量和分布	GPS联合平差,精度均匀,可靠性好。

综上所述,由机载 GPS 获取空中控制以取代地面控制,由全数字自动空中三角测量多片影像匹配自动转点替代象点坐标的人工量测,即全自动化的空中三角测量,可以满足摄影测量加密的精度要求,试验是成功的,其占用的人力与所耗时间则明显少于常规空中三角测量。因此可以在大比例尺航测成图和城市 GIS 数据库建立更新中推广使用。需要指出的是,在 GPS 全自动空中三角测量完成之后,即可自动生成 DEM 和制作数字正射影像,并进而为 GIS 提取必要的几何与专题信息,此项工作正在进行中,试验成果将另文报道。

参 考 文 献

[1] 李德仁. GPS 用于摄影测量与遥感. 测绘出版社,1996.

[2] 刘基余等. GPS kinematic carrier phase measurements for aerial photogrammetry. *Photogrammetry & remote sensing*, 1996 51 230-242.

[3] 李德仁, 袁修孝. GPS 辅助光束法区域网平差. 测绘学报, 1995, 24(2): 1-7.

作 者 简 介

李德仁, 男, 57 岁, 教授, 博士生导师, 中国科学院院士, 中国工程院院士。现从事摄影测量与遥感、地理信息系统和计算机视觉研究。发表论文 130 多篇, 专著 5 部。是 GPS 辅助空中三角测量的主要研制者。

GPS Supported Automatic Aerotriangulation

Li Deren Yuan Xiuxiao Wu Zhaocong

Zhang Zuxun Zhang Jianqing Wang Zhihong Zhang Li

(School of Information Engineering, WTUSM, Wuhan, China 430070)

Abstract After an overview of the GPS supported Aerotriangulation and the Fully Automatic Aerotriangulation, this paper presents the GPS supported Automatic Aerotriangulation, including its principle, method and procedure. The related software developed by the authors are briefly described. To test the new method suggested by the authors, a real data set of GPS supported aerophotography taken from Haerbin project was used. The results of the test indicates that the new method will increase the accuracy and the efficiency very significantly and the new method can be widely used in GIS data acquisition and updating.

Key words Kinematic DGPS, GPS supported Aerotriangulation, Fully Automatic Aerotriangulation, GPS supported Automatic Aerotriangulation