

# 数字航摄仪航空摄影测量效率分析

苏小霞<sup>1,2\*</sup>, 李英成<sup>2</sup>, 李学友<sup>2</sup>, 吴连喜<sup>1</sup>, 王永平<sup>2</sup>

(1. 东华理工学院, 江西 抚州 344000; 2. 中国测绘科学研究院, 北京 100039)

## Efficiency Analysis of Airborne Digital Sensor

Su Xiaoxia, Li Yingcheng, Li Xueyou, Wu Lianxi, Wang Yongping

**摘要** 随着航空摄影的发展,传统航摄仪已明显表现出其局限性。以 DMC 和 ADS40 为代表的数字航摄仪在影像质量及效率等多方面的优势已愈见明显。本文结合中国测绘科学研究院承担的国家测绘局基础航空摄影项目——石家庄市大比例尺航摄项目和“中测新图”(北京)遥感技术有限责任公司所承担的 ADS40 推扫式数字航摄仪航摄实验研究项目,首先介绍了数字航摄仪的原理及数据处理流程,然后分别从航摄飞行、数据后处理、外业像控测量及内业测图几方面,对数字航摄仪航摄的效率进行了详细分析,阐述了数字航摄仪在航空摄影测量中的优劣势,最后对数字航摄仪的应用前景进行展望。

**关键词** 数字航摄仪; 线阵扫描; CCD; ADS40; DMC; 效率

### 1 引言

随着全国数字城市、城市地理信息系统的建立和推进,对彩色影像的需求越来越多,传统航空摄影对天气的苛刻要求、胶片色彩还原能力等局限越来越明显,成为制约我国航空摄影测图的瓶颈。计算机和 CCD 技术的发展促使国际上出现了直接获取数码影像的测量型数字航摄仪,可同时获取黑白、彩色及彩红外信息,无须胶片、冲洗、扫描,影像质量更稳定,具有高自动匹配成功率、更好的影像解译能力、有更多的飞行天气,全数字化作业,缩短生产周期等优点,成为一种重要的遥感数据获取手段。

为推动数字航摄仪在我国摄影测量领域的应用,中国测绘科学研究院在 2004 年承担的国家测绘局基础航摄项目——石家庄市大比例尺航摄项目中,对 DMC 数字航摄仪航摄进行了实验分析,2005 年中测新图(北京)遥感技术有限责任公司承担了 ADS40 推扫式数字航摄仪航摄实验研究项目。本文结合上述两实验项目介绍了数字航摄仪航空摄影测量的工作流程,并对其效率进行了详细分析。

### 2 数字航摄仪原理

目前,数字航摄仪主要分为框幅式(以 DMC 为例)和推扫式(以 ADS40 为例)2 种。

#### 2.1 DMC 数字航摄仪原理

DMC 数字航摄仪镜头系统由 8 个镜头组成,每个单独镜头配有大面阵的 CCD 传感器。相机底部按正方形顶点位置安放了 4 个全色波段镜头,飞行时 4 镜头同时拍摄,分别获取影像,4 个影像的位置关系类似于蝶形,再利用影像上的同名点采用外扩法拼合成虚拟焦距为 120 mm 的中心投影影像。多光谱传感器获取的影像通过与全色高分辨率影像融合生成真彩或彩红外影像。

#### 2.2 ADS40 数字航摄仪原理

ADS40 航摄仪是基于线阵 CCD 技术的,集成了 GPS 和惯性测量装置(IMU)的新型摄影测量仪器,采用线阵式 CCD 传感器推扫成像,获取无缝条带状影像。通过在焦平面安置分光镜组件和多条 CCD 线阵,一次飞行中全色前、下、后视、R、G、B 和近红外波段 CCD 线阵分别以不同角度对地面进行扫描成像,不同角度的两波段影像分别构成立体。DMC 和 ADS40 的主要技术参数如表 1 所列。

DMC 和 ADS40 相机参数表

表 1

相机	焦距	CCD 像素大小	旁向幅面	航向幅面	旁向视场角	航向视场角
DMC	120 mm	12 μm × 12 μm	13 824 像素	7 680 像素	69.3°(全色) 72.8°(多光谱)	42°(全色) 52.35°(多光谱)
ADS40	62.77 mm	6.5 μm × 6.5 μm	12 000 像素		64°	42°

\* 收稿日期 2006—04—24

作者简介 苏小霞(1981—),女,硕士研究生,研究方向:RS 与 GIS 应用。

### 3 航空摄影测量工作流程

采用常规航摄影、DMC、ADS40 进行航空摄影测量的工作流程如图 1 所示：

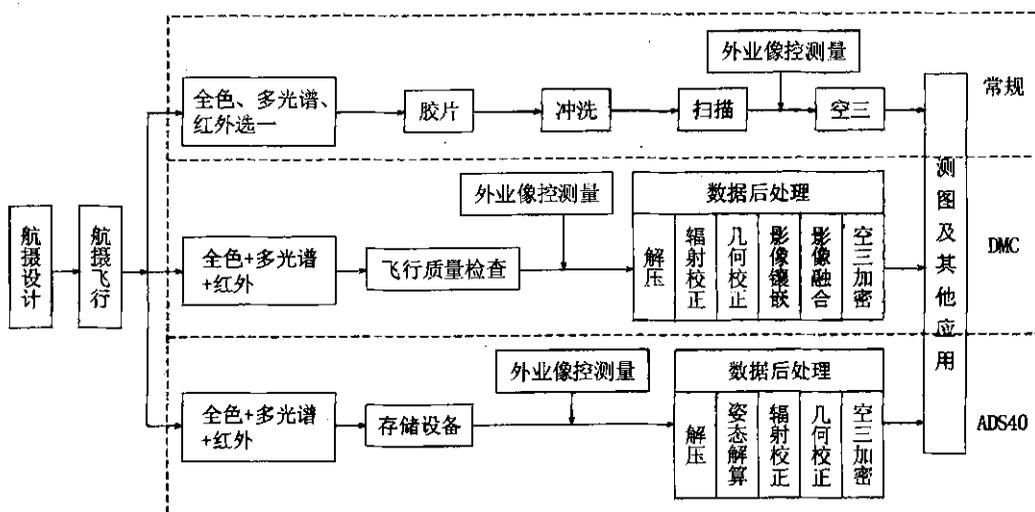


图 1 航空摄影测量流程图

从图 1 看出,数字航摄影航摄一次飞行可同时获取彩色和黑白影像,而采用常规航摄影则无法做到。同时,采用数字航摄影航摄比常规航摄影省略了冲洗扫描步骤,且无需使用胶片。

### 4 效率分析

本文主要通过飞行效率、冲洗扫描/数据预处理、外业像控测量、内业测图效率 4 个方面进行分析。

#### 4.1 DMC 数字航摄影效率分析

##### (1) 飞行效率分析

数字航摄影中,飞行高度( $h$ )、影像地面分辨率( $GSD$ )、航摄影焦距( $f$ )的关系可由图 2 表示,于是得

$$\text{公式 } \frac{a}{GSD} = \frac{f}{h} \text{ 即 } h = \frac{f * GSD}{a} \quad (1)$$

式中字母含义为： $h$ —飞行高度  $f$ —镜头焦距  $a$ —像元尺寸  $GSD$ —地面分辨率。

幅面宽与地面分辨率的关系为：

$$\text{幅面宽} = \text{幅面像素数} \times \text{地面分辨率} \quad (2)$$

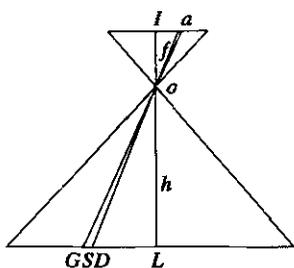


图 2  $h$  与  $GSD$  关系

据以上公式计算采用 DMC 航摄影进行不同比例尺航摄影的基本参数,结果如表 2。

DMC 及常规航摄影航摄影基本参数计算表 表 2

成图比例尺	航摄影仪	航高 /m	航向幅面宽度/m	旁向幅面宽度/m	地面分辨率/ $\mu$ m
1 : 500	常规光学	304	460	460	0.04( 20 $\mu$ ) 0.05( 25 $\mu$ )
	DMC	360 480	283 377	498 664	0.036 0.048
1 : 1 000	常规光学	608	920	920	0.08( 20 $\mu$ ) 0.10( 25 $\mu$ )
	DMC	720	566	995	0.072
1 : 2 000	常规光学	1 216	1 840	1 840	0.16( 20 $\mu$ ) 0.20( 25 $\mu$ )
	DMC	1 440	1 132	1 991	0.144
1 : 5 000	常规光学	3 040	4 600	4 600	0.40( 20 $\mu$ ) 0.50( 25 $\mu$ )
	DMC	3 000	2 358	4 147	0.300
1 : 10 000	常规光学	4 800	7 040	7 040	0.64( 20 $\mu$ ) 0.80( 25 $\mu$ )
	DMC	6 400	4 915	8 847	0.64
1 : 50 000	常规光学	9 120	13 200	13 200	1.2( 20 $\mu$ ) 1.5( 25 $\mu$ )
	DMC	9 120	6 989	12 580	0.91

以 1 : 2 000 成图比例尺为例进行分析：

①地面分辨率 :DMC 优于常规航摄影或持平。

②旁向幅面宽度 :DMC 相机( 1.991 km )比传统相机( 1.8 km )略占优( 8% )。即采用 DMC 相机飞行 12 条航线的区域,采用传统航摄影需飞行 13 条航线。从飞行时间看,DMC 相机与传统航摄影基本持平或略占优。

③航向幅面宽度 :DMC 相机( 1 132 m )比传统相机( 1 840 m )覆盖范围窄,这样造成相片数量增多( 63% )。

即采用传统相机飞行 100 片, DMC 需拍摄 163 片。

综合以上两因素, 进行 1 : 2 000 成图比例尺航测时, 在同样覆盖面积的飞行中, DMC 相机飞行效率(主要看航线条数及飞行时间) 优于传统航摄仪, 但采用 DMC 相机获得的相片数量多一半。这样, 将增加内业测图工作量。

以同样的方式分别对 1 : 500、1 : 1 000、1 : 5 000 和 1 : 10 000 成图比例尺航摄进行分析, 与 1 : 2 000 成图比例尺航摄结果基本相同, 即地面分辨率方面二者持平或 DMC 略优, 旁向幅面宽度 DMC 相机优于传统航摄仪( 1 : 5 000 航摄比例尺情况下传统航摄略优), 航向幅面宽度 DMC 相机逊于传统航摄仪。

对小比例尺航摄( 1 : 50 000 )进行分析发现: 由于受航高的限制, 小比例尺测图中 DMC 相机和传统航摄仪一般采用相同航高。在同样飞行高度上, DMC 相机地面分辨率优于常规光学相机, 旁向幅面宽度和航向幅面宽度方面稍逊于常规光学相机。

同时, 飞行效率也需考虑天气因素, 由于数码相机的光谱宽容度大、分辨率高, 因此对天气条件的要求没有传统航摄仪苛刻, 尤其是传统航摄仪彩色航空摄影对天气要求更高( 如能见度 5 ~ 10 km 左右)。据经验, 采用数字相机可获得 3 倍于传统相机航摄的可飞天气。因此, 从天气因素上考虑, 数码航摄仪可飞行天数的增加, 加快了航摄进度, 从而提高了飞行效率。

## (2) 冲洗扫描及数据后处理效率分析

与数字航摄相比, 采用传统航摄仪获得的资料是航摄底片, 想要获得用于测图的数字影像需经过冲洗、打号和扫描工序。冲洗和打号工序需要大量人力和设备, 一般在飞行完成后 10 ~ 30 h 完成。扫描工序十分耗时, 采用 25  $\mu\text{m}$  进行彩色底片扫描, 每张需 15 ~ 17 min 左右, 即每小时扫描 3 ~ 4 片, 若一架次飞行 1 000 张航片, 则需 250 ~ 334 h (昼夜不停扫描需 11 ~ 14 d)。

而数字航摄过程中, 数字影像直接存储在磁盘阵列中, 飞行完成后进行自动预处理, 一般常规航摄飞行 1 000 张航片的区域进行自动预处理仅需要 15 ~ 20 h。可见, 从飞行获取资料到生产出可供内业加密测图使用的数字影像方面的工序上, 数字航摄更具越势。

## (3) 外业像控测量效率分析

传统航摄区域网空三布点计算平高点及高程点间基线数可参考公式(3)<sup>[1]</sup> 计算后适当放宽。

$$\begin{aligned} M_s &= \pm 0.28K \cdot m_q \sqrt{n^3 + 2n + 46} \\ M_h &= \pm 0.88 \frac{H}{b} \cdot m_q \sqrt{n^3 + 23n + 100} \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $M_s$ —加密点的平面中误差/mm;  $M_h$ —加密点的高程中误差/m;  $K$ —像片放大成图的倍数;  $H$ —相对航高/m;  $b$ —像片基线长度/mm;  $m_q$ —视差量测的单位权中误差/mm;  $n$ —航线方向相邻控制点的间隔基线条数/条。

由公式(3)可见, 放大倍数和间隔基线条数相同, 加密点平面中误差与视差量测单位权中误差成正比。

①平面点间隔: 传统胶片式航摄中,  $m_q$  一般为 1/2 像元, 采用 DMC 航摄进行空三加密时,  $m_q$  为 1/6 ~ 1/4 像元, 比常规的  $m_q$  小一半左右, 因此进行同一成图比例尺飞行时, DMC 的放大倍数可适当增加, 或间隔基线条数适当增加。公式(3)为传统航摄时的经验公式, 不能简单代入计算 DMC 的基线条数。据中国测绘科学研究院石家庄摄区 1 : 12 000 航摄比例尺实验区经验, 采用 DMC 数字航摄时平面点间隔基线条数比胶片式航空摄影约放宽一倍。

②高程点间隔: DMC 数字相机( 焦距 120 mm ), 按照 62% 航向重叠飞行, 其基高比为 0.30。由公式(3)可见, 在间隔基线条数相同情况下, 加密点的高程中误差与视差量测的单位权中误差成正比, 视差量测的单位权中误差减小, 加密点的高程中误差也会随之减小。

③DMC 的基高比: 传统航摄仪( 以焦距 152 mm 为例) 按照规范, 航向重叠应为 60 ~ 65%, 即采用该焦距所获得的立体像对基高比为 0.605 ~ 0.530。如按 62% 计算基高比为 0.575。据中国测绘科学研究院经验, 采用 DMC 相机, 航摄比例尺 1 : 12 000, 成图比例尺 1 : 2 000 时, 平高控制点间基线条数可放宽至 10 ~ 15 条, 高程控制点间基线条数可放宽至 5 ~ 10 条。航摄比例 1 : 4 000, 成图比例尺 1 : 500 时, 平高控制点间基线条数可放宽至 8 ~ 12 条, 高程控制点间基线条数可放宽至 4 ~ 8 条。

结合飞行获得的像片数分析, 在航线数基本相当的情况下, 采用 DMC 相机航摄的摄区布设像片控制点数与采用传统相机航摄的摄区布设像片控制点数相当或略多 10 ~ 20%。

## (4) 内业测图效率分析

对于框幅式相机而言, 内业测图效率主要与所获取的相片数量有关, 具体分析见表 3( 传统航摄以扫描分辨率 23  $\mu\text{m}$  为例) :

对表 3 进行分析, 在同样区域面积的飞行中, DMC 相机与传统航摄仪效率( 主要看航线条数及飞行时间) 基本持平或 DMC 相机略优, 而采用 DMC 相机获得的相片数量要多, 约增加 14 ~ 50% 的内业测图工作量, 但随着计算机性能的提高和全数字摄影测量网站的普及应用, 内业工作量的增加对整体航空摄影测

图的效率和经费影响不大。而数字相机带来的优质图像、高清晰度、自动匹配程度高、影像调节、镶嵌自动化程度高等优点也能加快测图的进度。因此,总体而言二者效率基本相当。

内业工作量分析表 表3

成图比例尺	DMC航摄比例尺	传统相机航摄比例尺	旁向幅面宽度		面积覆盖/飞行能力		获得相片数量	
			DMC	传统	DMC	传统	DMC	传统
1:500	1:3000	1:2000	+8%		略优		+50%	
	1:4000		+44%		优		+18%	
1:1000	1:6000	1:4000	+8%		略优		+50%	
1:2000	1:12000	1:8000	+8%		略优		+50%	
1:5000	1:25000	1:20000	+8%	+10%	略优		+15%	
	1:30000			略优		+50%		
1:10000	1:53300	1:32000	+26%		优		+14%	
1:50000	1:75800	1:50000		5%	略优		+38%	

#### 4.2 ADS40 数字航摄仪效率分析

##### (1) 飞行效率分析

采用 ADS40 数字航摄仪航摄,飞行高度、影像地面分辨率、航摄仪焦距满足公式(1)所述关系,幅面宽和地面

飞行效率分析表

表5

比例尺	旁向幅面宽	地面分辨率	飞行时间
1:500	DMC > ADS40 > 常规光学	DMC > 常规光学 > ADS40	常规光学 > ADS40 > DMC
1:1000	DMC > ADS40 > 常规光学	DMC > ADS40 > 常规光学	常规光学 > ADS40 > DMC
1:2000	DMC > 常规光学 > ADS40	DMC > ADS40 > 常规光学	ADS40 > 常规光学 > DMC
1:5000	ADS40 > 常规光学 > DMC	DMC > ADS40 > 常规光学	DMC > 常规光学 > ADS40
1:10000	DMC > 常规光学 > ADS40	ADS40 > DMC > 常规光学	ADS40 > 常规光学 > DMC
1:50000	常规光学 > DMC > ADS40	ADS40 > DMC > 常规光学	ADS40 > 常规光学 > DMC

##### ①均采用常用航高的情况

分析结果如表5。均采用常用航高的情况下,大比例尺航摄中,地面分辨率 DMC 航摄仪最优,ADS40 次之,常规光学航摄仪稍逊(1:500比例尺情况下,常规光学航摄仪优于 ADS40);旁向幅面宽度方面,1:500、1:1000、1:2000比例尺航摄中 DMC 具有一定优势,ADS40 与常规航摄相当,1:5000比例尺中 ADS40 最优,DMC 略逊色。中小比例尺航摄中,受航高限制,ADS40 航摄仪旁向幅面宽度较小,效率略低。

##### ②均采用相同航高的情况

数字航摄中,地面分辨率取决于焦距与像元尺寸,旁向幅面宽度则取决于旁向像素数和地面分辨率,通过计算发现,在相同航高前提下,采用上述3种航摄仪的地面分辨率和旁向幅面宽度变化情况不随航高改变而改变,分别为 DMC ≥ ADS40 > 常规航摄仪和常规航摄仪 > DMC > ADS40。

即数字航摄在地面分辨率方面有一定优势,但飞行航线数较常规有所增加,同时,需要考虑 ADS40 独特的线阵推扫成像方式,无需考虑航向重叠和接边且采用数码航摄技术,弥补了旁向幅面宽度较窄的缺陷。

分辨率满足公式(2)所述关系,依据上述两公式计算基本参数,结果如表4所示,其中蓝色部分为常用航高情况。

ADS40 航摄基本参数计算表

表4

成图比例尺	航高/m	航摄比例尺	旁向幅面宽度/m	地面分辨率/m
1:500	386	1:6154	480	0.04
	483	1:7692	600	0.05
1:1000	772	1:12000	960	0.08
	966	1:15000	1200	0.10
1:2000	1545	1:24600	1920	0.16
	1931	1:30800	2400	0.20
1:5000	3862	1:61500	4800	0.40
	4828	1:76900	6000	0.50
1:10000	4800	1:76800	6000	0.50
	6180	1:98000	7680	0.64
1:50000	7600	1:121000	9580	0.79

由于 ADS40 数字航摄仪采用线阵推扫式成像方式,所获得的影像为无缝条带影像,不存在航向幅面宽度的概念。其飞行效率主要受旁向幅面宽度的影响。对表2和表4进行联合分析:

##### (2) 冲洗扫描及数据后处理效率分析

作为数字航摄的一种,ADS40 航摄与常规航摄相比,同样省去了冲洗扫描及打号工序,且飞行所获取的数据后处理的自动化较强,在中测新图公司承担的 ADS40 实验项目中,摄影航线总长度约为550 km,总数据量大小为63 GB,程序自动处理直至提取连接点完成共需要15小时左右,后续空三处理根据作业员的熟练程度有所不同,一般为5~8 h左右,即进行自动数据预处理获得可供下工序使用的数字影像所需时间仅为20~30 h。可见,与常规航摄相比,效率大有提高,与 DMC 航摄相当。但是,也需要考虑到 ADS40 作为一种新兴的数字航摄仪,其后处理软件还不太成熟,对数据后处理的效率也会造成一些影响。

##### (3) 外业像控测量效率分析

由于 ADS40 采用线阵扫描方式成像,获得无缝条带影像,对外业像控点的要求有别于框幅式相机,无需布设高程控制点,同时无需按照基线间隔的概念布设平高控制点,只需满足对摄区的整体控制即可,一般在摄区拐角及中心分别布设平高控制点,所需外业像控点个数相当于常规航摄的十分之一或几十分之一。

(4) 内业测图效率分析

采用框幅式航摄仪获取的是单张相片,而采用 ADS40 数字航摄所获取的是整条无缝影像,无需进行相片间的内定向,这就大大节省了内业空三和测图的工作量,同时,在生成 DLG 和 DEM 时无需进行航向接边,而相同区域所需要飞行的航线条数,ADS40 与传统航摄仪基本持平,比 DMC 相机少,因此,总体而言,在内业测图效率方面,采用 ADS40 数字航摄比采用传统航摄仪和 DMC 相机在效率上有所提高。

然而,许多从事航摄内业成图的企业现已经拥有了一套或多套框幅式航摄仪内业成图的处理设备,而对于推扫式航摄仪,则必须引进专门的设备,这也将增加一定的投资。

5 用于西部测图的优劣势分析

我国西部,由于海拔高,地型高差大等地形特征,给航空摄影增加了一定难度。尤其是由于地形高差大而引起的地物遮挡问题,成为西部测图中一个难点。地物遮挡主要与地形高差和所采用的航摄仪的视场角有关,对相同地形进行摄影时,地物遮挡则主要取决于航摄仪的视场角,如图 3 所示:

图 3 中,  $\alpha$  表示垂直照射光线与前视光线间的夹角(对于框幅式航摄仪  $\alpha = 1/2 \times$  视场角,对于推扫式航摄仪  $\alpha$  为其前视角)  $d$  表示产生的遮挡范围,  $H$  表示地形高差。由图可得公式  $d = H \times \tan\alpha$  (4)

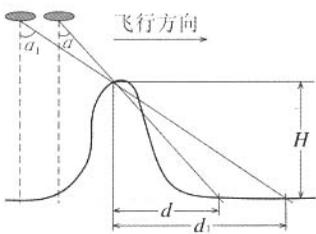


图 3 地形遮挡示意图

由于西部广大地区平均高程在 4 000 m 左右,受飞机飞行绝对高程的限制,常采用的航高为 4 500 m 左右。以相对航高 4 400 m 为例,对数字航摄仪与传统航摄仪在西部地区的应用进行对比。

飞行效率参数比较 表 6

航摄仪	相对航高	焦距 /mm	旁向视场角/°	航向视场角/°	旁向幅面宽/m	地面分辨率/m
常规航摄仪		88	105	105	11 500	1 ~ 1.25
		152	74	74	6 631	0.6 ~ 0.7
ADS40	4 400	62.77	64	前视 28 后视 14	5 400	0.45 ~ 0.5
DMC		120	72.8	42	7 327	0.53

分析表 6 可以看出:

(1) 在相同航高的情况下,旁向视场角和航向视场角由大到小的顺序为:常规航摄仪、DMC、ADS40。视场角越大,地物的遮挡情况越明显,越容易造成像对漏洞;西部地区高差较大,易造成地物遮挡,数字航摄仪在这方面比常规航摄仪有明显优势,其中以 ADS40 最优;

(2) 在旁向幅面宽度方面:相同航高情况下,常规航摄 > DMC > ADS40,即飞行效率 ADS40 最低,DMC 次之,常规航摄最佳;

(3) 在地面分辨率方面:在同等可飞行高度条件下,ADS40 > DMC > 常规航摄仪,说明数字航摄仪可以适合更大比例尺地形图及正射影像图的生产。

(4) 与传统航空摄影相比,数字航摄仪可以在一次航摄中同步获取多波段的影像。所获取的多光谱波段影像将大大增强影像判读调绘的能力,而且可以直接用于遥感解译中,不仅在地形图测制方面,在农、林、环保、水利等方面都能够应用,实现一摄多用。

总之除受飞行高度所限造成的覆盖宽度的劣势外,数字航摄在西部及困难地区航摄成图中更有优势。

6 应用展望

以上分析表明,数字航摄仪在航摄效率方面明显优于传统航空摄影,同时,随着技术的进步,数字航摄仪技术也越来越成熟,不再只局限于小比例尺航摄,在大比例尺航空摄影中同样显示了其优势所在。同时,框幅式数字航摄仪与 GPS/IMU 的集成使用,会大大减少地面控制,从而提高航空摄影测量的效率。随着软件技术的进一步发展,数字摄影测量后处理也将逐步实现全自动化,这为数字摄影测量开辟了更加广泛的应用领域和应用前景。

参考文献

[1] GB12341-90. 1:25 000、1:50 000、1:100 000 地形图航空摄影测量外业规范。  
 [2] 刘军,张永生,范永弘. ADS40 机载数字传感器的摄影测量处理与应用. 测绘学院学报. 2002-9.  
 [3] Felix Zuberbuhler. 040811-ADS40-intro-to-contrast-adaptation-color handling. Leica Geosystems 2004 Airborne Sensor Workshop.  
 [4] Leica Company. ADS40 Documentation. 2005-1.  
 [5] 李德仁. GPS 用于摄影测量与遥感[M]. 北京:测绘出版社,1996.  
 [6] 李学友. IMU/DGPS 辅助航空摄影测量综述[J]. 测绘科学 2005(5):7-27.