

〈综述与评论〉

航空相机成像技术研究

赵建川¹, 张润琦², 王杰², 邵毓³, 申越⁴, 刘传明²

(1. 海军驻长春地区航空军事代表室, 吉林 长春 130033; 2. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650223;
3. 吉林东光精密机械厂, 吉林 长春 130103; 4. 中国兵器科学研究院, 北京 100089)

摘要: 无论是军事领域战术和战略侦查, 或者是民用领域测绘、精细农业、海岸资源勘察和地图导航等应用, 随处可见航空相机的身影。本文先介绍了几款 20 世纪典型的航空胶片相机以及它们的工作方式, 然后将航空数字相机按工作方式分成了扫描型航空相机、步进凝视型相机和多镜头数字相机 3 类, 简要介绍了其工作方式的原理及特点, 并分别列举了相应的航空数字相机。最后对航空相机发展趋势进行了总结与展望。

关键词: 航空相机; 推扫成像; 摆扫成像; 步进凝视成像; 倾斜相机; 下视相机; 多镜头相机
中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2020)-02-0101-14

Research on Aerial Camera Imaging Technology

ZHAO Jianchuan¹, ZHANG Runqi², WANG Jie², SHAO Yu³, SHEN Yue⁴, LIU Chuanming²

(1. Aviation Military Representatives Office of Navy in Changchun District, Changchun 130033, China;
2. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China; 3. Jilin Dongguang Precision Mechanism Factory, Changchun 130103, China;
4. Institute of China Ordnance Science, Beijing 100089, China)

Abstract: Whether they are applied in tactical and strategic investigations in the military, in civil field mapping, fine agriculture, coastal resource exploration, or map navigation, aerial cameras can be seen everywhere. This article first exemplifies several typical aerial film cameras of the 20th century and introduces how they work. Then, the aeronautical digital cameras are divided into three categories according to their working methods. The principles and characteristics of these working methods are briefly introduced and some typical examples of aerial digital cameras are given. Finally, the development trend of aerial cameras is summarized and predicted.

Key words: aerial camera, push broom imaging, whisk broom imaging, step-stare imaging, oblique camera, nadir camera, multi-lenses camera

0 引言

自 1915 年, 英国为了在一战中占据主动地位, 首次使用半自动航空相机侦查德方占领区至今, 航空相机已经历了数代发展, 其性能和功能都得到了不断提高^[1]。早期的航空相机均为胶片相机, 20 世纪 70 年代起, 使用电荷耦合器件 (charge-coupled device, CCD) 的数字相机步入人们视野。由于数字相机具备实时传输图像至地面的能力, 因此数字相机逐渐占据主导地位, 但胶片相机性能可靠且分辨率高, 至今仍在航空相机中占有一席之地^[2], 因此也有胶片拍摄与数字拍摄双功能的相机。本文将数字航空相机按照成

像方式分为 3 类: 扫描型、步进凝视型和 (无扫描) 多镜头型。当然, 同一航空相机可以使用多种探测器或设计成同时采用多类工作方式, 以获取更多维度、更多波段和更高分辨率的信息。下文将分别介绍胶片航空相机和数字航空相机, 并将数字相机上述 3 类分别进行介绍。

1 胶片式航空相机

胶片航空相机 (以下简称为胶片相机) 是使用感光材料附着在胶片作为载体, 拍摄后的胶片要经过冲洗才能得到照片的相机。早在 20 世纪初, 英、美等发达国家就已开始研制生产胶片式航空相机,

收稿日期: 2018-11-27; 修订日期: 2018-12-11.

作者简介: 赵建川 (1969-), 男, 高级工程师, 光电装备监造, E-mail: 465302230@qq.com.

此时的胶片相机处于起步阶段，其分辨率较低，焦距较短，载片量也较少。20世纪60年代~80年代，胶片航空相机进入了高速发展的时代。在这期间，很多载片量大、焦距长且地面分辨率高的胶片航空相机相继问世^[3]。其中，1969年CAI制造的KS-87系列侦查相机是一款全球使用量最大的航空胶片相机并有多多个衍生型号，相机配备于OC-135B、RF-4、RF-5E、RF-101、U-25B、F14、F16C等当时主流飞行器上，其中KS-87B结构分解如图1所示^[4]。

1974年，随着航空侦查对侦查距离的要求不断提高，CAI研制出了世界上第一款焦距达66 in 并采用 $f/8$ 光学设计的胶片相机KS-127A。在良好天气下，这款能获取30 nmi (55.5 km)外目标详细信息的相机，使配备了该相机的RF-4甚至拥有了战略侦查能力，KS-127A外观如图2所示^[5]。

到了20世纪70年代末80年代初，体积更小、功能更多的全景胶片相机问世。配备于RF-5E的KA-95相机与配备于RF-4B的KS-116代表着这一阶段先进成熟的全景胶片相机。同之前提到的KS-87B与KS-127A一样，两者也均采用5 in 胶片格式，KA-95与KS-116采用焦距为125 in、 $f/4.0$ 的光学系统设计，它们的外形分别如图3所示^[6]。

KS-116与KA-95拥有前向运动补偿，主动稳像控制，自动曝光控制和自动调焦控制以及扇区扫描等

功能。前向运动补偿功能是为了避免载具向前运动造成成像模糊。主动稳像控制可以让相机自行感知运动状态，而不依赖外部总体系统也不受其影响。自动曝光控制可以使相机获得更高的成像质量，而自动调焦控制则可以使相机在拍摄过程中保持较高的成像清晰度，扇区扫描则能让相机以 50° 角度间隔自由选择扫描区域，范围从 $40^\circ\sim 190^\circ$ 。采用扇区扫描的KA-95拍摄的样本照片如图4所示^[6]。

到了20世纪80年代末，胶片相机技术已发展得相当成熟。虽然胶片相机拥有上述同时代的CCD相机无法比拟的优势，但由于胶片相机无法像CCD相机那样，将拍摄的图像实时传输到地面，因此发达国家开始研制具备胶片与CCD拍摄双功能的航空相机。比如20世纪80年代，Eastman Kodak公司和Recon/Optical公司联合开发的具备CCD和胶片拍摄双能力的航空摄像机系统CA-990。该系统总重1082 kg，可装于机腹副油箱中并挂载于F-4和F15飞机上^[7]。随着20世纪70年代以来CCD器件的高速发展，拍摄后的胶卷要经过冲洗才能得到照片，在拍摄过程中也无法知道拍摄效果的好坏的胶片相机，相继被改成具备CCD和胶片拍摄双功能的航空相机，比如KA-102A和KS-153A等。数字化相机由此登上了航空相机历史的舞台，并逐渐成为发展趋势^[8-10]。

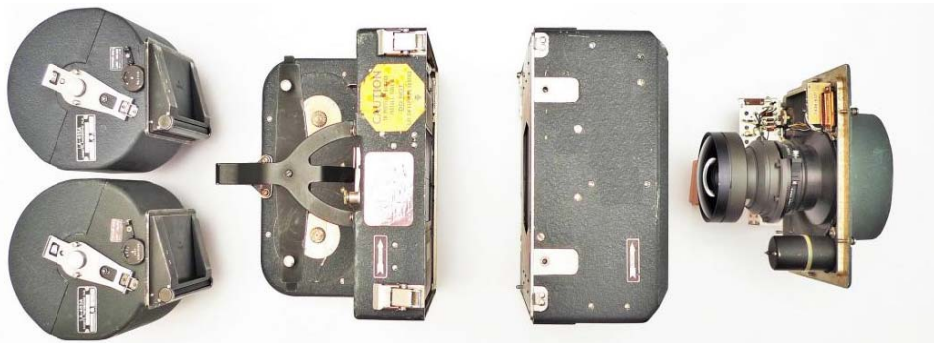


图1 KS-87B 结构分解图

Fig.1 Aerial camera KS-87B

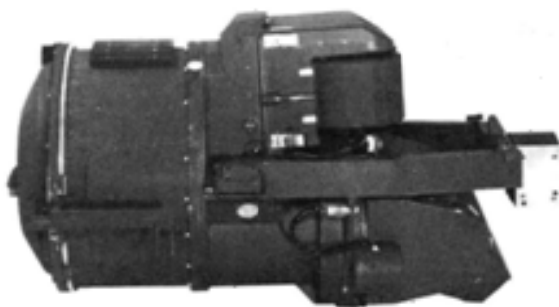


图2 胶片相机 KS-127A 外观

Fig.2 Aerial camera KS-127A

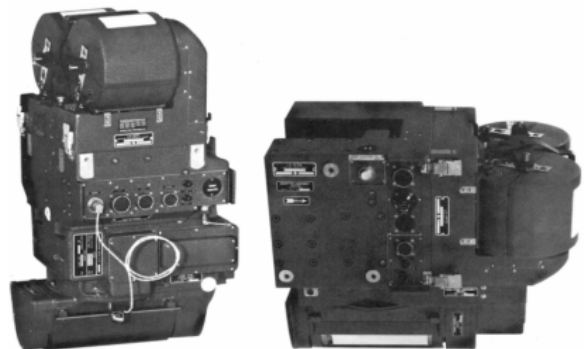


图3 KS-116 (左) 与 KA-95 (右) 外形

Fig.3 Aerial camera KS-116 (left) and KA-95 (right)

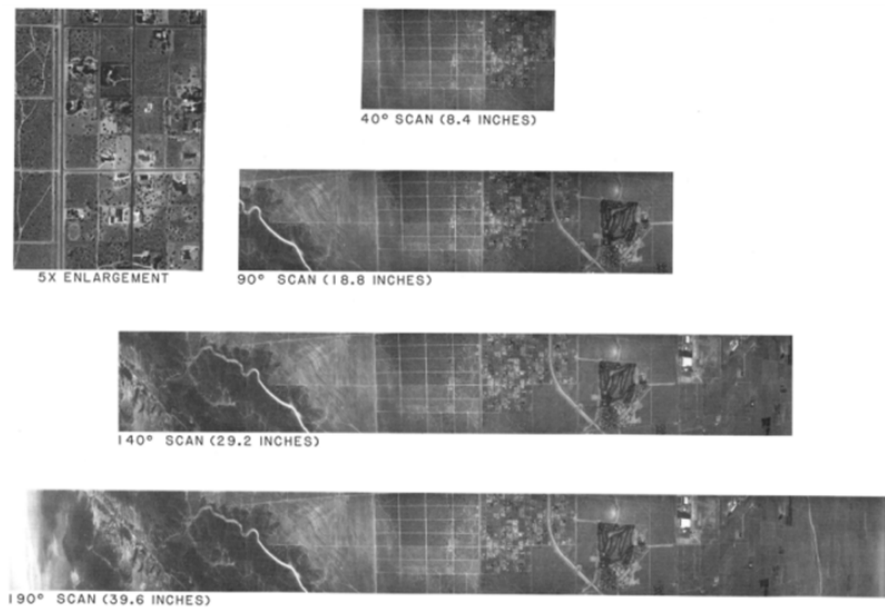


图4 KA-95使用不同角度扇区扫描拍摄的样本图

Fig.4 The photos of aerial camera KA-95 with sector scanning of different angle

2 数字航空相机

2.1 扫描型航空相机

扫描型数字相机采用线阵 CCD 或时间延迟积分 (time delay integration, TDI) CCD 进行扫描成像的相机。线阵 CCD 的长度决定了航空相机扫描地面覆盖范围, 一般来说, 扫描型数字相机线阵单元在 4000~14000 个之间。研制 CCD 探测器水平较高的公司主要有 Atmel (法国), e2v (英国), Kodak (美国) 和 Fairchild (美国), 一款 e2v 公司的线阵 CCD 探测器如图 5 所示^[11]。

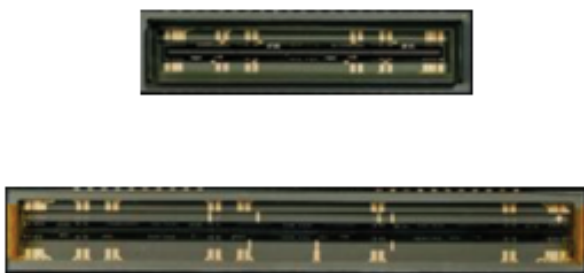


图5 e2v公司的线阵 CCD 探测器

Fig.5 Line array CCD detector of e2v Ltd.

线阵 CCD 在拍摄运动目标的时候, 需要良好的光照, TDI CCD 则是一种能在低照度条件下捕捉运动物体的探测器, 在获得高灵敏度的同时不牺牲空间分辨率和工作速度, 还能一定程度上增加系统的信噪比、分辨能力和响应均匀性, 因此 TDI CCD 在高速、微光领域具有广泛的应用前景。从其结构来看, 多个线阵平行排列, 像元在线阵方向和级数方向呈矩形排列^[12]。TDI CCD 的工作原理如图 6 所示, 在第一个积

分周期, 目标在其中一列的第一个像元处进行曝光积分, 但得到的光生电荷并非如线阵 CCD 一样读出, 而是移动至下一个像元。在第二个积分周期, 目标在该列的第二个像元处曝光, 得到新的光生电荷与上一个像元移来的电荷相加再移到下一个像元, 直到第 M 个积分周期结束时, 第 M 个像元的光生电荷与第 M 个像元前面所有像元的电荷相加后读出。可见读出的电荷是单个像元的 M 倍, 而噪声只增加了 \sqrt{M} 倍, 从而信噪比提高了 \sqrt{M} 倍^[13-14]。

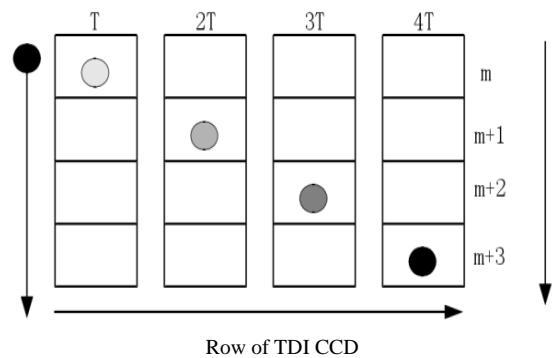


图6 TDI CCD 工作原理图

Fig.6 Diagram of TDI CCD

扫描型数字相机的拍摄方式主要分为推扫和摆扫两种, 两种方式的瞬时视场均是一维视场, 不需要快门, 采用连续曝光的方式成像^[15-16]。其中推扫式成像模型如图 7 所示, 推扫式相机随飞行器沿 X 轴移动, 在垂直于飞行方向 (Y 轴) 的一维视场连续曝光成像^[17]。根据图中角度 Δ 的不同, 推扫式相机还可分为“前视型”与“后视型”相机, 为了提高成像质量, 获取空间多维度信息, 也可同时装配多个角度 Δ 不同的线阵

CCD 同时扫描景物，比如下文介绍的三线推扫模式，在一个一维扫描行中， θ_{\max} 为一行最大扫描角度， N 为一行扫描的像元数，则焦距 f 可由公式(1)表示^[18-19]：

$$f = \frac{(N-1)/2}{\tan(\theta_{\max}/2)} \quad (1)$$

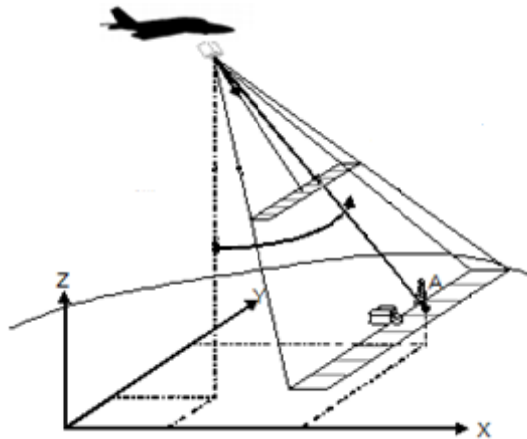


图7 推扫式成像模型

Fig.7 Push broom mode

摆扫式成像模型如图8所示，不同于推扫式相机，摆扫式相机通过一个伺服机构来回旋转使平行于飞行方向的一维视场覆盖整个地面场景。因此，摆扫式相机的视场范围不再受限于探测器，可根据设计需求做到很大^[20]。

可以看出，摆扫式成像会带来一定的成像畸变，需要通过前向位移补偿技术消除。成像畸变是由快门打开时飞机前向运动造成成像偏移，成像偏移(blur)可由公式(2)计算得出。

$$\text{blur} = V \cdot \frac{f}{H} \cdot \Delta t \cdot \cos \theta \quad (2)$$

式中： V 为飞行器相对地面的飞行速度； f 为焦距； H 为飞行高度； Δt 为快门曝光时间； θ 为当前扫描位置

与垂直扫描位置之间的夹角。表1总结了推扫式相机与摆扫式相机的特点。

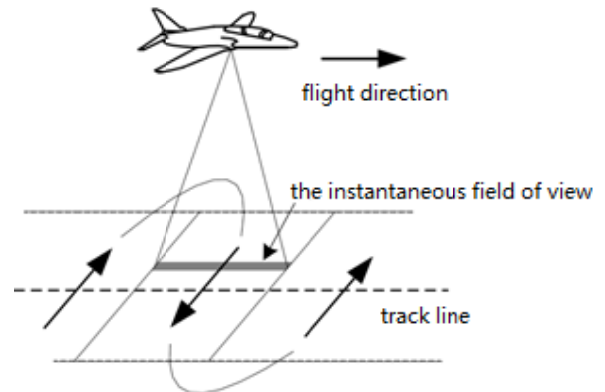


图8 摆扫式成像示意图

Fig.8 Whisk broom mode

表1 推扫式相机与摆扫式相机的特点

Table 1 Specificities of push broom and whisk broom camera

Push broom camera	Whisk broom camera
Narrow field of view	Wide field of view
Simple in structure	Complex in structure
Complex in optical system	Simple in optical system
Non distortion in image	Distortion in image
Long scan time	Short scan time

下文介绍一些典型的扫描型相机，包括 Thales Optronics 公司（前身为 Vinten 公司）的单线阵推扫相机 TYPE-8010 与 TYPE-8042，莱卡公司的三线推扫相机 ADS40 以及 Goodrich 公司的双波段相机 DB-110。其中，DB-110 相机可见光波段成像采用摆扫模式，而红外波段成像采用的是步进凝视，步进凝视将在本章 2.2 节介绍。

1992 年起，Thales Optronics 公司先后为英国配备了多款单线扫描型相机，在这些用以拍摄高清单色的相机中，具有代表性的是 TYPE-8010 与 TYPE-8042，其外观如图9所示^[21]。

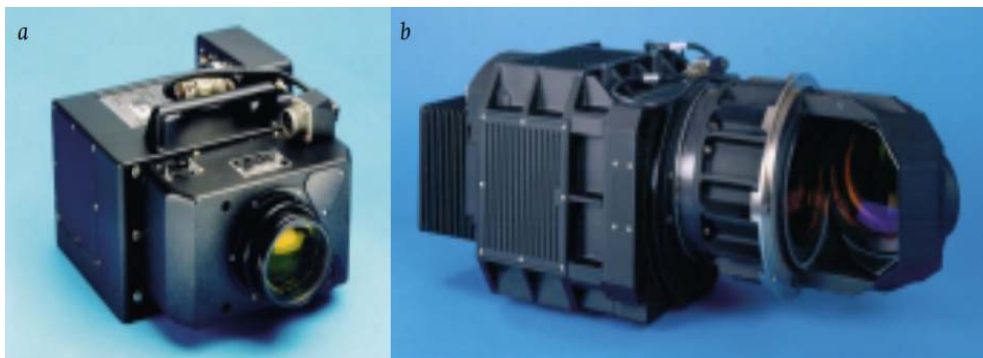


图9 TYPE-8010 (左) 与 TYPE-8042 (右)

Fig.9 Aerial camera TYPE-8010 (left) and TYPE-8042 (right)

TYPE-8010 是用于低空拍摄的推扫式相机, 由英国 e2v 公司提供的线阵 CCD 拥有 4096 个像元, 像元尺寸为 $12\ \mu\text{m}$ 。该探测器波长覆盖范围均从 $500\sim 950\ \mu\text{m}$ (绿光至近红外), 扫描速率为 1800 行/s。TYPE-8010 可以根据拍摄需求更换镜头, 可选焦距有 152 mm, 76 mm 与 38 mm 三种。TYPE-8042 则是用于高空拍摄的摆扫式相机, 同样是由英国 e2v 公司提供的线阵 CCD 波长覆盖范围也是从 $500\sim 950\ \mu\text{m}$ (绿光至近红外), 扫描速率为 1800 行/s。但该线阵 CCD 拥有 12228 个像元, 像元尺寸为 $8\ \mu\text{m}$ 。为了实现广阔的视场覆盖范围, TYPE-8042 采用的是 450 mm 长焦距镜头。

1997 年初, 莱卡公司和德国航空航天公司签署了一项协议, 合作设计和生产一种专门用于商业成像和测绘的机载推扫相机 ADS40。首台样机于 1998 年底完成试飞实验, 并于 2001 年首次交付投入使用, 其安装在日本 PASCO 公司 Cessna Caravan 飞机上的外观如图 10 所示^[22]。



图 10 日本 PASCO 公司 Cessna Caravan 飞机上的 ADS40
Fig.10 Aerial camera ADS40 assembled on Japan PASCO Cessna Caravan airplane

该样机是典型的三线推扫相机, 三线推扫模式即采用推扫模式在前、下、后 3 个方向使用 3 个线阵 CCD 同时扫描, 如图 11^[22]所示。这样的拍摄模式可以获取三维立体空间信息。ADS40 相机的前视 CCD 阵列与下视 CCD 阵列之间的夹角为 28.4° , 后视 CCD 阵列与下视 CCD 阵列之间的夹角为 14.2° 。以上提到的这些 CCD 阵列均包含两个线阵 CCD。这些线阵 CCD 像元尺寸均为 $6.5\ \mu\text{m}$, 像元数为 12000, 线阵 CCD 之间有半个像素 ($3.25\ \mu\text{m}$) 的错位, 该设计用以提高几何分辨率。另外在焦平面上, ADS40 还安装了 4 个额外的拥有 12000 像元线阵 CCD, 分别用来记录地面场景的 RGB 信息和近红外信息。飞行器飞行期间, 每一个 CCD 阵列独立地连续记录每一列影像。由此, 在全色波段的覆盖范围内, 几乎每个物体都被摄影了 3 次 (墙面等特殊情况下除外), 摄影区域内大

部分范围实现了三度重叠, 包含了足够的三维立体信息。如今, ADS40 在测绘、精细农业、海岸资源勘察和管理等方面均得到了广泛的应用^[23]。

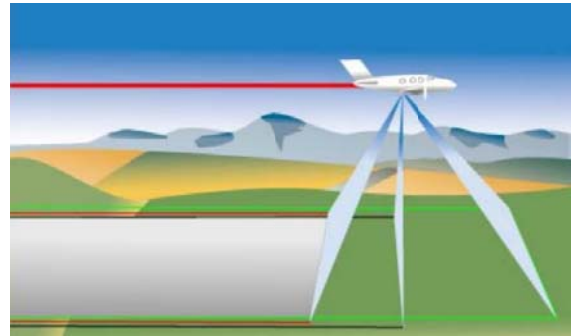


图 11 ADS40 三线扫描示意图

Fig.11 Scheme of ADS40 3 line scan

从 20 世纪 90 年代中期, Goodrich 公司开发了第一代 DB-110 至今, DB-110 航空相机系列已广泛运用于 Tornado, F-111, F4, P-3, F-15, F-16, Predator B 等载人或无人飞行器上。

DB-110 拥有可见光及近红外 (VNIR) 以及中波红外 (MWIR) 两个探测器以及两组光学系统, 整个系统组成如图 12 所示, 相机参数如表 2 所示^[24-25]。



图 12 DB-110 相机系统结构

Fig.12 Configuration of DB-110 camera

DB-110 拍摄模式如图 13 所示, 左图为相机使用 TDI 线阵 CCD 在飞行器左侧进行摆扫拍摄示意图, 右图为面阵红外探测器在飞行器左侧进行步进凝视成像。DB-110 双波段航空相机在白天所拍摄的样本图片如图 14 所示^[26-28]。

2.2 步进凝视型相机

步进凝视型相机使用凝视型面阵 CCD 或 CMOS 传感器。面阵传感器单次曝光便可立即获得大面积区域的图像, 这一特性使得飞机能够从安全高度快速上升, 短时间内获取目标区域图像, 再快速下降逃离危险区域。而线阵传感器, 因其成像原理, 一定程度上会限制飞机的机动。因此特别时刻使用面阵传感器能够提高飞机和机组人员生存率^[29]。

步进凝视型相机，不像扫描型相机能那样够进行连续的图像采集，需要和视场中的场景保持相对静止，以完成一次有效的曝光（探测器积分）。如图15所示为3种步进凝视型相机的凝视方式及拍摄覆盖面。相机拍摄完一次航带旁向的刈幅（扫描带，图15中的swath）为一个周期。在一周期内，相机每对一个区域完成曝光后，相机视线沿刈幅移动到下一个相邻区域，进行下一帧的图像曝光。完成一周期拍摄后，相机的视线指向下一个刈幅，开始新一轮的图像拍摄。相机视线的运动轨迹可以为“S”形或“Z”形。拍摄过程中，要求相邻帧之间以及相邻刈幅之间有一定的重叠率。典型的步进凝视型相机的拍摄覆盖面如图15(d)所示。

步进凝视成像过程中要求一次曝光中，相机视场中的场景相对静止，因此需要进行前向位移补偿(FMC)^[30-31]。FMC可以通过反射镜补偿^[32]、二轴框架补偿^[33-34]和FPA片上电子补偿^[4,29]等多种技术实现。相机的视线移动方式有多种，比如通过框架直接旋转传感器^[33-34]，旋转步进扫描镜^[35]和旋转棱镜^[36]等等，如图15(a)~(c)所示。

表3列出了部分步进凝视型航空数字相机的型号
表2 DB-110相机两个波段参数

和相关数据。

2.3 多镜头数字相机

多镜头数字相机使用多个镜头和面阵CCD/CMOS传感器，以达到高分辨、宽覆盖面、多波段和多视角的目标。本节讨论的多镜头数字相机仅限于无运动部件的相机。根据相机镜头光轴的朝向，将多镜头数字相机分为两类：多镜头倾斜数字相机和多镜头下视数字相机。

2.3.1 多镜头倾斜相机

航空倾斜相机在军事、科研和民用领域均有大量应用，诸如军事侦察监控、地图测绘和环境测控等等。最早的倾斜航空相片于1860年由J. W. Black和S. King在美国波士顿上空拍摄。20世纪期间出现了多款多镜头胶片倾斜航空相机，如图16中的Fairchild的3镜头T-3A和9镜头USGC-9，Zeiss的3/5镜头KS-153系列和3镜头KRb 8/24 F，主要用于军事侦察、监控和地图制图^[37-43]。随着大面阵CCD和CMOS传感器技术的成熟和数字式多镜头倾斜成像技术的发展，多镜头倾斜数字相机的成像能力得以超越胶片式相机。近30年，出现了多款超高分辨率多镜头倾斜相机。

Table 2 Parameters of DB-110 camera

Detector type	VNIR	MWIR
Detector	5120×64 TDI CCD	512×484 Indium antimonide medium wave detector
Spectral region	0.4–1.0 μm	3.0–5.0 μm
Data format	10 bit	12 bit
Pixel size/μm	10	25
First optical system	Long focal length optical system (Generally over a distance of 20 miles)	
Focus/inch	110	55
Optical system aperture	F/10	F/5
Second optical system	Short focal length and wide field of view optical system(Generally within 40 miles)	
Focus/inch	16	14
Optical system aperture	F/10	F/5

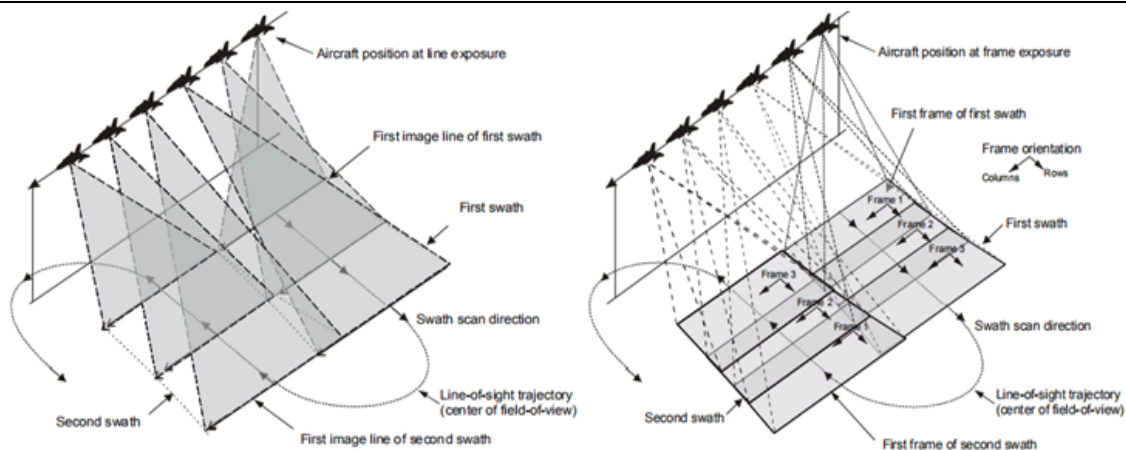


图13 DB-110拍摄模式，左图为可见光摆扫，右图为红外步进凝视
Fig.13 Whisk broom in visible (left) and step-by-stare in IR (right) of DB-110 camera

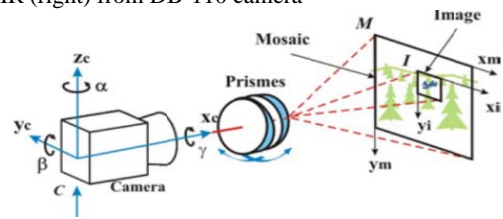


图 14 DB-110 拍摄的样本相片，左图为可见光相片，右图为红外相片

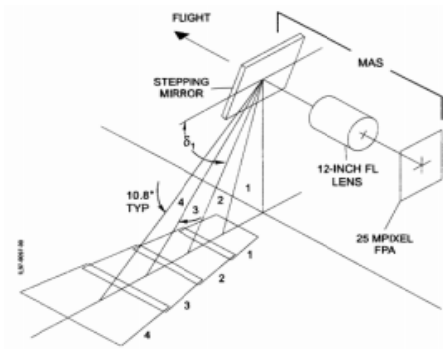
Fig.14 Imagery in visible (left) and in IR (right) from DB-110 camera



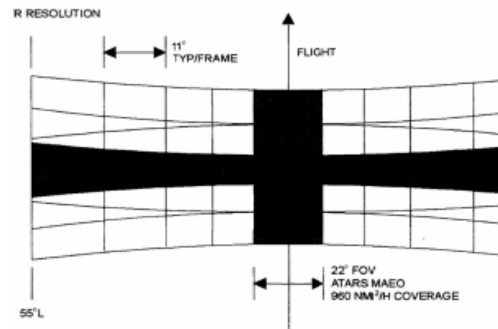
(a) Two-axis Gimbal (MS-177)



(b) Prism



(c) Step-scan mirror



(d) Schematic of coverage

图 15 三种步进凝视方式/结构以及拍摄覆盖面

Fig.15 Three configurations with step-by-stare scan and the corresponding coverage

表 3 步进凝视型航空数字相机 Table 3 EO/IR camera with step-by-stare scan

Type	Detector / Band	Focus / FOV	Scan Range	Working Height	GSD
ROI CA-270	VIS/NIR: 5000×5000 MWIR: 2000×2	VIS-MWIR: 18 inch 6.3°×6.3°	180°	Low-Middle altitude	Nadir@20000 ft VIS: 1.3 ft
ROI CA-295	VIS: 5000×5000 MWIR: 2000×2000	VIS: 50–100 in IR: 50 in	Single side > 70°	Low-Middle altitude	@NIIRS-5 VIS: 40 nmi
BAE F-9120	VIS: - MWIR: -	VIS: 120 in, 14.5 in IR: 60 in, 10.9 in	@40000 ft 36–90 nmi	-	NIIR-@31 nmi (estimated)
ELOP Condor TAC	VIS: 11M × 4 IR: 640×512 × 4	VIS: 400 mm, 50 mm IR: 300 mm, 85 mm	10°	Low-Middle altitude	-
ELOP Conder2 LOROP	VIS: - MWIR: 2048×16 TDI	-	~30°	10000–60000 ft	-

Continued Table 3

Type	Detector/Band	Focus/FOV	Scan Range	Working Height	GSD
Recce Pod	VIS: 2000×2000 MWIR: 640×512	VIS: 42-270 mm IR: 0.9°×0.7°, .7°×2.8°, 24°×18°	360°	Low-Middle altitude	@NIIRS-5 VIS: 20 km IR: 16 km
DB-110 (3rd)	MWIR: 640×512×2 VIS/NIR: 6144×128 TDI	VIS/NIR: 100 in, 16 in IR: 55 in, 1 in, 2.5 in	180°	1000–50000 ft	>NIIRS-5 @50 nmi
SYERS-2	VIS: Pan, R, G IR: MW, SW1, SW2 MIX: SW, G, Pan	>2°	-	Same altitude of U-2	>NIIRS-7 @20000 m
MS-177(A)	117type: 7 bands 117A type: 10 bands	-	90°	>37000 ft	-
A3 Edge	RGB, NIR: 78000×9600	300 mm	106°	Low-Middle altitude	30 cm@33251 ft

注: NIIRS: National Imagery Interpretability Rating Scales, in: 英寸, ft: 英尺, nmi: 海里

Note: NIIRS: National Imagery Interpretability Rating Scales, in: inch, ft: feet, nmi: nautical mile

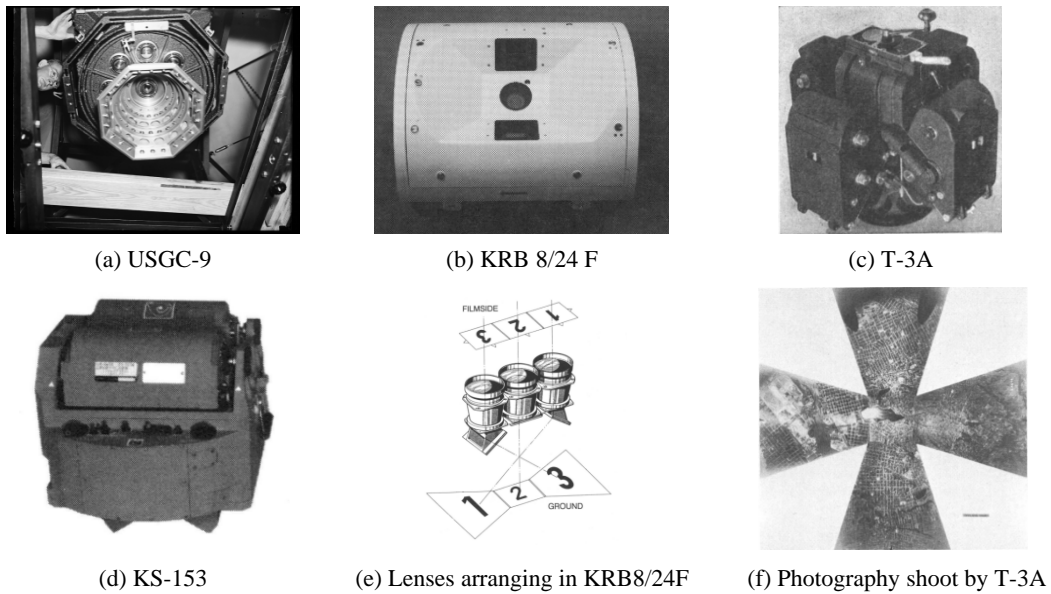


图 16 多镜头胶片倾斜航空相机及典型的镜头布置方式和拍摄样例

Fig.16 Film oblique aerial cameras with multiple lenses, typical shot arrangement and film sample

多镜头倾斜相机根据镜头数量、传感器数量和结构结合布置等,可以有多种分类。Gordon Petri 将倾斜相机分成了 3 类^[44]:

1) 扇形 (Fan) 排列: 扇形排列的相机的视场覆盖了航迹旁向 (Cross-track) 以及正下 (Nadir) 方的区域,覆盖面构成一个狭长的区域。扇形排列三镜头和镜头阵列的布置形式,图 16(e)是一种典型的三镜头布置方式。图 17 展示了扇形排列的多镜头相机,图 17(a)的 OSDC-4060 是俄罗斯公司 PO KSI 生产的由 40 个镜头阵列组成的相机,镜头阵列分成了 4 组,分别对应高海拔、中海拔、低海拔和低海拔红外通道^[45-46]。该公司类似产品的还有 36 个镜头的 OSDC-3660。

图 17(c)的 WB-57 ARGUS 相机系统使用了 12 个配有 400 mm 镜头的单反相机,其拍摄覆盖角度约为 $60^\circ \times 3.3^\circ$ ^[46],如图 17(d)所示。如文献[6,38,47]还将类似于 ROI 的 CA295 和 Vision Map 的 A3 Edge 使用了步进凝视技术的相机归于此类。

2) 马耳他十字 (Maltese Cross) 排列: 典型的按照马耳他十字排列的相机一般由 5 个镜头/相机组成,其中一个镜头朝向正下 (nadir),两个镜头覆盖航线旁向的与正下区域相邻的两个区域,另外两个镜头指向沿航线的与正下区域毗邻的两个区域,其拍摄到的图像类似于图 16(f)。图 18 展示了两款以此方式排列的相机以及它们的拍摄覆盖面示意图。

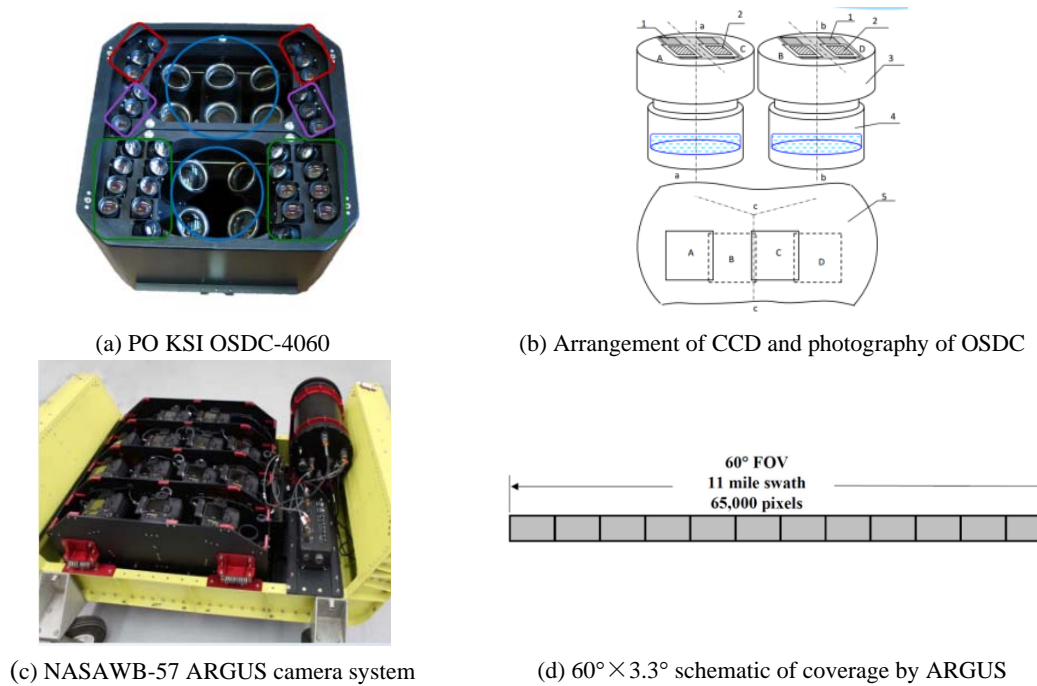


图 17 扇形排列的多镜头相机及覆盖面示意图

Fig.17 Sector arranged multiple-lens aerial cameras and coverage diagram

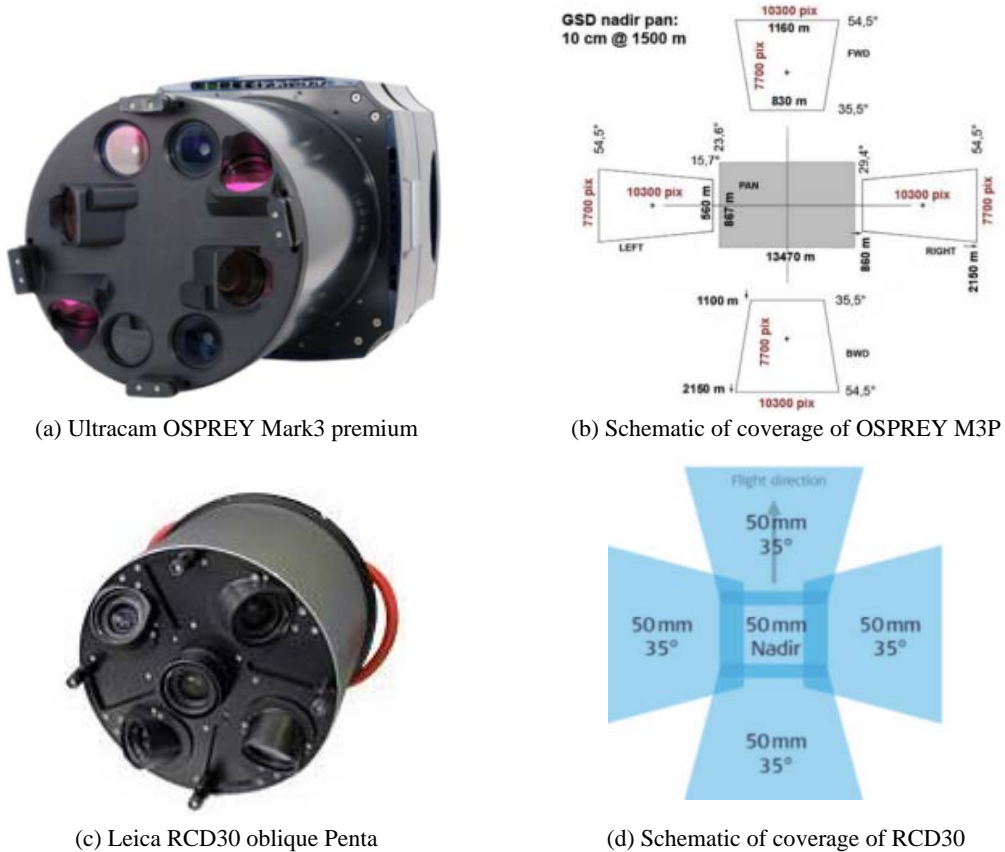


图 18 马耳他十字排列的相机及覆盖面示意图 Fig.18 Maltese cross arranged aerial cameras and coverage diagram

3) Block 排列: Block 排列使用多个朝向略微不同的倾斜镜头/相机, 相邻的镜头/相机间拍摄的图像有一定的重叠区域, 这些同一时刻曝光得到的图像经过拼接可以组合成一幅更大尺寸的图像。此类相机和下视相机很相似, 不过一定程度上它们能够拍摄到目

标或者建筑物的侧面。图 19(a)展示了 Z/I Imaging 公司在 2000 年左右推出的大画幅相机 Z/I DMC, Z/I DMC 共有 8 个镜头, 中间 4 个镜头按照如图 19(b)所示的排列方式, 使用 4 块中等面阵 CCD 代替在当时大面阵 CCD^[48], 其覆盖面如图 19(c)所示。图 19(d)

展示了 Rollei Metric 使用 4 个 AIC 相机组合成一个大面阵成像系统。除了 4 镜头组合外，还有 2 镜头和更多数量镜头组合的方式。

多镜头倾斜相机具备视场大和分辨率高的特点，被广泛用于各种监控、侦察和制图等任务。除此之外，因为多镜头倾斜相机能够采集到场景中目标的不同视角的图像，比如建筑物的顶部和侧面图像，结合计算机视觉技术，这些图像能够被用于城市 3D 模型建立、建筑物识别和建筑物高度测量等任务^[49]。

表 4 中列出了部分超高分辨率倾斜相机的型号及其相关参数，并按照上述 3 种方式进行了分类。

2.3.2 多镜头下视相机

下视 (Nadir/ vertically downward) 相机的光轴朝向正下方，对场景中朝向上方的表面 (如屋顶和飞机机翼) 能有良好的观测。多镜头下视相机，类似于 Block 排列的倾斜相机，通过将多个传感器和多个镜头结合，有效地增大相机的视场和拍摄覆盖面积，增

强获取场景中多波段信息的能力。图 20(a)、图 20(b) 和图 20(c) 分别展示了 3 款超高分辨率多镜头下视相机。表 5 中列出了几款超高分辨率多镜头下视相机的型号及相关参数。

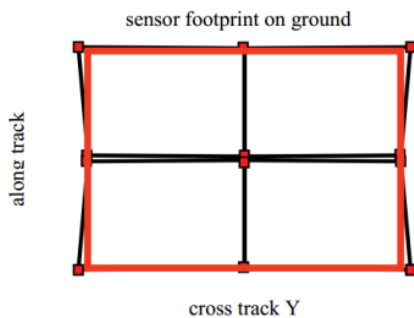
为获得超高的分辨率，不同公司采用的不同的设计方案。Z/IDMCII 系列产品，针对全色 (Panchromatic) 波段使用单块超大面阵的 CCD，比如 DMCI250 使用了一块 250 M 像素分辨的 CCD，针对 R、G、B 和 NIR 波段则使用 4 块四色的 CCD 并配合相应的滤光片^[50]。Vexcel 的 Eagle 系列为在全色波段获得 4.5 亿分辨率的同时，确保图像质量以及图像帧率，使用了 9 块 CCD 作为全色波段图像的成像面^[51]。图 20(d) 中标记的 “MC”、“C1”、“C2” 和 “C3” 的镜头的成像区域，分别对应于图 21^[44] 中的 “Mastercone”、“+cone1” 中浅绿色区域、“+cone2” 中左右两侧的浅绿色区域和 “+cone3” 中最中心的区域，相邻的图像间均有一定的重叠。



(a) Z/I DMC



(b) Arrangement of the 4 lenses in the middle of DMC



(c) Coverage of the 4 lenses in the middle of DMC



(d) Rollei Metric AIC x4 camera

图 19 Block 排列的相机

Fig.19 Block arranged aerial cameras

表 4 超高分辨率多镜头倾斜相机

Table 4 Multiple-lens oblique cameras with high resolution

Category	Type	Band	Resolution	FOV / Focus	GSD	FMC
F, B	PO KSI OSDC-4060	R, G, B, NIR	Low: 13064×2032	Low: 105°×14°	Low: 30 cm@1054 m	-
			Mid: 35888×2000	Mid: 100°×4.5°	Mid: 30 cm@3229 m	
			High: 56592×1696	High: 84°×2.3°	High: 30 cm@6491 m	
F, B	PO KSIOSDC-3660	R, G, B	Low: 15200×1200	Low: 89.11°×11°	Low: 30 cm@1500 m	-
			Mid: 30500×1200	Mid: 90°×5.6°	Mid: 30 cm@3200 m	
			High: 63000×1200	High: 75°×2.1°	High: 30 cm@8200 m	

Continued Table 4

Category	Type	Band	Resolution	FOV / Focus	GSD	FMC
F, B	NASA WB-57 ARGUS	R, G, B	65000×3744	60°×3.3°	30 cm@15000 m	-
M	Vexcel UltraCam Osprey M3P	PAN, RGB Bayer, NIR,	Nadir: 13470×8670 Oblique: 10300×7700	Nadir: 47.3°×31.5° Oblique: 45°×45°	10 cm@1538 m	TDI
M	Leica RCD30 Oblique	RGB, NIR	10320×7752 8956×6708	50 mm 80 mm, 150 mm	-	-
M	IGI Penta DigiCAM	RGBI, RGB, CIR, NIR	14204×10652 11664×8750	30 mm 80 mm, 150 mm	-	TDI, BCM
M	IGI Urban-Mapper	RGBI, RGB, CIR, NIR	Nadir:28200×11500 Oblique:11608×8708	NIR:30 mm Other:90 mm 110 mm	25 cm@4891 m	BCM
M	IGI Urban-Mapper-2	RGBI, RGB, CIR, NIR	Nadir:34500×14100 Oblique:14204×10652	NIR:30 mm Other:90 mm 110 mm	Nadir: 20 cm Oblique: 26.9 cm @4739 m	BCM
B, V	Z/I DMC	PAN, RGB, NIR	PAN Channel: 13000×8000	74°×44°	30 cm@3000 m	TDI
B, V, M	IGI Quattro DigiCAM	RGBI, RGB, CIR, NIR	23350×16400	90 mm	-	TDI, BCM
B, V	Rollei Metric AIC x4	RGB, CIR	~135000×10000	35 mm, 47 mm, 72 mm, 100 mm	-	-

注：F：扇形，M：马耳他十字，B：Block，V：下视 Note: F: Fan, M: Maltese Cross, B: Block, V: Nadir/vertically downward



(a) Z/I DMC II

(b) LEICA DMC III

(c) UltraCam Eagle Mark3

(d) UltraCam Eagle 镜头视角

图20 三款超高分辨率多镜头下视相机

Fig.20 Three multiple-lens cameras with high resolution

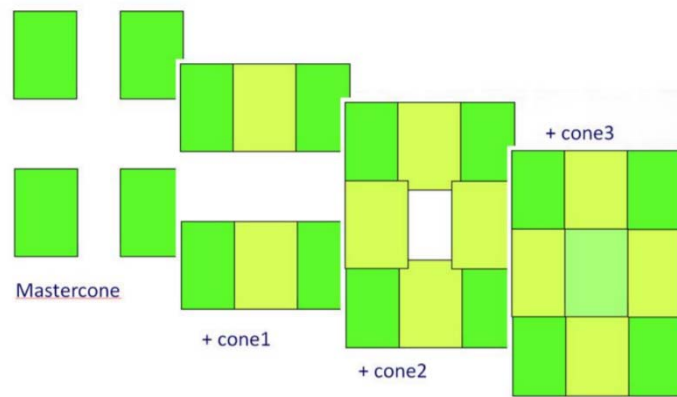


图21 UltraCam Eagle 使用9块 CCD 作为全色波段图像的成像面 Fig.21 UltraCam Eagle full color camera with 9 CCD

表5 超高分辨率多镜头下视相机 Table 5 Multiple-lens direct over flight cameras with high resolution

Type	Number of lenses	Bands	Resolution	FOV/Focus	GSD	FMC
Z/I DMC II 230	5	PAN, RGB, NIR	PAN:15552×14144 MS:6846×6096	50.7°×46.6°	30 cm@5000 m	TDI
Z/I DMC II 250	5	PAN, RGB, NIR	PAN:16768×14016 MS:6846×6096	45.5°×38.6°	30 cm@6000 m	TDI
LAEICA DMC III	5	PAN, RGB, NIR	PAN:25728×14592 MS: 8956×6708	PAN:57.2°×34.4° MS:61.7°×48.2°	30 cm@7077 m	TDI, Mechanical
Vexcel UltraCam Condor M1	7	PAN, RGB, NIR	PAN:132800×9000 RGB:38000×5000 NIR:7600×5000	PAN:81.6°×60.7° RGB:82.3°×13.1° NIR:74.5°×53.1°	10 cm@2714 m	TDI
UltraCam Eagle M3	6	PAN, RGB, NIR	PAN:26460×17004 RGB/IR:8820×5668	120 mm 47.6°×31.6°	10 cm@3000 m	TDI
UltraCam Falcon M2	6	PAN, RGB, NIR	PAN:26460×17004 RGB/IR:8820×5668	120 mm 47.6°×31.6°	10 cm@3000 m	TDI

3 总结

本文综述了胶片航空相机和数字航空相机使用的技术。通过介绍几款典型的胶片相机，展示了相关成像技术。文中将航空数字相机分成扫描型相机、步进凝视型相机和多镜头型相机3类，并介绍了一些具有代表性的成像技术。经过一个多世纪的发展，各种航空相机相关技术相继涌现，使航空相机朝着“看得更远、看得更广、看得更细”以及多维度、多光谱的方向不断发展。如今的航空相机拍摄的单帧图像已能达到数亿像素，除了传统的军事侦查领域，还大量应用于测绘、精细农业、海岸资源勘察、城市3D建模、环境监控和地图导航等民用领域。

参考文献:

[1] 刘明, 修吉宏, 刘钢, 等. 国外航空侦察相机的发展[J]. 光电与控制, 2004, 11(1): 56-59.
LIU Ming, XIU Jihong, LIU Gang, et al. Developments of overseas aerial

reconnaissance camera[J]. *Electronics Optics & Control*, 2004, 11(1): 56-59.

[2] 李波, 孙崇尚, 田大鹏, 等. 国外航空侦察相机的发展情况[J]. 现代科学仪器, 2013, 2: 24-27.
LI Bo, SUN Chongshang, TIAN Dapeng, et al. Developments of foreign airborne reconnaissance Camera[J]. *Modern Scientific Instruments*, 2013, 2: 24-27.

[3] 刘明. 航空侦察相机的发展分析[J]. 光机电信息, 2011, 28(11): 32-37.
LIU Ming. Development of aerial reconnaissance camera[J]. *OME Information*, 2011, 28(11): 32-37.

[4] Wyatt S H. Dual spectral band reconnaissance systems for multiple platforms[C]//*Airborne Reconnaissance XXVI. International Society for Optics and Photonics*, 2002, 4824: 36-47.

[5] Ruck R C, Smith O J. KS-127A long range oblique reconnaissance camera for RF-4 aircraft[J]. *Proceedings of SPIE*, 1980, 242: 22-31.

[6] Ruck R. Design Versatility Of The Prism Panoramic Camera: The KS-116 And KA-95 Cameras[C]//*Airborne Reconnaissance V.*

- International Society for Optics and Photonics*, 1981, **309**: 69-75.
- [7] 牛晓燕. Kodak 公司开发具有光电和胶片拍摄双能力的航空摄像机[J]. *飞航导弹*, 1989, **5**: 67.
NIU Xiaoyan. Kodak company develops aerial camera with dual capabilities of photoelectric and film shooting[J]. *Aircraft Missiles*, 1989, **5**: 67.
- [8] Dyer G R. Airborne reconnaissance into the 21st century[C]//*Airborne Reconnaissance XXII*, 1998, **3431**: 26-34.
- [9] Hull W, Frank W. The KA-102A Lorop camera[C]// *Aerial Reconnaissance Systems: Pods/Aircraft I. International Society for Optics and Photonics*, 1976, **79**: 154-160.
- [10] Spiller R H. New uses for the Zeiss KS-153A camera system[C]//*Airborne Reconnaissance XIX*, 1995, **2555**: 207-214.
- [11] Petrie G, Walker A S. Airborne digital imaging technology: a new overview[J]. *The Photogrammetric Record*, 2007, **119**(22): 23.
- [12] Ostman Brad. TDI CCDs are still the sensors of choice for demanding applications[J/OL]. *Laser Focus World World Magazine*, 2010 [2018-12-18].<https://www.laserfocusworld.com/detectors-imaging/article/16567663/tidi-ccds-are-still-the-sensors-of-choice-for-demanding-applications>.
- [13] 何欣年. 航空遥感 CCD 数字图像应用潜力分析[J]. *航天返回与遥感*, 1995, **10**(3): 66-70.
HE Xinnian. Analysis on the applied potentialities of aerial CCD digital image[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 1995, **10**(3): 66-70.
- [14] 刘亚侠. TDI CCD 遥感相机标定技术的研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2005.
LIU Yaxia. Research on the Calibration Technique of the TDI CCD Remote Sensing Camera[D]. Changchun: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2005.
- [15] Chamberlain S G, Washkurak W D. High speed, low noise, fine resolution TDI CCD imagers[C]//*Proc. of SPIE*, 1990, **1242**: 1-12.
- [16] 党凡阳. TDI 长波红外全景式航空相机研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
DANG Fanyang. Research on the Calibration Technique of the TDI CCD Remote Sensing Camera[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [17] Shimer S E, Hamm L E, Biesterfeld B L, et al. Comparison of forward oblique scanning sensor to infrared line scanner for collection of reconnaissance imagery data[C]//*Acquisition, Tracking, and Pointing III*, 1989, **1111**: 142-159.
- [18] 莫德林, 张永生, 王涛, 等. 航空线阵摆扫式相机成像仿真[J]. *光学学报*, 2018, **38**(7): 336-345.
MO Delin, ZHANG Yongsheng, WANG Tao, et al. Imaging simulation of airborne linear whiskbroom camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, **38**(7): 336-345.
- [19] National Geospatial Intelligence Agency. Pushbroom/Whiskbroom Sensor Model, Metadata Profile Supporting Precise Geopositioning [R/OL]. US: NGA.SIG.0003-1.0, 2009[2018-12-18]. http://gwg.nga.mil/documents/csmwg/PUSHBROOM_WHI-SKBROOM_PAPER_Version_1_0_GOLD_21JUL09.doc.
- [20] Lewis G R. Image stabilization techniques for long range reconnaissance camera[C]//*Proceedings of SPIE*, 1980, **242**: 153-158.
- [21] Petrie G. Airborne pushbroom line scanners: an alternative to digital frame scanners[J]. *Geo Informatics*, 2005, **8**(1): 50-57.
- [22] Reulke R, Becker S, Haala N, et al. Determination and improvement of spatial resolution of the CCD-line-scanner system ADS40[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2006, **60**(2): 81-90.
- [23] TU Xinru, XU Miaozhong. The geometric calibration of airborne three-line-scanner ADS40[J]. *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*, 2011, **40**(1): 78-83.
- [24] Riehl Jr K. RAPTOR (DB-110) reconnaissance system: in operation[C]//*Airborne Reconnaissance XXVI*, 2002, **4824**: 1-12.
- [25] Lange D, Abrams W, Iyengar M A, et al. Goodrich DB-110 system: multiband operation today and tomorrow[C]//*Proceedings of SPIE*, 2003, **5109**: 22-36.
- [26] 许永森, 田海英, 惠守文, 等. 国外传输型航空相机的发展现状与展望[J]. *光机电信息*, 2010, **27**(12): 38-43.
XU Yongsen, TIAN Haiying, HUI Shouwen, et al. Trend and development actuality of the real-time transmission airborne reconnaissance camera[J]. *OME Information*, 2010, **27**(12): 38-43.
- [27] Iyengar M, Lange D. The Goodrich 3rd generation DB-110 system: operational on tactical and unmanned aircraft[C]//*Airborne Intelligence, Surveillance, Reconnaissance (ISR) Systems and Applications III*, 2006, **6209**: 620909.
- [28] Riehl K, Maver L A, Sementelli R G. The Raytheon DB-110 Sensor: Four Cameras in One Package[R/OL]. RAYTHEON SYSTEMS CO. 1999[2018-12-18]. <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a390184.pdf>.
- [29] Lareau A G. EO framing: technology overview and demonstration results[C]//*Optical Engineering Midwest'95*, 1995, **2622**: 589-604.
- [30] 周黎, 杨世洪, 高晓东. 一种简易结构步进幅式航空相机摆扫控制系统[J]. *光电工程*, 2010, **37**(10): 128-133.
ZHOU Li, YANG Shihong, GAO Xiaodong. Scanning control system of a simple structure step framing aerial camera[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(10): 128-133.
- [31] 杨艳艳. 基于图像处理的航空红外相机自动调焦技术研究[D]. 上海: 中国科学院研究生院(上海技术物理研究所), 2016.
YANG Yanyan. Scanning Control System of a Simple Structure Step Framing Aerial Camera[D]. Shanghai: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics), 2016.

- [32] 孙崇尚. 基于快速反射镜的高精度、宽频带扫描像移补偿技术研究[D]. 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2016.
SUN Chongshang. Research on Technology of Automatic Focusing Based on Image Processing for Aerial Infrared Camera[D]. Changchun: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2016.
- [33] Sementelli R G. EO/IR dual-band reconnaissance system DB-110[C]//*Airborne Reconnaissance XIX*, 1995, **2555**: 222-232.
- [34] Petrushevsky V, Tsur D. Condor TAC: EO/IR tactical aerial reconnaissance photography system[C]//*Airborne Intelligence, Surveillance, Reconnaissance (ISR) Systems and Applications IX*, 2012, **8360**: 836003.
- [35] Lareau A G. Flight demonstration of the CA-261 step frame camera[C]//*Airborne Reconnaissance XXI*, 1997, **3128**: 17-29.
- [36] Lavigne V, Ricard B. Step-stare image gathering for high-resolution targeting[R]. In *Advanced Sensory Payloads for UAV*, 2005, **17**: 1-14.
- [37] Remondino F, Toschi I, Gerke M. Oblique aerial images: potentialities, applications and best practices[R/OL]. 2016 [2018-12-18]. http://www.itc.nl/library/papers_2016/pres/nex_obl_ppt.pdf.
- [38] Rupnik E, Nex F, Remondino F. Oblique multi-camera systems-orientation and dense matching issues[J]. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2014, **40**(3): 107.
- [39] Uhl B. The new light weight, high performance reconnaissance camera KRb 8/24 F[C]//*Airborne Reconnaissance XIII*, 1990, **1156**: 49-58.
- [40] Lemmens M. Digital oblique aerial cameras(1): a survey of features and systems[J]. *GIM International*, 2014, **28**(4): 20-25.
- [41] Reading O. The nine lens air camera of the US coast and geodetic survey[J]. *Photogrammetric Engineering*, 1938, **4**(3): 184-192.
- [42] Leachtenauer J C, Malila W, Irvine J, et al. General image-quality equation: GIQE[J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(32): 8322-8328.
- [43] Livingston R G. A history of military mapping camera development (Aerial cameras for military mapping developed with dimensional stability in camera-lens-film combination)[J]. *Photogrammetric Engineering*, 1964, **30**: 97-110.
- [44] Petrie G. Systematic oblique aerial photography using multiple digital cameras[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2009, **75**(2): 102-107.
- [45] OPTISCH-ELEKTRONISCHE UBERWACHUNG SSTATIONEN OSDCAM4060 und 3660[Z/OL]. PO KSI, [2018-12-18]. http://www.poksi.ru/files/OSDCAM_DE.pdf.
- [46] John Arvesen. Airborne High-resolution, Panoramic Camera Systems[R/OL]. Cirrus Digital Systems, 2016[2018-12-18]. http://iprc.soest.hawaii.edu/NASA_WS_MD2016/pdf/Arvesen-2016.pdf.
- [47] Remondino F, Gerke M. Oblique Aerial Imagery: a Review[C]// *Proceedings of Photogrammetric Week'15*, 2015, **15**: 75-83.
- [48] Hinz A, Dörstel C, Heier H. DMC-The digital sensor technology of Z/I-Imaging[C]// *Proceedings of Photogrammetric Week'01*. 2001, **1**: 93-103.
- [49] Aerial Camera Corp. 9-lens aerial mapping camera made by the Fairchild Aerial Camera Corp. for the U.S. Coast & Geodetic Survey [Z/OL]. (2015)[2018-12-18]. <http://hdl.loc.gov/loc.pnp/hec.41180>.
- [50] Neumann, K. The Z/I DMC II – “Imaging Revolution” [C]// *Proceedings of Photogrammetric Week'11*, 2011, **11**: 97-101.
- [51] Gruber M, Ponticelli M, Ladstädter R, et al. UltraCam Eagle, details and insight[J]. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012, **39**(B1): 15-19.