

Aviation Camera Image Motion Compensation and
Image Processing Technology

航空相机像移补偿与 图像处理技术

张玉欣 白晶/著



科学出版社

航空相机像移补偿与图像 处理技术

张玉欣 白 晶 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要研究航空相机像移产生的原因、几种典型的像移检测方法原理、基于互相关灰度投影算法的面阵 CCD 相机像移检测原理与实现、航空图像噪声产生的原因与噪声特点、图像复原理论、图像增强理论、随机共振理论、基于随机共振的面阵 CCD 图像滤波算法原理与实现、面阵 CCD 相机的超分辨率成像技术等。将遗传算法、粒子群优化算法、神经网络等人工智能优化方法引入面阵 CCD 相机像移补偿与图像处理技术,提升了该领域的技术水平。

本书可以作为信息与通信工程、控制科学与工程等学科相关专业研究生的教材或参考书,也可作为相关工程技术人员和研究人员的应用参考书。

图书在版编目(CIP)数据

航空相机像移补偿与图像处理技术/张玉欣,白晶著. —北京:科学出版社, 2018.1

ISBN 978-7-03-055338-6

I. ①航… II. ①张… ②白… III. ①航空摄影—图像处理—研究 IV. ①TP391.413

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 281172 号

责任编辑:张 震 杨慎欣/责任校对:彭珍珍
责任印制:吴兆东/封面设计:无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

— 邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年1月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018年1月第一次印刷 印张:12

字数:235 000

定价:86.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着航空科技的迅猛发展,航空成像技术已经广泛应用于军事、民用两大领域,如军事侦察、航空测绘、地面目标跟踪等。航空遥感相机不可避免地会产生像移而导致图像模糊,因此,研究航空相机像移补偿以及图像的超分辨率提升等技术对提高航空遥感相机航拍图像质量至关重要。

传统的观点认为噪声是一种消极的干扰项,必须抑制或消除,而随机共振理论反其道而行之,研究表明,在一些非线性特定条件下,随机噪声能够对信号起到积极的增强作用。本书将随机共振理论引入航空图像的滤波中,为航空图像滤波提供新方法,以期推动航空图像滤波技术的发展。近年来,模糊计算、神经网络、小波变换、进化计算、群体智能计算、混沌与分形计算等新一代智能信息处理技术的研究取得了引人注目的进展。智能信息处理技术是相关学科相互结合和渗透的产物,是当今国内外电子工程、自动化、计算机科学等领域研究的热门课题。因此,将智能信息处理技术引入航空相机像移补偿与图像处理领域,可以提高该领域的技术先进性,为该领域的进一步发展注入新的活力。

本书系统地论述了航空相机像移补偿与图像处理技术,共8章。第1章综述像移补偿技术研究背景及意义、现状、存在的问题和发展趋势。第2章概述航空遥感相机的特点、分类、应用与发展概况。第3章介绍像移检测原理。第4章介绍基于互相关灰度投影算法的面阵CCD相机像移检测技术原理与实现。第5章介绍图像噪声、航空遥感CCD相机滤波、图像复原、图像增强理论。第6章介绍随机共振理论及图像的随机共振。第7章介绍基于随机共振的面阵CCD图像滤波算法。第8章介绍面阵CCD相机的超分辨率成像技术。

本书由北华大学张玉欣副教授、白晶教授著。本书是张玉欣副教授在其博士学位论文的基础上,结合白晶教授近年来在智能信息处理相关方向的科研成果,吸收、采纳和借鉴国内外相关资料撰写而成的,其目的是向相关专业的研究生及广大科研人员系统地介绍航空相机像移补偿与图像处理技术,使这一研究领域得到进一步的发展。值本书出版之际,衷心感谢中国科学院长春光学精

密机械与物理研究所葛文奇研究员在航空相机像移补偿领域的深入指导。

由于作者水平有限,书中可能存在一些疏漏之处,请各位读者提出宝贵意见。

作者邮箱: Qxlife816@163.com。

张玉欣

2017年6月于吉林

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 像移补偿技术研究背景及意义	1
1.2 像移补偿技术现状及发展趋势	1
1.2.1 像移补偿技术现状	1
1.2.2 传统像移补偿技术存在的问题	2
1.2.3 像移补偿技术的发展趋势	3
1.3 本书的主要内容	4
第 2 章 航空遥感相机概述	6
2.1 航空遥感成像技术的发展	6
2.2 CCD 的特点、分类及应用	6
2.3 国内外 CCD 图像传感器与航空遥感相机的发展概况	10
2.3.1 国外 CCD 图像传感器与航空遥感相机的发展概况	10
2.3.2 国内 CCD 图像传感器与航空遥感相机的发展概况	15
第 3 章 像移检测原理	17
3.1 线阵 CCD 航空相机像移检测原理	17
3.1.1 平行狭缝法	17
3.1.2 扫描相关法	17
3.1.3 外差法	18
3.1.4 光程差法	19
3.1.5 直接算法	20
3.2 面阵 CCD 航空相机像移检测原理	21
3.2.1 系统组成	21
3.2.2 工作原理	21
3.2.3 面阵 CCD 相机的选择	23
第 4 章 基于互相关灰度投影算法的面阵 CCD 相机像移检测技术	24
4.1 研究原则与方案选择	24
4.2 相关法概述	25
4.2.1 自相关函数、互相关函数的定义及物理意义	25

4.2.2	互相关法测量速高比值的基本思想	26
4.3	基于互相关灰度投影算法的图像位移矢量测量	27
4.3.1	灰度投影算法概述	27
4.3.2	互相关灰度投影算法的提出	28
4.3.3	图像位移测量	29
4.4	图像位移矢量与像移值的转换	32
4.5	实时性分析与实现	32
4.6	模拟实验与测量精度	33
第5章	航空图像滤波	36
5.1	图像噪声概述	36
5.1.1	图像噪声的产生	36
5.1.2	图像噪声的分类	36
5.1.3	图像噪声的特点	37
5.2	航空遥感 CCD 相机滤波	37
5.2.1	CCD 相机滤波的提出	37
5.2.2	CCD 相机技术指标	38
5.2.3	CCD 的噪声和信噪比	42
5.3	图像复原	46
5.3.1	图像的退化	46
5.3.2	常见噪声及其概率密度函数	53
5.3.3	图像复原方法	57
5.3.4	图像的几何校正	66
5.3.5	运动模糊图像的复原	73
5.4	图像增强	74
5.4.1	图像的对比度增强	74
5.4.2	直方图修正	78
5.4.3	空域滤波增强	89
5.4.4	频域滤波增强	100
第6章	随机共振理论及图像的随机共振	109
6.1	随机噪声	109
6.2	随机共振理论	109
6.2.1	概述	109
6.2.2	随机共振内在机制研究	110
6.2.3	经典随机共振理论	112
6.2.4	非经典随机共振理论	115

6.3 图像随机共振中的问题	117
6.4 图像的随机共振	118
6.4.1 图像的一维随机共振	118
6.4.2 图像的二维随机共振	120
6.5 图像随机共振与传统图像增强对比	123
第7章 基于随机共振的面阵 CCD 图像滤波算法	128
7.1 基于变尺度随机共振的面阵 CCD 滤波算法	128
7.1.1 随机共振航空图像滤波算法步骤	129
7.1.2 自适应噪声强度的优化	131
7.1.3 最大峰值信噪比点的快速搜索算法	131
7.1.4 不同滤波方法效果对比	136
7.1.5 大、小噪声强度下不同滤波方法效果对比	138
7.1.6 随机共振不同加噪次数性能对比	139
7.2 参数自适应随机共振算法	140
7.2.1 遗传算法	140
7.2.2 粒子群优化算法	146
7.2.3 基于 PSO 算法的随机共振参数优化仿真实验	147
第8章 面阵 CCD 相机的超分辨率成像	152
8.1 CCD 像元超分辨率成像技术	152
8.1.1 CCD 图像超分辨率技术的引出	153
8.1.2 超分辨率技术的研究现状	153
8.1.3 表征系统空间分辨率的两个要素	154
8.2 基于 B 样条插值法的面阵 CCD 超分辨率成像	155
8.2.1 B 样条数学理论	155
8.2.2 基于面阵 CCD 的亚像元动态成像系统原理	158
8.2.3 基于面阵 CCD 的亚像元图像的 B 样条插值	160
8.2.4 基于 B 样条插值法的面阵 CCD 超分辨率成像仿真	161
8.3 基于神经网络的面阵 CCD 超分辨率成像	162
8.3.1 人工神经网络	162
8.3.2 BP 神经网络	167
8.3.3 基于 BP 神经网络的面阵 CCD 超分辨率成像	175
参考文献	180

第1章 绪 论

1.1 像移补偿技术研究背景及意义

随着航空科技的迅猛发展,航空成像技术已经广泛应用于军事、民用两大领域,如军事侦察、航空测绘、地面目标跟踪等。航空遥感图像的视觉效果、清晰度、稳定性、可识别性、可分辨性、分辨率等都与航空遥感相机所采用的电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)图像传感器的像元数量、像元尺寸等因素息息相关。在系统焦距及照相距离固定的前提下,CCD 图像传感器的像元尺寸越小,图像的分辨率越高,像元数量越多,图像覆盖面积越大。另外,航空遥感相机安装在飞行载体(如飞机、气球等)的动基座上完成动态成像,在载体运动时拍摄或者载体静止时拍摄运动图像的过程中都会受载体飞行高度、载体与景物的相对运动速度、载体的振动以及气流的扰动等因素的干扰,使图像产生像移导致图像模糊。因此,像移补偿技术是航空遥感领域的一项重要研究内容,像移补偿技术能够改善图像质量、消除或尽可能减少图像的像移。

航空遥感图像质量的提高主要受 CCD 分辨率和像移补偿技术两个方面的影响,因此,从这两个方面入手分别进行深入的研究与创新是提高航空遥感图像质量的主要途径。虽然我国 CCD 图像传感器的制造技术快速发展并取得了比较显著的成效,但是由于种种原因目前还处于发展中阶段,相对落后于某些发达国家。在高端应用领域尤其是军事领域的航空遥感相机上所采用的 CCD 图像传感器还主要依赖于进口,由于某些国家的出口限制,无法得到在分辨率等参数上最先进的 CCD 图像传感器,这成为制约我国航测技术发展的一大因素。为了弥补 CCD 图像传感器的不足,遥感图像的后续像移补偿处理至关重要,可以通过消除像移模糊以及提升图像的超分辨率等方法来提高航空遥感相机航拍图像的分辨率。

1.2 像移补偿技术现状及发展趋势

1.2.1 像移补偿技术现状

像移检测系统是航空航天相机像移补偿机构中的重要装置,它直接测量像面

上的像移速度, 又称速高比计, 或速高比值测量系统。它通过分别测量出飞行器在飞行过程中速度 V 和此时飞行器所在高度 H , 并计算出两者的数值比, 进而计算出像移速度值。早期典型的像移检测系统主要有葛文奇提出的“复合式速高比计”^[1]、翟林培提出的“具有空间滤波的圆环扫描速高比计”^[2]和赵周伦等提出的“圆环扫描速高比计”^[3]。由于当时光电器件、光电传感器技术水平的限制, 航空相机均为胶片式相机, 像移检测系统普遍采用光学狭缝或带有狭缝的扫描圆盘对景物图像进行前序的滤波处理, 经狭缝滤波处理后的输出信号为明暗相间的条纹信号, 该条纹信号经光电倍增管或其他光敏元件采集后转换成电压信号, 该输出电压信号是一组交变信号。通过测量该交变电压信号的频率或相位间接地计算出速高比值即 V/H , 可以根据此信号的值进行像移补偿。具体原理详见 3.1 节。

随着光电探测元件的飞速发展, 出现了以 CCD 传感器为成像装置的像移检测系统, 初期多采用线阵 CCD, 后期 TDI CCD 图像传感器由于与一般线阵 CCD 相比具有多次曝光功能, 在低照度的环境下也能输出具有高信噪比 (signal noise ratio, SNR) 的信号, 解决了小相对孔径、长焦距高分辨力 CCD 航空相机的曝光不足问题, 被像移检测系统广泛使用。

另外, 传统的像移检测系统还有一种是由以美国专利号 5745226 为代表的多镜头、多器件构成的, 主要依靠复杂光路作为系统手段, 利用光程差实现像移的计算^[4]。

平行狭缝法、扫描相关法、外差法、光程差法和直接计算法等像移检测系统的工作原理见 3.1 节。

1.2.2 传统像移补偿技术存在的问题

传统像移补偿技术存在的问题主要体现在以下几个方面。

(1) 光电转换器。采用胶片式相机作为光电转换器的像移检测系统存在的主要问题有: 胶片式相机拍摄成本高、摄影处理烦琐、相机笨重以及与后续数字化处理方法衔接不顺畅等。采用光电倍增管作为光电转换器的像移检测系统虽然接收灵敏度高, 但是光电倍增管需要 900V 以上的高压供电, 这一点不利于在机载上实现。采用线阵 CCD 作为光电转换器虽然操作相对简单、数据处理量相对较少, 但是其只能实现对一维信号进行测量, 而航测相机的载体 (如飞机、飞艇或探空气球等) 总是处于运动状态, 因而相机在曝光时间内都不能静止, 由此带来的图像模糊应该是二维的。

(2) 空间滤波器。光学狭缝滤波器的狭缝长度、狭缝周期以及狭缝个数都直接影响滤波的效果, 而关于这些参量的选取又缺少统一、有效的规则。另外, 采

用光学狭缝完成对景物的滤波可靠性低,受拍摄对象背景影响较大,例如,拍摄沙漠、海洋等背景中的景物时,采用光学狭缝滤波法难以从景物中提取出有效的图像信号。而现有的数字式像移检测系统,即采用 ARM 微处理器、数字信号处理器(digital signal processing, DSP)等作为核心器件的像移检测系统,通常对光电转换器输出图像信号的滤波处理方法如均值滤波、维纳滤波、卡尔曼滤波等只适用于高信噪比情况,对于强噪声环境、低信噪比情况下的像移测量效果较差。

(3) 实时性。受传统微处理类型和速度的限制,很难在大数据量的情况下完成实时测量。

(4) 集成度低。早期的像移检测系统在像移测量时采用的相关器以光学狭缝输出的交变电压信号作为一路输入对象,再通过硬件延时产生另外一路输入信号。相关器或称相关运算电路,是由一系列元器件组成的硬件电路。多元件的使用、硬件电路的复杂性使得像移检测系统集成度低、受外界环境影响大、易于损坏,且损坏时不易排查坏点、系统误差大。

针对以上问题,本书重点研究采用面阵 CCD 作为光电转换器的数字式像移补偿系统,由此解决像移检测系统对速高比值的二维测量问题。另外,面阵 CCD 相对其他光电转换器具有数据量大、分辨率高的优点,有利于提高像移检测系统的精确度和系统分辨率。随着 DSP、ARM 等高速微处理器的出现和技术的逐渐成熟,大数据量下的实时性测量成为可能。本书在选用高性能的微处理器的基础上研究了快速、智能的优化算法以提高运算速度。本书研究的像移补偿系统利用现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)实现某些硬件电路功能,提高了系统的集成度以及可靠性。

1.2.3 像移补偿技术的发展趋势

目前我国航天航空相机使用的 CCD 主要依赖进口,西方军事强国的某些高性能 CCD 是军事禁售品,我们无法获得,因此,CCD 技术的相对落后成为制约我国航天图像质量提高的一个主要因素。自主研发高性能 CCD 是当前航空航天技术发展的重中之重。

随着 CCD 等感光器件的广泛应用及精度的提高,数字式的像移补偿法成为研究的重点内容,另外,多种像移补偿方法结合应用必将成为研究的一个方向。

根据目前微电子学的发展与技术的进步,像移检测装置即速高比值测量装置将会向如下方向发展。

(1) 光机电一体化,适用范围广。

(2) 工作速高比值范围宽,精度高。

(3) 体积小、重量轻,可随相机安装在飞机或吊舱上。

(4) 低功耗, 功耗小于 10W。

(5) 低成本, 高可靠性。

随着航空相机与侦查平台的快速发展, 速高比值的独立获取势在必行, 测量像速的装置也逐步成熟和迅速发展。前面介绍的几种像移检测系统都是采用模拟式的方法实现, 而随着 CCD 器件的广泛应用, DSP、ARM 等高速微处理器的出现和技术的成熟使得像移检测装置的数字化、实时化、小型化成为发展的趋势和重点研究的内容。因此, 对于平行狭缝法可以采用面阵 CCD 作为敏感元件探测矩形光栅输出信号的频率, 并采用 ARM9 系列微处理器对图像进行处理。

目前, 研究人员对航空相机像移测量提出了多种方法, 可根据任务所需设计出不同类型和用途的测速装置, 以确保得到满足要求的照相分辨率。

1.3 本书的主要内容

第 1 章介绍航空相机像移补偿技术研究背景、意义、研究现状及发展趋势。

第 2 章介绍航空遥感成像技术的发展, CCD 的特点、分类及应用, 国内外 CCD 图像传感器与航空遥感相机的发展概况。

第 3 章首先介绍几种典型的线阵 CCD 航空相机像移检测原理, 然后介绍本书重点研究内容——面阵 CCD 航空相机像移检测原理。

第 4 章介绍基于互相关灰度投影算法的面阵 CCD 相机像移检测技术。首先介绍自相关函数、互相关函数的定义以及物理意义。然后分析互相关算法的原理, 讨论采用互相关算法计算图像位移矢量以及速高比值运算量过大的问题。再针对互相关函数法的大量运算问题提出将灰度投影与互相关相结合的算法, 并讨论基于互相关灰度投影算法测量图像位移矢量、速高比值的运算量问题。最后分析实时性的可行性问题, 提出在现场可编程门阵列上运用并行处理算法实现图像位移和速高比值的测量。

第 5 章首先介绍图像噪声的产生、分类和特点, 然后介绍航空遥感 CCD 相机滤波, 最后介绍图像复原、图像增强的基本理论。

第 6 章介绍随机噪声、随机共振理论、图像随机共振中的问题、图像的随机共振、图像随机共振与传统图像增强对比。

第 7 章首先介绍基于变尺度随机共振的面阵 CCD 滤波算法, 提出黄金分割快速搜索算法, 用于在大量的输出图像峰值信噪比数值中搜索峰值信噪比的最大值。然后介绍参数自适应随机共振算法, 利用遗传算法、粒子群优化算法、PSO 算法对随机共振参数进行取值寻优。该章给出以上算法的原理、步骤和仿真结果。

第8章介绍航空像移补偿技术中的面阵 CCD 相机超分辨率成像问题,以匹配航空遥感相机的像元分辨率,提高系统测量精度的同时也增加像移补偿系统的准确性与可靠性。主要介绍基于 B 样条插值法的面阵 CCD 超分辨率成像、基于神经网络的面阵 CCD 超分辨率成像,给出上述两种算法的具体原理、步骤与仿真结果。

第2章 航空遥感相机概述

2.1 航空遥感成像技术的发展

航空遥感相机必须具备良好的物理性能和几何性能,如内方位元素(包括主点、主距等)的精度和稳定性、分辨率、信噪比、光谱范围、畸变和基高比等。目前航空遥感相机按成像介质分为胶片式相机和 CCD 相机。

在 CCD 发明之前感知图像使用摄影胶片(包括黑白胶片、彩色胶片、红外胶片)和真空摄像器件(包括光电导摄像管、超正析像管、二次电导管、硅靶摄像管和返束视像管等)。胶片式相机技术比较成熟,性能可靠,分辨率高,覆盖范围大,相机系统全球适用,注记、测量、定标、后勤支持都比较完善。但是由于拍摄成本高、摄影处理烦琐、相机笨重且与后续数字化处理方法衔接不顺畅等,传统胶片式航空测绘相机的发展处于停止不前的状态。

CCD 是 1969~1970 年由 Boyle 和 Smith 在贝尔实验室发明的一种新型半导体器件^[5]。它是在 MOS 集成电路技术基础上发展起来的,为半导体技术应用开拓了新的领域。它具有光电转换、信息存储和实时传输等功能,具有集成度高、功耗小、结构简单、寿命长、性能稳定等优点,故在固体图像传感器、信息存储和处理等方面得到了广泛的应用。1970 年,贝尔实验室的研究人员就用 CCD 制成了世界上第一台固态视频相机。1975 年,他们用这台 CCD 相机所做的演示证明其图像质量已经达到了广播电视的清晰度要求。

由于 CCD 相机采用数字处理技术,图像的增强、压缩都比较容易,实时性的 CCD 器件传输信息避免了回收的风险,并且 CCD 带宽较宽,在大气条件差时可以获得高信噪比的图像,也可以与飞机导航系统交联定位目标位置。CCD 相机增强了传感器对地观测能力,有利于缩短信息处理的周期,有助于提高对地观测的时效性。CCD 相机的众多优点使得其在航空遥感测量中的应用广泛,成为遥感领域的研究热点。

2.2 CCD 的特点、分类及应用

量子效率(quantum efficiency, QE)是将输入光能转换为电输出信号有效性的量度,CCD 的量子效率高于胶片,且 CCD 对光的响应是线性的,其输出信号

与所接收的光能量的大小是成正比的。CCD 的成像质量已经趋于完美,分辨率和色彩还原已经和 35mm 甚至 67mm 胶片不相上下,覆盖面积还有差距。线阵列 CCD 的像元数已经做到 20000 左右,例如,Atmel TH7834C 像元数 12000, Kodak KLI-14403 像元数 14404×3 , Fairchild CCD 21241 像元数 24000×64 。面阵列 CCD 的像元数已经做到 $9K \times 9K$ 左右,例如, DalsaFTF5066M 像元数 4992×6668 , Kodak KAF-39000 像元数 7216×5412 , Fairchild CCD595 像元数 9216×9216 。

CCD 图像传感器经过近 50 年的发展,目前已经成熟并实现了商品化。CCD 图像传感器从最初简单的 8 像元移位寄存器发展至今, CCD 像元数已从 100 万像元提高到 2000 万像元以上。在科学应用领域, 1024×1024 像元以上大面阵 CCD 图像传感器大量用于太空探测、地质、医学、生物科学以及遥感、遥测、低空侦察等。为了开发单片式低成本摄像机,目前的 CCD 传感器的研究重点也更多地转向互补金属氧化物半导体有源像素传感器 (CMOS APS), CMOS APS 的最大优点是在工作中无须电荷逐级转移,回避了影响 CCD 性能的主要参数——电荷转换效率, CMOS APS 的另一突出优点是无须 CCD 那样高的驱动电压,能使各种信号处理电路与摄像器件实现单片集成,这是未来相机小型化、低成本、低功耗的关键。

CCD 按成像维数分为一维线阵列 CCD 和二维面阵列 CCD^[6]。线阵列 CCD 成像单元排列成一条线阵列,分为单通道线阵 CCD 和双通道线阵 CCD。单通道线阵 CCD 转移次数多、转移效率低,只适用于像元较少的成像器件。双通道线阵 CCD 转移次数是单通道的 1/2, 它的总转移效率大大提高,像元数大于 256 的线阵 CCD 都为双通道。

面阵列 CCD 分为全帧转移、帧转移和行间转移三种。全帧转移面阵列 CCD 无图像存储区域,光电转换后,将光电荷一行行转移至水平移位寄存器内读出,构造简单,像元数多,填充因子大,需要外接机械快门,以克服图像模糊现象。帧转移面阵列 CCD 光电转换后,将光电荷快速由成像区转移到存储区,再由存储区一行行转移至水平移位寄存器内读出,填充因子大,不需要机械快门,速度比较快,帧转移面阵列 CCD 的特点是结构简单、光敏单元的尺寸较小、调制传递函数 (modulation transfer function, MTF) 较高,但光敏面积占总面积的比例小,转移速度较快。行间转移面阵列 CCD 光电转换后,将光电荷快速由一列成像单元转移到相邻的一列存储单元,再由存储区一行行转移至水平移位寄存器内读出,不需要机械快门,速度最快,填充因子小,灵敏度低。

CCD 按照光谱分为黑白 CCD 和彩色 CCD;按照入射方式分为前照明 CCD 和背照明 CCD。

CCD 已经应用到所有需要成像和成像测量的地方,有如下几个方面。

(1) 娱乐和日常生活:数码相机、摄像机、照相机等。

- (2) 办公和管理：扫描仪、复印机、传真机、闭路电视等。
- (3) 医疗：X 光数字成像系统、内窥镜、眼底镜等。
- (4) 工业：机器视觉系统、尺寸测量系统、角度测量系统等。
- (5) 军事：武器导航系统、靶场测量系统、侦察定位系统等。
- (6) 科学研究：天文望远镜、显微镜、光谱仪等。

例如，CCD 超微型摄像机应用在医疗器械的腹腔镜中，如图 2.1 所示，可以立体地显示二维、三维图像，为医生提供体内手术部位多角度和多方位的实时图像，缩短了手术时间，使患者大大减轻了痛苦。CCD 相机在医疗器械中的另一个应用是数字 X 光成像，如图 2.2 所示，X 射线经过闪烁晶体产生可见光，可见光经 CCD 光电转换变为电荷图像，输出至视频处理电路处理后在计算机中存储和再处理。

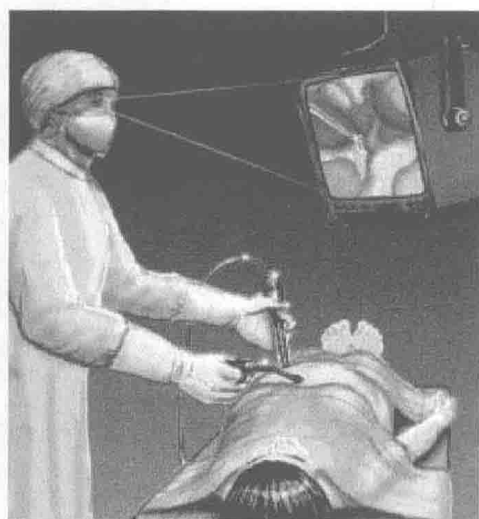


图 2.1 CCD 在腹腔镜中的应用

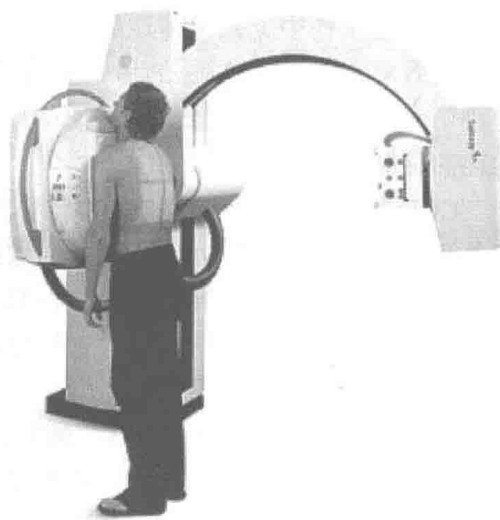


图 2.2 CCD 在数字 X 光成像中的应用

CCD 应用最重要的领域之一是天文学研究。长期以来，天文学使用的敏感介质是胶片和光电倍增管，CCD 在天文学中的应用是一场革命性的进步。使用 CCD 极大地提高了成像灵敏度和线性度，获取图像可以直接与计算机相连，极大地提高了数据处理速度。1980 年，CCD 在国外先进的天文台得到了广泛应用。在我国，1985 年由三位留美访问学者引入一套 CCD 成像系统，安装在云南天文台一米望远镜上，获得了很大的成功。

图 2.3 所示是南京紫金山天文台一米近地天体望远镜，它的功效是观测对地球构成潜在危险的近地天体。望远镜采用施密特型光学系统，改正镜口径 1.04m，球面反射主镜 1.2m，焦距 1.8m，具有大口径、大视场的特点。CCD 系统采用 $4096 \times$

4096 CCD 芯片,采用冷却技术并具有漂移扫描功能,是目前国内灵敏度最高的大面阵探测系统。

图 2.4 所示是由荷兰、德国和意大利等国家合作研制的超大型望远镜,它是广角望远镜,可实现大视场搜索。口径 2.61m,相对孔径 $f/5.5$,视场角 1.47° ,像元角分辨率 $0.24''/\text{pixel}$,像元数 $16\text{K} \times 16\text{K}$ 。采用 CCD 拼接技术构成更大的像面,其中主传感器由 32 片 CCD 构成,像元尺寸 $15\mu\text{m}$;辅助传感器由 4 片 CCD 构成,其中 2 片用于导星、2 片用于图像分析。其技术指标如表 2.1 所示。

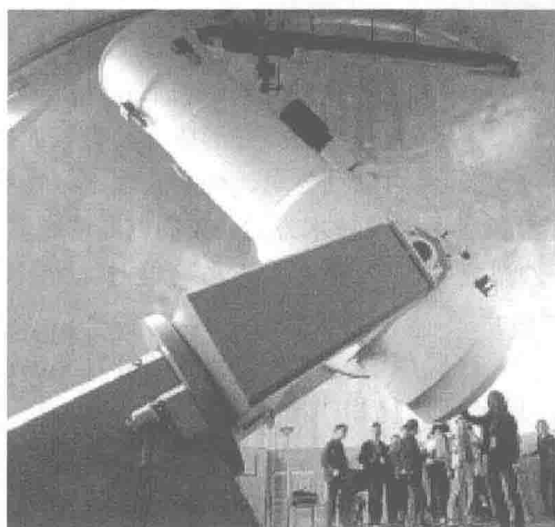


图 2.3 紫金山天文台天体望远镜

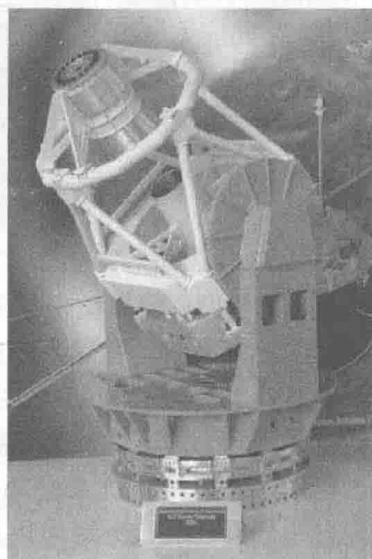


图 2.4 大型望远镜

表 2.1 望远镜参数

参数	参数值
内部液氮罐容量	40L
内部液氮罐保存时间	42h
CCD 工作温度	-120°C
视频通道数	36
读出速率	357Kpixel/s
拼接 CCD 读出噪声	$<5\text{e}^-$
拼接 CCD 温度波动	$<4^\circ\text{C}$
CCD 暗电流	$<2\text{e}^-/\text{pixel/s}$
整个拼接的坏像元数	<80000
整个拼接像面平面度	$<40\mu\text{m}$
连续曝光之间最小时间间隔	38s
杜瓦瓶重量	234kg