

Machine Vision Inspection and
Quality Evaluation of Steel Plate and Strip

机器视觉检测与 板带钢质量评价

颜云辉 著



科学出版社

机器视觉检测与板带钢 质量评价

颜云辉 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要介绍机器视觉技术在板带钢表面质量检测领域的应用以及板带钢质量评价。本书涵盖了机器视觉技术在板带钢表面质量检测领域应用的各个方面,为板带钢质量评价开拓了新的研究思路。全书主要包括板带钢表面质量机器视觉检测系统构建、钢板表面图像采集及预处理技术、多域图像采集技术、缺陷特征提取及识别技术,板带钢表面质量评价及综合质量评价等内容。

本书可作为机器视觉检测、板带钢表面质量检测、板带钢质量评价等领域的科研人员和工程技术人员开展理论研究和研发相关检测装备的参考用书,也可以作为高等院校研究生和本科高年级学生的教学用书或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

机器视觉检测与板带钢质量评价/颜云辉著. —北京:科学出版社, 2016.6

ISBN 978-7-03-049272-2

I. ①机… II. ①颜… III. ①计算机视觉—检测—应用—带钢—热轧—生产工艺 IV. ①TG335.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016) 第 150018 号

责任编辑:刘凤娟/责任校对:蒋 萍

责任印制:张 伟/封面设计:铭轩堂

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>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年6月第 一 版 开本:720×1000 B5

2016年6月第一次印刷 印张:24 1/4 插页:5

字数:475 000

定价:149.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

科学技术的发展和下游用户消费水平的提高,对板带钢的质量提出了越来越高的要求。除了外形尺寸和内在冶金质量,板带钢的表面质量已经成为新的关注重点。在钢铁工业两化融合、信息化与自动化水平不断提高的背景下,板带钢表面质量的快速和精确检测以及科学评价,对于提升钢材的质量和提供用户满意的产品具有重要的意义。作为高水平的自动化检测技术,机器视觉技术先进而且有效。基于机器视觉技术的检测结果,进行板带钢表面质量评价和针对性的控制,可以为用户提供质量稳定、品种多样、等级细分的高质量产品。可见,采用机器视觉技术进行板带钢表面质量的检测、评价和控制,对于板带钢的高质量生产具有十分重要的意义。

颜云辉教授所著《机器视觉检测与板带钢质量评价》一书涵盖了他十余年来在基于机器视觉技术的板带钢表面质量检测和质量评价领域的研究成果,系统地论述了机器视觉检测技术的表面质量检测原理及其在板带钢表面质量检测方面的应用情况,以及板带钢表面质量评价的基本理论和综合质量评价方法。书中提出的一系列提高检测速度与检测精度的手段与方法,对面向生产实际构建现代表面质量检测系统具有十分重要的指导意义。书中提出的板带钢综合质量评价方法科学实用,为板带钢表面质量的分类和评级提供了新的思路。

表面质量检测、控制与评价包括图像的获取与采集、图像的分析与处理、图像的显示与智能决策,它涉及众多的学科和专门技术。一方面,它包括数字图像处理、模拟与数字视频采集、计算机软硬件开发等与计算机视觉相通的技术;另一方面,它也包括机械工程技术、控制技术、点光源照明技术、光学成像技术、传感器技术等面向工业生产实际的配套技术,学科交叉,问题复杂,涉及面广。但是作者建立了一个科学、系统、全面的写作架构,并通过循序渐进、由浅入深的阐述和分析,为不同专业的读者展示了机器视觉技术的原理、方法和应用等诸多方面的新技术和新进展,对于读者掌握板带钢表面质量检测技术和方法,从企业生产和用户需求的角去了解板带钢质量评价,从而进一步将这些理论与方法应用于实际将发挥重要的作用。

该书的语句通俗易懂,概念解释到位,尤其一些专业性很强的知识点更是采用深入浅出的方法,让读者可以以最快的速度去理解并掌握其中的关键知识。

大量的实验数据和实例也是该书的一大特色。在介绍关键的技术理论或全新的方法时,作者都是理论联系实际,列举大量实验数据或实例来帮助读者理解。因

此,该书在具有很强理论指导性的同时,也具有相当高的实际应用性,不管是对科技工作者,还是对企业管理人员与生产人员都有很好的参考价值。

目前,以北京科技大学和东北大学为依托的钢铁共性技术协同创新中心已经将“钢材表面质量在线检测等先进检测技术和装备的研发”列入中心的主要研究内容。先进技术及装备方面的突破离不开在现有研究基础上的创新。颜云辉教授的这部论著承前启后,开拓创新,凝结了他与他的团队十余年来在板带钢表面质量检测及评价中的开创性成果。我们相信,这些工作将为今后该领域的研究与创新提供强有力的理论与实践支撑。

王国栋

2014年12月1日于沈阳

前 言

老子在道德经里说：“五色令人目盲，五音令人耳聋，五味令人口爽，驰骋畋猎令人心发狂。”人类对自然界有五大基本感知功能，即视觉、听觉、味觉、嗅觉和触觉。据说，有超过 80% 的信息来自于视觉。机器视觉检测就是模仿人类视觉系统，创造出能替代人的视觉感知，实现对特定目标的检测与识别。

图像处理技术是机器视觉的重要基础。本人从 1993 年开始涉足该领域的研究，从最初的微小尺寸计算机辅助测量，到疲劳断口定量分析，再到近年来的板带钢表面质量检测。本书是本人与所指导的博士生、硕士生在机器视觉检测和板带钢质量评价方面，近十年里所取得研究成果的整理和总结。书中不仅展示了我们在机器视觉和图像处理方面的理论研究成果，而且还提供了针对板带钢的机器视觉检测实用技术和质量评价方法。

板带钢是钢铁工业的主要终端产品之一，很多情况下其产品质量直接影响着后续产品的质量与性能，质量优劣是市场竞争的关键性指标，也关系到企业的经济效益、生存与发展。因此，世界各国都十分重视检测理论与技术的研究，不惜花费巨资研发检测装备、改进检测手段、提高检测水平。另一方面，质量评价是质量检测的延伸，是形成全面质量报告的基础，这方面的研究工作对形成新的质量标准和市场价格体系有着十分重要的意义。

在本书即将付梓之际，深深感谢教育部、科技部、国家自然科学基金委员会及沈阳市发展和改革委员会，对本人在该学术研究领域二十年来的持续资助：

“微小尺寸的计算机辅助测量”，95-135，教育部留学回国人员科研启动基金，1995~1997；

“计算机辅助疲劳断口定量分析方法的研究”，96014510，教育部高等学校博士点专项科研基金，1997~1999；

“基于知识的断口图像智能化识别与分类方法研究”，50075016，国家自然科学基金，2001~2003；

“断口图像的智能化分析方法研究”，20020145023，教育部高等学校博士点专项科研基金，2003~2005；

“基于图像信息的板带材表面质量在线监控系统研究”，2003CCA03900，科技部重大基础研究前期研究专项，2004~2005；

“基于图像信息的板带材表面质量在线检测与评价系统研究”，50574019，国家自然科学基金，2006~2008；

“信息整合下的板带钢质量智能评价与推理技术”，2008AA04Z135，国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目，2008~2010；

“基于机器视觉的板带钢表面质量在线检测系统开发”，106-13，沈阳市高新技术产业发展项目，2010~2011；

“面向金属板表面非完整信息目标的识别方法研究”，51374063，国家自然科学基金，2013~2017。

还要特别感谢王成明博士、吴艳萍博士、刘嵬嵬博士、王永慧博士、丛家慧博士、韩英丽博士、魏玉兰博士、董德威博士、宋克臣博士、王展博士，李骏博士生、张尧博士生、彭怡书博士生、孙宏伟博士生、赵永杰博士生以及二十余名硕士，是他们刻苦努力，勤奋钻研，才取得了相关的研究成果。宋克臣博士协助完成了相关研究成果和书稿的整理工作。

作者由衷感谢中国工程院王国栋院士在百忙之中审阅书稿并为本书作序！

颜云辉

2015 年 3 月 1 日于沈阳

目 录

序

前言

第 1 章	绪论	1
1.1	机器视觉检测概述	1
1.1.1	机器视觉及其系统组成	1
1.1.2	机器视觉的主要应用	2
1.2	板带钢表面质量检测	5
1.2.1	板带钢表面质量检测概述	5
1.2.2	几种典型的板带钢表面缺陷	6
1.2.3	板带钢表面缺陷检测典型方法	8
1.2.4	机器视觉板带钢表面缺陷检测	11
1.3	板带钢质量评价	15
1.3.1	板带钢质量评价概述	15
1.3.2	表面质量评价与综合质量评价	16
1.3.3	板带钢质量评价现状及发展趋势	17
1.4	本书主要内容	18
第 2 章	机器视觉板带钢表面缺陷检测系统	21
2.1	概述	21
2.2	板带钢表面缺陷检测系统构成	21
2.2.1	基本要求	21
2.2.2	硬件系统构成	21
2.2.3	软件系统构成	24
2.3	检测系统硬件设计	24
2.3.1	板带钢运动系统设计	24
2.3.2	图像传感器的设计选型	27
2.3.3	光源的设计选型	39
2.3.4	传感器与光源布局设计	48
2.3.5	检测系统的硬件拓扑结构	52
2.4	检测系统的软件设计	53
2.4.1	软件逻辑结构	53

2.4.2	软件的功能要求	53
2.4.3	软件的功能结构	54
第 3 章	图像数据采集与预处理	56
3.1	概述	56
3.2	数据实时采集	57
3.3	图像数据缓存与多线程处理	57
3.4	图像快速检测技术	62
3.4.1	DSP 硬件图像快速处理技术	63
3.4.2	基于灰度特征的缺陷图像识别算法	65
3.4.3	程序的执行过程及性能测试	68
3.4.4	系统实时性评价	69
3.5	基于 NINE 算法的脉冲噪声去除方法	70
3.5.1	脉冲噪声的数学模型	70
3.5.2	去除图像脉冲噪声的 NINE 算法	70
3.5.3	图像滤波效果的评价	74
3.5.4	实验结果与分析	75
3.6	基于自适应双倒数滤波的高斯噪声去除方法	78
3.6.1	高斯噪声的数学模型	78
3.6.2	双倒数滤波	78
3.6.3	自适应双倒数滤波	80
3.6.4	实验结果与分析	81
3.7	基于小波各向异性扩散的纹理背景去除	86
3.7.1	非线性各向异性扩散滤波	87
3.7.2	基于小波各向异性扩散的图像滤波方法	88
3.7.3	实验结果与分析	92
3.8	基于总变分模型的图像光照归一化	93
第 4 章	多域图像信息采集与处理	96
4.1	概述	96
4.2	板带钢表面多域图像信息采集系统	97
4.2.1	照明方式对缺陷检出的影响	97
4.2.2	多域图像采集方法	99
4.2.3	多域图像采集系统	99
4.3	板带钢表面缺陷图像的配准方法	100

4.3.1	图像配准方法	100
4.3.2	基于缺陷子图的互信息图像配准方法	102
4.4	板带钢表面多域缺陷图像融合方法	110
4.4.1	板带钢表面缺陷图像分析	110
4.4.2	基于小波变换的板带钢表面图像融合方法	111
4.4.3	基于缺陷区域的板带钢表面图像融合方法	114
第 5 章	板带钢表面缺陷目标的检出方法	126
5.1	概述	126
5.2	板带钢表面缺陷的分割方法	127
5.2.1	边缘分割法	127
5.2.2	区域分割法	132
5.2.3	基于梯度信息的二维 Otsu 阈值分割方法	134
5.3	板带钢表面缺陷的关联与定位	140
5.3.1	板带钢表面缺陷的关联	140
5.3.2	板带钢表面缺陷的定位	147
5.4	基于视觉注意机制的板带钢表面缺陷的检出方法	150
5.4.1	人类的视觉注意机制与计算模型	150
5.4.2	确定缺陷区域	157
5.4.3	实验结果与分析	158
5.5	板带钢表面微小缺陷检出方法	160
5.5.1	含微小缺陷的硅钢板图像的基本特点	161
5.5.2	基于显著活动轮廓模型的微小缺陷检出方法	162
第 6 章	图像特征提取与分析	176
6.1	概述	176
6.2	缺陷图像的基本特征	177
6.2.1	几何特征	177
6.2.2	统计特征	181
6.2.3	变换域特征	185
6.2.4	其他特征	193
6.3	基于散射卷积网络的缺陷特征提取方法	193
6.3.1	散射变换	193
6.3.2	散射卷积网络	195
6.3.3	NEU-Silicon 图像数据集与实验分析	197
6.3.4	NEU-Hot 图像数据集与实验分析	198

6.4 邻域评估下的局部二值模式特征提取方法	201
6.4.1 局部二值模式及其扩展模式	201
6.4.2 邻域评估下的局部二值模式及其扩展模式	205
6.4.3 实验结果与分析	211
第 7 章 图像特征组合与降维	214
7.1 概述	214
7.2 多特征的选取与组合	214
7.2.1 特征归一化	215
7.2.2 多特征的选取组合	216
7.2.3 实例	217
7.3 多维特征的降维	219
7.3.1 图像特征降维概述	219
7.3.2 SOFM 神经网络的特征降维算法	220
7.4 基于 ReliefF 的多维混合加权特征组合算法	224
7.4.1 ReliefF 算法	224
7.4.2 冗余特征的去除	225
7.4.3 基于 ReliefF 的去冗余特征组合算法	226
第 8 章 缺陷模式的识别与分类	228
8.1 概述	228
8.1.1 缺陷模式识别的基本原理与方法	229
8.1.2 缺陷模式的分类机制	233
8.2 基于距离的识别与分类	234
8.2.1 距离的基本概念	234
8.2.2 常用的几种方法	236
8.3 基于支持向量机的识别与分类	238
8.3.1 支持向量机基本概念	238
8.3.2 基于 PT-SVM 的缺陷识别方法	241
8.3.3 缺陷分类实例	242
8.4 基于人工神经网络的识别分类方法	245
8.4.1 BP 神经网络的识别分类方法	245
8.4.2 模糊神经网络的识别分类方法	249
8.4.3 遗传神经网络的识别分类方法	253
8.4.4 RBF 神经网络的识别分类方法	257
8.4.5 WTM-SOFM 识别分类方法	267

第 9 章 多体分类模型与版图分类法	273
9.1 概述	273
9.2 多体分类模型	275
9.2.1 类别本征空间与认知空间	275
9.2.2 类别区域表示方法	276
9.2.3 多体分类模型及特性分析	278
9.2.4 多体分类模型实验	282
9.3 版图分类法	287
9.3.1 地域版图的形成	288
9.3.2 版图分类法基础	288
9.3.3 实验研究	292
第 10 章 板带钢表面质量评价	296
10.1 概述	296
10.2 板带钢表面缺陷的分类	298
10.2.1 基于企业的缺陷分类	298
10.2.2 基于用户需求的缺陷分类	299
10.3 基于生产企业的板带钢表面质量评价	300
10.3.1 板带钢表面单个缺陷严重程度的评价	300
10.3.2 板带钢表面缺陷严重程度的综合评价	303
10.3.3 评价指标权重的确定方法	305
10.3.4 应用实例	308
10.4 基于用户需求的板带钢表面质量评价	311
10.4.1 排样算法	311
10.4.2 板带钢利用率与板带钢表面质量的关系	317
10.4.3 板带钢表面质量评价	320
第 11 章 板带钢综合质量评价与灵敏度分析	331
11.1 概述	331
11.2 板带钢的生产质量标准	331
11.2.1 板带钢现行质量标准	332
11.2.2 现行质量标准的适应性处理	333
11.3 板带钢综合质量评价指标	335
11.3.1 表面质量	335
11.3.2 板形质量	335
11.3.3 尺寸精度	336
11.3.4 力学性能	336

11.3.5	工艺性能	337
11.3.6	其他性能	337
11.4	板带钢综合质量评价	337
11.4.1	评价系统的构建	337
11.4.2	标准等级的划分	339
11.4.3	评价矩阵的构建	342
11.4.4	评价矩阵的规范化	343
11.4.5	综合质量判定规则	345
11.4.6	应用实例	346
11.5	板带钢综合质量评价灵敏度分析	349
11.5.1	属性值灵敏度分析	350
11.5.2	属性权重灵敏度分析	353
11.5.3	关于灵敏度分析的几点说明	357
11.5.4	应用实例	358
参考文献		363
索引		373
彩图		377

第1章 绪 论

1.1 机器视觉检测概述

1.1.1 机器视觉及其系统组成

视觉信息在人类生产生活所涉及的各种信息中占有重要比例,而赋予机器以人类视觉功能,让机器代替人类对外界世界进行感知,或让机器感知那些人类视觉无法触及的场合,便成为了机器视觉理论与技术发展的初衷。美国制造工程师协会(Society of Manufacturing Engineers, SME)机器视觉分会和美国机器人工业协会(Robotic Industries Association, RIA)的自动化视觉分会对机器视觉进行了如下定义:“机器视觉(machine vision)是通过光学的装置和非接触的传感器自动地接收和处理一个真实物体的图像,以获得所需信息或用于控制机器人运动的装置。”^[1]这就是说,用各种成像系统代替视觉器官作为输入敏感手段,由计算机来代替大脑完成处理和解释,最终使计算机能像人那样通过视觉观察和理解世界,具有自主适应环境的能力。

通常,机器视觉是指基于计算机视觉技术的机器系统或学科,故从广义来说,机器人、图像系统、基于视觉的工业测控设备等统属于机器视觉范畴。从狭义角度来说,机器视觉更多指基于视觉的工业测控系统设备。值得一提的是,机器视觉概念与普通计算机视觉概念并不完全一致,这主要是由于机器视觉相比于计算机视觉更强调实际应用,因此从系统的复杂性、实用性及实时性三方面来看,二者不可同日而语。就复杂性而言,机器视觉作为一门综合技术,既包括数字图像处理、模拟与数字视频采集、计算机软硬件开发等与计算机视觉相通的技术,也包括机械工程技术、控制技术、电光源照明技术、光学成像技术、传感器技术等面向工业生产实际的配套技术。这些技术在机器视觉中是并列关系,相互协调才能构成一个成功的机器视觉系统;就实用性而言,机器视觉系统要能够适应恶劣的工况,要有合理的性价比、较好的通用性和较高的鲁棒性,并且还要具备安全性,不会对产品及操作人员造成危害;就实时性而言,机器视觉系统需要具备高速度和高精度。因而计算机视觉和数字图像处理中的许多技术目前还难以应用于机器视觉。

机器视觉系统主要由三大部分组成:图像的获取与采集系统、图像的分析与处理系统、结果的显示与智能决策系统,如图 1.1 所示。一个典型的机器视觉系统应该包括光源、光学系统、图像捕捉系统、图像数字化模块、数字图像处理模块、智

能判断决策模块和机械控制执行模块。机器视觉系统的输入装置通常是摄像机,在光学元件和照明元件的配合下,利用图像采集元件将三维感观世界转化为计算机中的二维(2D)投影序列,而后将二维投影图像序列在计算机中进行处理和分析进而理解图像,依据分析的结果进行智能推理决策,并将决策结果反馈到被测物体。



图 1.1 机器视觉系统构成图

1.1.2 机器视觉的主要应用

机器视觉相对于人类视觉而言具有如下优势：①机器视觉系统能够对形状复杂的物体进行平面或空间的精确测量，而且这种测量不需要接触，不会改变被测物体的位置及性状。②人类难以长时间对同一对象进行观察，而机器视觉系统可以长时间地执行观测、分析和识别任务，并可应用于恶劣的工作环境。③能够排除人为因素干扰。④成本效率高，随着计算机处理器价格的急剧下降，机器视觉系统成本效率也变得越来越来高。一个价值一万美元的视觉系统可以轻松取代三个人工检测探测者，这样就有明显的经济效益。另外，视觉系统的操作和维护费用较低。⑤具有较宽的光谱响应范围，机器视觉可以利用多波段的光敏元件，观测到人肉眼无法看到的世界。

自 20 世纪 80 年代以来，随着数字图像处理、人工智能与模式识别、图像分析理解等领域的创新研究成果不断涌现，机器视觉研究领域获得了蓬勃发展，并且从理论研究逐步走向实际应用，目前机器视觉已运用在以下诸多领域。

1. 先进制造领域

现今，在众多的工业生产场合，都可以看到机器视觉系统的身影。通过机器视觉实时准确获取产品信息，使得对生产的精细控制成为可能；通过机器视觉代替人类进行检测，大大降低了工人的劳动强度，提升了检测效率；通过机器视觉控制机器人，实现了生产的自动化。机器视觉的应用促进了工业的信息化和自动化，而信息化和自动化恰好是先进制造区别于传统制造的主要特征，因而可以说机器视觉是先进制造不可或缺的组成部分。在众多的产品制造过程中，机器视觉技术正在发挥重要作用。例如，在冶金产品生产中，机器视觉广泛适用于各类金属板带材的质量检测，本书所介绍的板带钢表面质量检测就是其应用之一。通过应用机器视觉检测，大幅度提升了对金属板带材表面缺陷的识别水平，为进一步评价板带材表面质

量打下基础,进而推动了更为精细的板带材质量分级及以质论价体系的建立;在新能源方面,作为太阳能的发电载体,太阳能电池片的质量是影响太阳能电池组件发电效率的主要因素之一。利用机器视觉技术可以有效地检测太阳能电池片的表面质量。图 1.2(a) 展示了利用机器视觉检测太阳能电池背板膜表面缺陷;在微电子工业中,机器视觉技术可以应用于印刷电路板的检测,图 1.2(b) 展示了利用机器视觉辅助印刷电路板贴片,并对贴片误差进行校正^[2];在汽车工业领域,大量作业是通过工业机器人完成的,而这些工业机器人的控制大多依托于机器视觉伺服,如图 1.2(c) 所示。

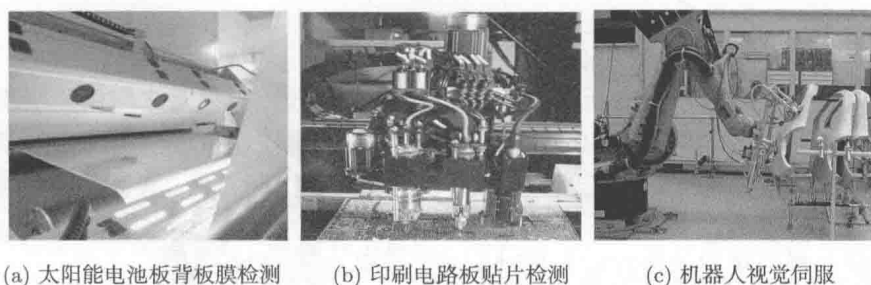


图 1.2 机器视觉在先进制造领域的应用 (后附彩图)

2. 医学领域

机器视觉技术在医学领域应用广泛。在疾病诊断中大量使用机器视觉设备,例如,图 1.3(a) 所示的 X 射线层析摄影 (CT), 以及超声成像、血管造影等设备。这些设备主要利用数字图像处理技术和信息融合技术辅助医生进行医学影像的分析,大大提高了诊断水平。另外,在疾病治疗方面,也开始采用机器视觉技术。图 1.3(b) 所示为“达芬奇”手术机器人,该机器人可以辅助医生进行微创手术,其具有三维成像能力的高端内窥镜将采集到的图像进行放大,以三维立体方式呈现给操作医生,极大提高了手术的安全性和方便程度。



图 1.3 机器视觉在医学领域的应用 (后附彩图)

3. 材料科学领域

机器视觉技术采用的数字图像处理技术作为一个二维或多维信息处理技术,若与相关领域知识配合,可成为科学研究中学习获取和处理的主要技术手段之一。例如,金属断口的分析与识别,电子显微镜的图像分析和重构等。

4. 地球与环境科学领域

卫星和航空测量设备可以收集大量的图像信息,有效地进行资源、矿藏勘探,国土规划,灾害调查,农作物估产,气象预报,以及军事目标监视等。

5. 军事国防领域

机器视觉技术是一种高新技术,一般来说,高新技术总是首先应用于军事国防领域,已经有许多战例说明由数字图像信息处理技术作为核心控制部件的精确制导武器的威力,它以被动方式工作,隐蔽性好,抗干扰能力强,智能化程度高,可以无需人工干预地在复杂背景中精确地控制导弹命中目标,如美国的“战斧式”巡航导弹就是采用地形图像匹配与惯性制导的精确杀伤武器。

6. 空间探测领域

空间探测和天文观测需要大量获取各波段的天体图像,或者通过机器视觉对地外探测器进行导航,这使得机器视觉在这一领域的应用十分广泛。例如,我国嫦娥探月工程中,玉兔号月球车采用了基于机器视觉的月面环境感知与导航系统,实现了月球车的环境感知、地形建立、路径规划、视觉定位等功能。其还搭载了红外成像光谱仪、粒子激发 X 射线谱仪等科学探测仪器,这些仪器能够从红外、X 射线波段获取月面图像,图 1.4 展示了机器视觉在空间探测领域的应用。

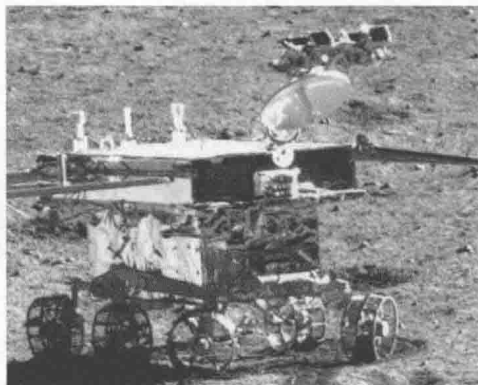


图 1.4 机器视觉在空间探测领域的应用 (后附彩图)