



WUHAN UNIVERSITY PRESS
武汉大学出版社



基于序列图像的视觉检测理论与方法

武
汉
大
学
学
术
丛
书

Academic Library

张永军 著

Wuhan University

国家自然科学基金资助项目 (40671157, 40301041)
教育部『新世纪优秀人才支持计划』资助项目 (NCET-07-0645)



WUHAN UNIVERSITY PRESS
武汉大学出版社

基于序列图像的视觉检测理论与方法

武
汉
大
学
学
术
丛
书

Academic Library

张永军 著

Wuhan University

图书在版编目(CIP)数据

基于序列图像的视觉检测理论与方法/张永军著. —武汉: 武汉大学出版社, 2008. 12

武汉大学学术丛书

ISBN 978-7-307-06654-0

I. 基… II. 张… III. 机械元件—计算机视觉—检测 IV. TH13-39
TP302.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 167245 号

责任编辑:任仕元 责任校对:刘 欣 版式设计:支 笛

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷: 武汉中远印务有限公司

开本: 787 × 1092 1/16 印张: 10 字数: 233 千字 插页: 10

版次: 2008 年 12 月第 1 版 2008 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-06654-0/TH · 12 定价: 22.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。

内 容 简 介

本书系统地总结和阐述了基于序列图像的工业零件视觉检测理论、方法及其应用,简要回顾了摄影测量与计算机视觉的发展;分析了序列图像几何处理中所涉及的若干关键技术及国内外研究现状;介绍了相机的线性和非线性模型,讨论了基本矩阵和三视张量的几何意义及其计算方法;阐述了基于最小二乘模板匹配的影像特征点和直线段的高精度提取算法;提出基于二维直接线性变换和平面控制场的非量测数码相机标定理论和算法;重点阐述了附加刚体变换的点、线摄影测量模型,提出利用点线混合摄影测量技术重建钣金零件的精确三维模型;详细讨论了基于广义点摄影测量的空间目标三维重建理论与方法;最后介绍了序列图像在工业零件三维重建与视觉检测中的具体应用,并就检测精度和效率等方面的问题进行了深入分析。

前 言

序列图像一般是指利用一台传感器采集被测物的一组随时间(空间)变化的图像,相应的摄站外方位元素一般是时间(空间)的函数。序列图像具有重叠度高、同名特征的冗余观测值多等突出优点,在工业自动化、飞行目标跟踪、生物医学影像分析及数字摄影测量处理等方面具有广泛的应用前景。随着制造加工工艺的不断进步,现代制造业对质量检测手段的要求也越来越高,质量检测的自动化程度、检测速度和精度是决定产品质量和生产效率的重要因素。利用序列图像进行高精度三维重建及视觉检测是当前计算机视觉和数字摄影测量等领域的重要研究方向,可以在零件识别与定位、三维量测、产品质量控制等领域发挥重要作用。基于序列图像的工业零件视觉检测主要涉及传感器标定、影像特征的高精度提取、三维几何模型的精确重建及自动化误差检测与质量控制等关键技术,国内外众多学者都在从事相关的研究工作,并取得了丰硕的成果。

CAD 技术的迅猛发展为建立物体的几何模型提供了基础,充分利用工业零件的 CAD 设计数据作为参考来评价产品的几何精度是提高质量检测自动化程度的可行途径。本书充分利用序列图像的优点,结合工业零件的 CAD 设计数据,提出采用平面控制场进行非量测数码相机的高精度标定;并利用图像中提取的点、线观测值进行混合区域网平差,对工业钣金件进行高精度三维重建以检测其尺寸制造误差或使用中所产生的尺寸变形。

全书共分八章:第 1 章简要回顾了摄影测量及计算机视觉的发展历程与应用现状;第 2 章介绍了工业零件视觉检测所涉及的数码相机标定、三维重建与视觉检测等领域的研究与发展现状;第 3 章阐述了相机的线性与非线性模型、多视几何的性质及其计算方法;第 4 章讨论了常用的点特征和线特征提取方法,并着重论述了基于最小二乘模板匹配的点、线特征高精度提取方法;第 5 章全面细致地分析了基于同形矩阵和二维直接线性变换并结合自检校光束法平差的非量测数码相机高精度标定理论和算法,并利用模拟和实际数据进行了试验分析;第 6 章重点阐述了附加刚体变换的点、线摄影测量模型,提出利用点线混合摄影测量技术重建钣金零件的精确三维模型,并讨论了粗差剔除、方差分量估计、病态矩阵无偏解算等相关问题;第 7 章详细讨论了基于广义点摄影测量的空间直线段、圆(含圆角矩形)及数学曲线等复杂形状的三维重建理论与方法;第 8 章介绍了序列图像在工业零件三维重建与视觉检测中的应用试验,并就精度和效率等方面的问题进行了深入分析。

本书融合了国内外近年来的相关研究资料及作者在该领域多年潜心研究所取得的重要成果,相关内容的研究得到国家自然科学基金项目(40671157,40301041)及教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NCET-07-0645)的资助,并由武汉大学学术丛书出版基金资助出版。特别感谢武汉大学张祖勋院士、刘经南院士、张剑清教授等多年来的精心指导,感谢学院领导的关心帮助和课题组全体成员的奋斗及精诚合作。

由于作者水平有限,收集的参考资料不够齐全,书中难免有疏漏及不当之处,恳请读者不吝批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 摄影测量的发展与现状	1
1.2 计算机立体视觉的发展与现状	3
1.3 研究目标	4
1.4 本书的主要内容	6
第 2 章 相机标定、三维重建与视觉检测研究进展	8
2.1 数码相机标定研究进展	8
2.2 三维重建研究概述	12
2.3 视觉检测研究与应用	17
第 3 章 相机模型与多视几何	21
3.1 线性相机模型	21
3.2 非线性相机模型	23
3.3 双视几何	25
3.3.1 极线几何概述	25
3.3.2 基本矩阵的计算	26
3.3.3 基本矩阵的性质	27
3.4 三视几何	28
3.4.1 三视张量概述	28
3.4.2 利用一般投影矩阵计算三视张量	29
3.4.3 三视张量的性质	30
第 4 章 影像特征的自动提取	34
4.1 边缘检测概述	34
4.2 点特征提取算子	36
4.2.1 Moravec 算子	36
4.2.2 Förstner 算子	37
4.2.3 Harris 算子	39
4.3 线特征提取算子	40
4.3.1 基于一阶微分的边缘检测算子	41
4.3.2 基于二阶微分的边缘检测算子	44

4.3.3 高斯-拉普拉斯算子(LOG 算子)	45
4.3.4 Canny 算子	46
4.3.5 Hough 变换	47
4.4 基于模板匹配的格网点提取	48
4.5 基于模板匹配的直线段提取	51
第 5 章 基于平面控制场的数码相机标定	56
5.1 数码相机标定的基本流程	56
5.2 利用同形矩阵分解数码相机参数初值	58
5.2.1 同形矩阵的计算	58
5.2.2 内方位元素的求解	59
5.2.3 外方位元素的求解	62
5.2.4 外方位元素的变换	63
5.3 利用二维 DLT 分解数码相机参数初值	64
5.3.1 二维 DLT 及内方位元素初值的求解	64
5.3.2 外方位元素初值的求解	67
5.4 光束法平差的数学模型	68
5.5 数码相机标定的几个相关问题	71
5.5.1 格网纯绕 Z 轴旋转时主点无法计算的证明	71
5.5.2 利用基本矩阵剔除粗差格网点	73
5.5.3 光束法平差的快速算法	75
5.6 数码相机标定试验与结果分析	77
5.6.1 同形矩阵数码相机标定算法试验	77
5.6.2 二维 DLT 数码相机标定算法试验	78
第 6 章 点线混合摄影测量与视觉检测	83
6.1 点、线混合摄影测量基本流程	83
6.2 附加刚体变换的点摄影测量模型	85
6.2.1 物体坐标系与世界坐标系间的旋转平移变换	85
6.2.2 系统参数较大时的数学模型	86
6.2.3 系统参数较小时的数学模型	88
6.3 附加刚体变换的直线摄影测量模型	90
6.3.1 误差方程式的基本形式	90
6.3.2 基于距离的误差方程式改化形式	93
6.3.3 直线摄影测量按间接平差的数学模型	94
6.4 点、线混合摄影测量的相关问题	96
6.4.1 外方位元素初值的传递	97
6.4.2 利用三视张量剔除粗差直线段	98
6.4.3 方差分量估计	100

6.4.4 系统参数的统计检验	101
6.4.5 病态矩阵的无偏解算方法	102
6.4.6 图形条件较差像片的自动剔除	103
第7章 复杂形状的三维重建	105
7.1 基于物方直接解的圆匹配与重建	105
7.1.1 旋转角初值的解算	105
7.1.2 物方直接解的数学模型	107
7.2 基于广义点摄影测量的复杂形状三维重建	109
7.2.1 广义点摄影测量的数学模型	109
7.2.2 直线段的三维重建	111
7.2.3 圆(圆弧)的三维重建	112
7.2.4 圆角矩形的三维重建	114
7.2.5 数学曲线的三维重建	114
第8章 工业钣金件视觉检测系统试验	116
8.1 视觉检测系统的基本功能	116
8.2 数码相机标定试验	117
8.3 线框模型的视觉检测试验	121
8.4 复杂形状的视觉检测试验	133
参考文献	137

第1章 绪 论

图像图形是人类相互交流和认识客观世界的主要媒体,是人类获得知识的主要来源之一。人类感知外界信息,80%以上是由视觉系统获取的,而图像图形则给了我们视觉世界中的所有信息。近景数字摄影测量是一种非接触性测量手段,基于严谨的理论和现代的软件,可提供相当高的精度与可靠性,能够在瞬间获取被测物体大量的物理和几何信息,使之日益广泛地深入到工业生产流程中,成为产品分类、导向、监测、装配和自动化生产的重要组成部分(冯文灏,2002;冯文灏,2004)。不过,由于技术含量高,精度要求差别很大,产品形式多种多样,其理论和应用都有一系列特殊问题需要研究。我们感知的外部景物通常都是三维的,而且经常随时间变化,这就促使了序列图像分析的兴起。序列图像(Image Sequence)一般是指利用一台传感器(如摄像机)采集被测物的一组随时间(空间)变化的图像,相应的摄站外方位元素一般是时间(空间)的函数。从数字序列图像进行高精度三维重建与视觉检测是当前数字摄影测量和计算机视觉领域的前沿方向,同时也是机械制造领域亟待解决的难题,对其进行研究有着重要的理论和现实意义。

1.1 摄影测量的发展与现状

摄影测量(Photogrammetry)是指利用摄影技术摄取物体的影像,从而识别物体并精确测定其形状和位置。从尼尔普斯和达盖尔发明摄影术起,摄影测量学已有160多年的历史了。随着计算机科学与技术的发展,摄影测量由基于精密光学、机械仪器的模拟摄影测量,经解析摄影测量发展为数字摄影测量,实现了完全计算机化。数字摄影测量是经典摄影测量与计算机科学的一门交叉学科,既充分利用了经典摄影测量的优点,又结合当前飞速发展的计算机科学与技术,形成了一套严密而完整的理论。数字摄影测量的许多概念、与其他学科的相互关系及其在整个地理信息产业的影响,都远远超过了以前从模拟摄影测量到解析摄影测量的变革,它掀起的是一次产业革命。

计算机的问世,使人们自然想到用它来完成摄影测量中复杂的几何解算和大量的数值计算。数字摄影测量的发展起源于摄影测量自动化的实践,即利用相关技术来实现真正的自动化测图。1950年,美国工程兵研究发展试验室与一家光学仪器公司合作研制了第一台自动化摄影测量测图仪,将像片上的灰度值转化成电信号,利用电子技术实现自动化。这种技术的发展促使了B8-stereomat, Topomat等光学型和机械型或解析型投影仪的产生。与此同时,摄影测量工作者也试图将影像灰度转化成电信号再转化成数字信号,然后由计算机来实现摄影测量的自动化过程。1957年,Helava提出利用计算机进行解析法测图,用以代替有上百年历史的模拟法摄影测量(李德仁,2001)。20世纪60年代,美国成功地研制了一套自动化测图系统。到70年代中期,解析测图仪进入了商用阶段,如德国Ziss的

C100、C110、C120、C130 系列, 瑞士 Wild 和 Kern 厂的 AC1、BC1、AC2、BC2 以及 DSR1、DSR11 等。在我国, 王之卓教授于 1978 年提出了全数字自动测图系统的研究方案, 并于 1985 年完成了全数字自动测图系统 WUDAMS。从 20 世纪 90 年代起, 摄影测量已经全面进入全数字的自动化时代, 许多科研版的数字化摄影测量系统逐渐应用于生产实践, 商用的数字摄影测量工作站 (Digital Photogrammetric Workstation, DPW) 如 VirtuoZo 及 JX4 等开始进入市场和生产单位, 现已全面普及。

解析摄影测量侧重于研究摄影测量的严密解算方法和理论, 并应用平差及粗差检测的理论和算法提高结果的精度和可靠性。数字摄影测量可视为解析摄影测量的继续和扩展, 解析摄影测量中研究的严密解算理论均为数字摄影测量所继承, 它的研究重点是如何将计算机科学中的模式识别理论用于摄影测量, 实现自动或半自动识别, 最终达到摄影测量的自动化 (张祖勋, 1996b; 李德仁, 2000; 张祖勋, 2000)。数字摄影测量将数字化的扫描影像和数字影像作为处理对象, 以计算机对影像框标和同名点的识别来代替人眼的观测, 从而自动获取地面点的三维信息。相对模拟摄影测量和解析摄影测量而言, 它不论从获取信息的手段、能力、效率还是灵活性方面都是一个革命性的飞跃。

摄影测量进入“数字摄影测量”时代后, 已经脱离了传统的精密光机仪器 (模拟测图仪、解析测图仪), 摄影测量的原始信息——影像——也全部由计算机进行处理, 使摄影测量与计算机紧密地联系在一起, 成为融数字图像处理、计算机技术、自动化技术等于一体的综合性学科。近景摄影测量作为摄影测量的一个分支, 其发展已有五六十年的历史, 目前已广泛应用于各类建筑工程、机械制造、航空航天、船舶和汽车制造、城市规划、地质、冶金、医学、生物、考古甚至美术等领域。但由于近景目标的大小各不相同, 测定精度的要求差别悬殊, 产品形式多种多样, 其理论和实际应用方面都有一系列特殊问题需要研究 (冯文灏, 2002)。ISPRS 专门设立了一个下属组织——近景摄影测量与机器视觉, 每两年召开一次国际性的学术会议, 其研究方向包括视觉计量系统与工业应用自动化、三维景观建模与虚拟现实、医学影像分析、影像序列分析、可视化与仿真及文化遗迹三维重建等, 以促进专家和学者们进行广泛的国际交流与合作 (王艳慧, 2002)。

综合而言, 摄影测量的三个阶段产生于特定的背景, 具有各自的特点。表 1.1.1 简要列出了摄影测量发展的三个阶段各自的特点 (张祖勋, 1996a; 李德仁, 2001)。

表 1.1.1

摄影测量三个阶段的特点

发展阶段	原始资料	投影方式	仪器	操作方式	产品
模拟摄影测量	像片	物理投影	模拟测图仪	作业员手工	模拟产品
解析摄影测量	像片	数字投影	解析测图仪	机助作业员 操作	模拟产品 数字产品
数字摄影测量	像片 数字化影像 数字影像	数字投影	计算机	自动化操作 + 作业员干预	模拟产品 数字产品

1.2 计算机立体视觉的发展与现状

计算机视觉(Computer Vision)研究的主要目的是使计算机系统具有类似于人类的视觉能力,获取三维场景的几何信息是其最基础的研究内容(马颂德,1998)。计算机视觉的发展可以追溯到20世纪50年代初。1951年,Neumann提出利用计算机通过对比图像相邻位置的强度来进行图像的分析,这可能是有记载的有关计算机视觉最早的实践(Eklundh,2001)。立体视觉的开创性工作是从60年代中期开始的。MIT的Robert完成的三维景物分析工作,把过去对二维图像的分析推广到三维景物,标志着立体视觉技术的诞生,并在随后20年中迅速发展成一门新的学科。1979年,Marr综合图像处理、心理物理学、神经生理学及临床精神病学的研究成果,从信息处理系统的角度出发提出了第一个较为完善的视觉系统框架。尽管该系统许多方面不完备,但还是为广大计算机视觉工作者基本接受。20多年来,研究者们对Marr基本理论框架中所提出的各个研究层次与视觉系统的各个阶段中的各种功能模块,进行了大量的研究。Marr创立的视觉计算理论对立体视觉的发展产生了巨大影响,现已形成了从图像获取到最终的景物可视表面重建的完整体系,在整个计算机视觉中占有越来越重要的地位。

立体视觉(Stereo Vision)是计算机被动测距方法中最重要的距离感知技术,它直接模拟人类视觉处理景物的方法,可以在多种条件下灵活地测量景物的立体信息。Barnard指出,一个完整的立体视觉系统通常可分为图像获取、摄像机定标、特征提取、立体匹配、深度确定及内插等六个部分(Barnard,1982)。计算机立体视觉技术在机器人视觉、产品检验、零件识别与定位、图像图形识别、医学整形和美容、工业产品的外观设计、三维轮廓测量、艺术雕塑、建筑、国防等领域有着广泛的应用前景,是当今国际上的热门课题之一(彭嘉雄,1992;贾云得,2000)。研究方法从早期的以传统相关理论为基础的相关匹配,发展到具有很强生理学背景的特征匹配,从串行到并行,从直接依赖于输入信号的低层次处理到依赖于特征、结构、关系和知识的高层次处理,其理论正处在不断发展和完善之中。对它的研究无论是从视觉生理的角度还是在工程应用中都具有十分重要的意义(李奇,1999)。

立体匹配(Stereo Matching)是立体视觉中最重要也是最困难的问题之一。计算机视觉(包括摄影测量)的问题本身就是一个病态(ill Posed)问题,当空间三维场景被投影为二维图像时,同一景物在不同视点下的图像会有很大不同,它是三维物体几何特征、光照、物体材料表面性质、物体的颜色、相机参数等许多参数的函数。这些函数往往是非线性的,问题的解不具有唯一性,而且对噪声或离散化引起的误差极其敏感。对于任何一种立体匹配方法,其有效性有赖于3个问题的解决,即:选择正确的匹配特征,寻找特征间的本质属性及建立能正确匹配所选特征的稳定算法。立体匹配的研究都是围绕着这三个方面进行,并已提出了大量各具特色的匹配方法。但由于立体匹配涉及的问题太多,至今仍未得到很好的解决,特别是在复杂场景中,如何提高算法的去歧义匹配和抗干扰能力,降低实现的复杂程度和计算量,都需要进行更深入的探索和研究(游素亚,1997)。

视觉计算中的误差估计是在图像处理的基础上发展起来的,它从信息处理的层次研究视觉信息处理的计算理论、表达与计算方法。对视觉信息处理的各个阶段的误差分析,一直是一个十分困难而又极少被研究的问题,虽然在数字图像处理中提出了互相关技术、累

积误差等经典方法, 但一个明显的缺点是没有反映出误差的结构特点和分布特性, 一个有意义的小差异, 可能导致错误的结果, 限制了视觉算法的通用性(蒋加伏, 1999)。因而, 如何在视觉信息处理的各个阶段, 建立起相应的误差估计方法, 是计算机视觉中一个值得深入研究的领域。视觉计算误差的正确估计, 将反过来为算法的改进提供依据, 因此有人提出利用形态学匹配误差分析方法, 来提高三维形态估计算法的可靠性和稳定性。

尽管专家和学者们研究出大量的技术和算法, 使得计算机视觉的理论和技術获得了快速的发展, 但还远远落后于人们所期望的发展水平, 主要困难体现在图像的多义性、环境因素的影响、海量数据的快速处理及先验知识的导引等方面。计算机视觉在图像理解、识别分类等方面仍将存在一个漫长的研究过程(贾云得, 2000)。

数字摄影测量在很多领域与计算机视觉是相同的, 尤其在影像匹配与解译等问题上, 它们如出一辙。近年来, 计算机视觉界的学者们已开始重视并利用摄影测量的原理进行三维物体还原等方面的研究。Debevec 利用初始几何模型及核线几何关系进行建筑物的半自动三维重建, 取得了很好的视觉效果(Debevec, 1996)。Bill Triggs 等人从计算机视觉工作者的角度撰写了关于摄影测量中所常用的光束法平差的论文, 以推进其在计算机视觉中的应用(Triggs, 2000)。数字摄影测量发展到今天, 已经不属于摄影测量工作者“独家所有”, 这是摄影测量界所面临的严峻挑战(张祖勋, 2000)。

除计算机视觉之外, 数字摄影测量与图像处理、模式识别及计算机图形学等都有或多或少的共同点, 因而一些学者认为数字摄影测量属于计算机视觉和计算机图形学的范畴, 是它们的一个子集(Leberl, 2001)。然而, 俄亥俄州立大学的 Toni Schenk 教授(Schenk, 1999)认为, “摄影测量和猫存在一个共同的、也是最重要的特点: 它们都有几条命……尽管摄影测量的终结已经被预测了若干次, 但仍然非常活跃并且具有独特的发展空间, 为更灵活有效地解决现有问题提供了巨大潜能”。而且, 计算机视觉的主要研究目的是使计算机系统具有类似于人类的视觉能力, 通过图像获取场景的三维描述, 它应该是一个与环境进行交互的系统(如机器人等)的组成部分(Schenk, 1999)。Ahmed 认为, 摄影测量的主要目标之一是从非接触式影像中获取可靠并且精确的量测信息, 它与计算机视觉的主要差别是摄影测量追求更高的量测精度, 而且并不是所有的计算机视觉应用都涉及量测问题(Ahmed, 2001)。另外, 摄影测量已经有 160 多年的历史, 其基本理论与算法都已非常成熟, 可以最大限度地利用一切有效数据, 通过最小二乘严密平差理论获取物体表面尽可能精确的三维模型。同时, 数字摄影测量通过吸收和借鉴图像处理、计算机视觉、模式识别等领域研究成果, 为其注入新的活力, 从而获得自身更长足的发展。

1.3 研究目标

检查和校准数码相机(包括摄像机)的内方位元素和光学畸变参数的过程称为相机标定(Camera Calibration, 也称为相机检校)。对于广泛使用的非量测相机来说, 标定是从二维图像获取三维信息必不可少的步骤。在摄影测量界, 经典的相机检校方法已经非常完善, 不过大多需要专门的试验设备, 且程序比较复杂(冯文灏, 2002)。随着摄影测量和计算机视觉理论的发展, 许多学者对标定技术进行了深入研究, 标定的控制场也从传统的三维空间控制场向二维平面控制场转变(Zhang, 1998a; Triggs, 1998)。为了适应无法布设控

制场环境下的应用,计算机视觉界最近提出了许多利用主动视觉技术进行相机自标定的算法,在无法布置控制场的环境中有其独特的作用,不过大多需要进行比较耗时的非线性最优化或者需要部分已知相机运动参数,且大部分自标定算法无法满足高精度三维量测的要求(邱茂林,2000)。在工业制造尤其是尺寸制造误差检测(Dimensional Inspection)等环境中一般都可以布设专用的控制场,而且这些应用中相机标定是获取高精度三维信息的前提,因而基于简单的平面控制场的非量测相机高精度标定方法具有很高的实用价值。

随着工业制造技术的不断提高和加工工艺的不断改进,对检测手段也提出了越来越高的要求,例如对工业领域中广泛使用的钣金件(钣金件属于机械零件的一大门类,一般指采用金属板类材料,通过冷作及冲压加工而成的零件(机械工业部,1993),如门、侧板、支架安装板等)的几何尺寸进行测量时,要求速度快且精度高。现有的各类主要三维测量方法中,大型三维坐标量测设备测量精度很高,但价格昂贵且工作效率较低。莫尔纹法的精度与光栅间距有关,且仅适应表面起伏不明显的平缓目标。牛顿环是一种干涉条纹,常用于检验光学元件的表面加工质量。该方法精度很高,设备简易,但仅适用于纵深不大的光学元件。结构光法对于缺乏纹理的物体是较为有效的一种量测手段,不过达到很高的精度比较困难。还有其他检测手段如采用卡尺、显微镜等,均难以兼顾速度与精度两者之间的矛盾(冯文灏,2002;冯文灏,2004;管海燕,2005)。基于计算机视觉的三维测量系统往往利用多台相机及结构光投影器等(Hemayed,1999),增加了系统成本,并且多台相机的标定误差等也会影响三维量测的精度。

近年来,迅猛发展的CAD/CAM(Computer Aided Design / Computer Aided Manufacture)技术为建立物体的几何模型提供了描述基础,大部分工业部件的几何形状都有相应的CAD数据。如何有效地利用这些CAD数据作为参考来评价产品的几何精度成为近年来的研究热点,不过目前还主要是与三维坐标量测机(Coordinate Measurement Machine, CMM)结合使用(Spitz,1999)。

我们感知的外部景物通常都是三维的,而且经常随时间变化,这就促使了序列图像分析的兴起。序列图像(Image Sequence)一般是指利用一台传感器(如摄像机)采集被测物的一组随时间(空间)变化的图像,相应的摄站外方位元素一般是时间的函数。运动图像序列的分析是视觉研究中的一个热点,在工业自动化、飞行目标跟踪、生物医学影像分析等方面具有广泛的应用前景(谭春健,1998)。序列图像具有重叠度高、同名特征的冗余观测值多等特点(张永军,2005),而对于数字摄影测量(包括计算机视觉)来说,较多的冗余观测值是成功进行粗差剔除,从而获取高精度三维重建结果的前提。

利用数字图像对机械零件的制造误差等进行自动检测在工业制造领域及计算机视觉中称为视觉检测(Visual Inspection)(张文景,1999;叶声华,1999),是指利用图像传感器获取数字图像,综合运用图像处理、精密测量等技术进行非接触式二维或三维待测特征的检测,以测定产品尺寸是否与设计数据一致,并由此判断产品是否合格,它是近年来计算机视觉与数字摄影测量新的研究热点。

因此,如何充分利用已有的CAD设计数据、高重叠度的序列图像,基于摄影测量的严密理论并结合计算机视觉的前沿成果与技术,研究并设计简便、高精度的工业零件特别是钣金件视觉检测系统在理论和实践上都具有重要意义。

理论研究及软件编制过程中所采用的硬件设备如图1.3.1所示,包括可在计算机控制

下获取影像的 CCD 摄像机、水平转盘、置于转盘上的平面格网和照明设备(将普通日光灯管封装在半透明灯箱中构成),其中转盘可通过步进电机由计算机控制进行旋转。平面格网可作为相机标定的控制场,也可在视觉检测时提供相机的外方位元素初值,此时待检测工业钣金件置于格网上,转盘旋转的过程中相机固定不动,并按等间隔获取序列图像。



图 1.3.1 视觉检测系统的硬件构成

1.4 本书的主要内容

本书较系统地研究了基于序列图像的小型工业零件尤其是钣金件尺寸制造误差或使用变形的视觉检测中所涉及的理论与方法,主要内容包括:影像格网点与直线段的自动最小二乘模板匹配;基于基本矩阵和三视张量的观测值粗差自动剔除;基于同形矩阵(Homography)和二维直接线性变换(Direct Linear Transformation, DLT)并结合自检校光束法平差的非量测相机标定;附加刚体变换的点、线混合摄影测量模型;基于物方直接解的空间圆匹配与重建;基于广义点摄影测量的复杂形状三维重建及钣金零件的视觉检测试验与精度分析等。

(1) 简要回顾了序列图像几何处理的若干关键技术如非量测数码相机标定、空间物体三维重建及工业零件视觉检测等的研究与发展现状。

(2) 讨论了相机的线性与非线性模型,系统论述了双视几何及三视几何的性质与计算方法。

(3) 介绍了序列图像中点、线特征提取的主要算法,并对各算法的实用性和优缺点进行分析,重点讨论了基于模板匹配的特征点和直线段提取方法。

(4) 全面系统地论述了基于平面控制场的非量测数码相机标定技术,给出了基于同形矩阵和二维 DLT 的数码相机内外方位元素初值分解方法,论述了自检校光束法平差的数学模型和相机标定的相关问题,并结合实际数据进行了大量试验与分析,验证了理论和算法的正确性和可行性。

(5) 详细推导了附加刚体变换的特征点和直线段摄影测量模型,介绍了方差分量估计、系统参数的统计检验、病态矩阵无偏解算等相关技术。

(6) 基于广义点摄影测量理论,系统分析了常见的几种复杂形状如圆(圆弧)、圆角矩

形及数学曲线的三维重建方法。

(7)介绍了所研究的序列图像视觉检测理论和方法在工业钣金件及复杂形状三维重建与视觉检测中的应用,并就重建精度等方面的问题进行了深入分析。

第2章 相机标定、三维重建与视觉检测研究进展

近年来,利用非量测相机进行二维、三维重建和尺寸检测获得了越来越多的研究,相应的相机标定方法也重新成为研究热点。总的来说,计算机视觉界提出的许多不需要标定物的自标定技术在无法布设控制场的情况下有独特的作用,但其精度水平则无法与传统的标定方法尤其是光束法相比。从影像自动提取特征信息并进行物体的三维重建不仅是测量领域所关心的问题,同时也是计算机视觉和图像理解领域非常热门的研究课题。近年来,基于CAD模型和摄影测量理论的三维重建获得了快速发展,不过目前的研究重心主要在反求工程(Reverse Engineering)领域,而现有的基于序列图像的自动三维重建研究主要集中在计算机视觉领域。工业零部件的制造与使用检测是一个越来越受重视的研究方向,尤其是近年来迅猛发展的CAD/CAM技术为建立物体的几何模型提供了基础,使得以CAD和CMM相结合的自动、半自动检测技术获得了长足的发展。利用非量测数字摄像机对工业钣金件的尺寸制造误差或使用变形进行视觉检测时,相机标定、三维重建及视觉检测是三个必不可少的步骤,本章将对这三个方面的国内外研究现状进行讨论与分析。

2.1 数码相机标定研究进展

数码相机和数字摄像机是计算机视觉系统获得图像信息的主要工具,近年来,利用数码相机和摄像机进行二维、三维重建和尺寸检测获得了越来越多的研究。检查和校准相机(摄像机)的内方位元素和光学畸变参数的过程称为相机标定,摄影测量中称为相机检校,二者是同一概念,下文不再区分。对于广泛使用的非量测数码相机(包括摄像机)来说,标定是从二维图像获取高精度三维信息的前提。由于相机的成像关系并不是理想的透视模型,根据不同的使用场合及所要求达到的精度,需建立不同复杂程度的相机模型,所建立的模型越接近相机的实际且模型参数能准确标定出来,则获得的测量精度越高,但与此同时,模型越复杂,标定的难度也越大。

在摄影测量界,经典的量测相机检校方法如光学实验室检校、试验场检校、恒星检校等已经非常完善,不过大多数方法都需要专门的试验设备,且程序比较复杂(冯文灏,2002)。总体而言,利用三维控制场进行相机标定程序简单,但高精度控制场的建立比较困难。廉价数码相机的广泛应用,促使简便高精度的标定方法成为近年来研究的主要方向。随着摄影测量和计算机视觉理论的发展,许多学者对相机标定技术进行了深入研究(段发阶,1997;张健新,1999a;常本义,1999;Zhang,1998b;Triggs,1998;Sturm,1999),标定的控制场也从三维向二维转变。从数码相机在视觉检测中获得应用以来,有关学者根据实际应用的具体需要提出了一些不同的相机模型和标定方法。现有的相机标定方法根据模型中

是否考虑光学系统的畸变,可分为畸变模型标定法和非畸变模型标定法;根据所采用的求解方法不同可分为非线性搜索法、全线性化方法、线性与非线性相结合的方法等(段发阶,1997)。邱茂林根据标定过程是否需要控制场将相机标定分为传统标定方法和自标定方法(邱茂林,2000),以下采用该分类方法对现有标定技术进行阐述。

1987年,Tsai采用相机的径向畸变模型,利用“径向准直约束”(Radial Alignment Constraint)条件提出一种“两级”(Two Stage)标定方法(Tsai,1987),先用径向准直约束求解模型参数中的大部分,然后再用非线性搜索法求解畸变系数、有效焦距及一个平移参数。这种方法计算量不大,精度适中,是计算机视觉中通常采用的标定方法。但此方法的主点需要通过其他方法进行预标定,而且只考虑径向畸变,当切向畸变较大时不适用;另外在他提出的非共面标定方法中,求解出的旋转矩阵不满足正交条件。国内的许多学者对Tsai的方法进行了实现或改进(高立志,1998;高立志,1999)。

三维DLT也是一种常用的相机标定方法,由于不需要相机内方位元素的初值,因而在非量测相机的标定中具有重要的应用价值。该方法采用一张像片即可进行标定,不过至少需要已知6个点的空间坐标及其相应的像点坐标,而且需要避免所有控制点近似位于同一平面内的情况,许多学者对此进行了深入的研究与分析(Wei,1996;Chen,1997;Pan,1998)。

张正友于1998年提出了一种利用旋转矩阵的正交性条件及非线性最优化进行相机标定的方法(Zhang,1998a)。该方法要求相机在两个以上不同的方位拍摄一个平面模板的图像,网格状的模板可以用普通的激光打印机打印,贴在一个平面上(如玻璃板等)。这种方法也属于传统的相机标定方法,只是用平面模板代替了传统相机标定中的三维标定物,其特点是方法简单方便,成本低,标定稳定性和精度高于一般的自标定方法。

张永军从摄影测量的角度出发,提出基于平面控制场,通过二维DLT变换和自检校光束法平差进行非量测数码相机的高精度标定(张永军,2002a),获得了很好的试验结果,并已成功应用于工业钣金零件的高精度三维重建中,获得了优于 $1/8\,000$ 的相对精度(张永军,2002b)。詹总谦将平面控制格网改为计算机液晶屏幕上投影的格网点,基于同样的方法进行非量测相机的标定,也获得了良好的标定精度(詹总谦,2007)。

传统的相机标定方法需要在场景中放置一个标定物,但某些情况下可能难以实现,如高危地区的监测、星球探测机器人的自主导航等。为了克服这些缺陷,基于主动视觉的自标定(Auto Calibration)技术获得了发展。自从Faugeras(1992a),Maybank(1992)和Hartley(1994)等人提出相机自标定的概念,证明可以直接从多幅图像标定相机内参数,这方面的研究目前已成为计算机视觉领域中重要的研究方向。如图2.1.1所示,Malis等(Malis,2000)提出利用近似平面物的多张像片进行相机自标定,不过特征点间的同名对应关系需要人机交互给出。

一般来说,相机自标定方法大多需要求解非线性方程组,计算量大,而且往往是数值不稳定的。这些方法普遍存在的另外一个难题是基元匹配问题不容易自动实现。这主要是因为图像中点和线的数目一般很大,点或线所包含的信息不足以建立图像间的唯一对应,同时由于遮挡、噪声的影响,更增加了匹配的困难(吴福朝,2001),所以大部分自标定方法都假设同名特征的对应关系已经获得。

针对相机自标定方法存在计算量大、稳健性差的缺点,Hartley(1997)提出了一种新的