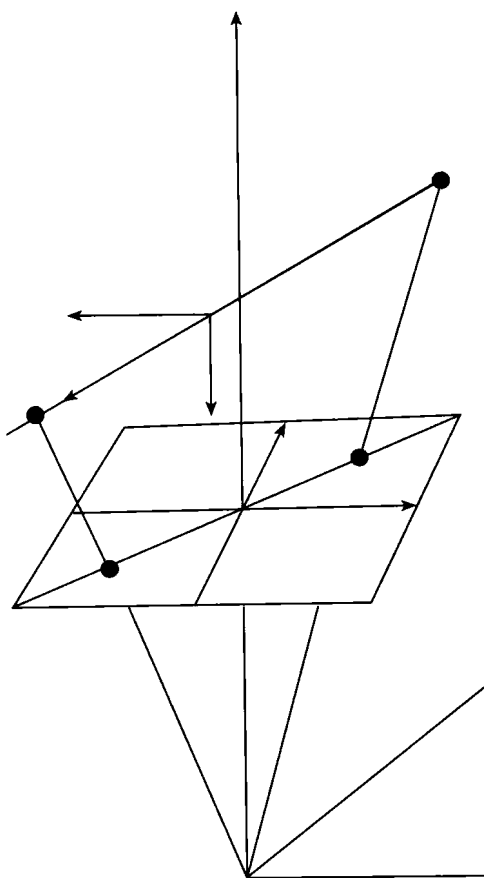




光学轮廓术

张舜德 著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

光学轮廓术 / 张舜德著. -- 北京: 人民邮电出版社, 2010.7
ISBN 978-7-115-22897-0

I. ①光… II. ①张… III. ①轮廓—光学计量学
IV. ①TB96

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第098866号

内 容 提 要

本书是一本关于非相干光学轮廓术的技术性专题著作, 比较全面系统地介绍了二至三维非相干光学轮廓测量技术的基本原理及主要应用。全书共分9章, 第1章主要介绍了光学轮廓测量技术的发展现状及光学轮廓测量系统的基本组成, 第2章讨论了二维及二维半光学轮廓测量技术, 第3章~第9章讨论了目前该领域最主要的几种三维光学轮廓测量技术。

本书大部分内容为作者多年来的研究成果, 部分内容采纳了本领域同行的最新研究成果, 基本反映了当前国内外的最新研究水平。本书可作为光电技术与仪器等相关专业本科生及研究生的教材, 亦可供有关科技人员参考。

光学轮廓术

-
- ◆ 著 张舜德
责任编辑 李 旸
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京艺辉印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 800×1000 1/16
印张: 16.75 2010年7月第1版
字数: 304千字 2010年7月北京第1次印刷

ISBN 978-7-115-22897-0

定价: 42.00 元

读者服务热线: (010) 67170985 印装质量热线: (010) 67129223
反盗版热线: (010) 67171154

前 言

光学轮廓术是利用光学方法获得物体表面轮廓数据的技术，即三维物体轮廓或面形测量技术。而三维面形数据信息的获取方法以及信息处理方法一直是国内外科研究人员的主要研究课题之一。早期的三维测量方法主要是利用接触式的探头（如探针）来获取物体表面的三维坐标。随着激光器的发明和应用，人们采用激光探测头来代替机械探头，如 Renishaw 公司利用激光探测头的三坐标测量机来测量汽车壳体。1989 年日本系统与控制有限公司也研制了一套激光三角测量系统。尽管这些新研制的系统克服了机械探头的某些缺点，但是却未能完全摆脱其机械结构复杂，测量范围受到机械装置大小限制，以及逐点测量使得测量速度慢等缺点。

随着近代科学技术和工业技术的迅速发展，传统的光学机械测量方法已日益不适应近代工业和科学技术提出的高精度、高效率与自动化的测量要求，人们开始寻找新的方法。20 世纪 70 年代以来，随着计算机技术、新型光源和显示技术、数字投影技术等的发展，采用光学方法测量物体轮廓的几何尺寸和形状变得越来越容易。由于非相干光学轮廓测量方法非接触、无损、易于实现自动测量，且其测量系统简单，对测量对象和环境要求较低，因而可广泛用于在线检测、质量控制、反求工程、CAD/CAM、机器视觉、医学诊断、体积面积测量、缺陷分析等需要物体的二至三维信息的众多领域。尤其是在测量物体的三维轮廓方面更显示出其优越性，因而引起了不同应用领域、不同专业、不同研究方向专家学者们的关注。

本书中的光学轮廓测量方法主要是指通过光学非相干方法实现的技术，即测量中利用光的强度信息进行编码，都是在图像采集的基础上进行解码计算的，强度信息可能是灰度条纹图，也可能是复杂图案，还可能是彩色条纹图，书中所涉及的相位也仅仅是几何意义上的相位。光学轮廓术是一类不断发展的技术，既传统又现代，新思想、新方法、新技术、新应用层出不穷，发展前景良好。同时它又是一类涉及光学、计算机、机械、电子信息、自动控制等众多学科的综合性技术。因此，本书

在选材上除了介绍比较成熟的基本原理、基本技术外，还力求能够较为系统地对当前国内外这一领域的最新研究成果有所反映。本书可作为大学本科生和研究生现代光学测量技术等课程的教科书或参考书，亦可作为对非相干光学测量技术有兴趣和有需要的科技及工程技术人员的参考资料。

本书共分9章。第1章（绪论）主要介绍了光学轮廓测量技术的发展现状及光学轮廓测量系统的主要组成；第2章介绍了二维及二维半光学轮廓测量技术；第3章介绍了三维空间域图像测量技术；第4章介绍了光切法三维轮廓测量技术；第5章介绍了单频光栅编码的三维轮廓测量技术；第6章介绍了变频光栅编码的三维轮廓测量技术；第7章介绍了正弦结构光编码的三维轮廓测量技术；第8章介绍了线性结构光编码的三维轮廓测量技术；第9章介绍了彩色光栅编码的三维轮廓测量技术。

在本书的编著过程中，方强教授审阅了全书，并提出许多宝贵意见；宁波大红鹰学院的李延芳、李燕、汪爽等老师参与了资料的整理。同时，本书还参考了国内外学者和同行的有关论文，在此向他们表示衷心的感谢。

由于作者水平所限，疏漏与错误之处在所难免，恳请广大同行和读者不吝赐教。

张舜德

2010年2月

目 录

第 1 章 绪论·····1

1.1 概述·····1

1.2 光学轮廓术回顾·····2

1.3 非相干光学轮廓测量系统的组成·····8

1.3.1 光源和光学投影系统·····10

1.3.2 图像采集系统·····12

1.3.3 机械、电控系统及软件系统·····15

第 2 章 二维及二维半光学轮廓测量技术·····27

2.1 概述·····27

2.2 二维轮廓测量技术·····28

2.2.1 图像预处理算法·····28

2.2.2 图像边缘检测与提取算法·····32

2.2.3 标定算法·····33

2.2.4 轮廓曲线拟合算法·····38

2.2.5 误差分析·····42

2.3 二维半层去图像法测量技术·····43

2.3.1 层去图像法测量系统的工作原理·····44

2.3.2 层去图像法测量系统的技术要求·····45

2.3.3 层去图像法测量系统的关键实现技术·····46

2.3.4 层去图像法测量精度的影响因素·····55

第3章 三维空间域图像测量技术·····59

- 3.1 概述·····59
- 3.2 立体视差摄影测量法的原理·····60
 - 3.2.1 立体视差测量系统·····60
 - 3.2.2 改进的直接线性变换算法·····63
 - 3.2.3 实用的自动立体摄影测量算法·····67
 - 3.2.4 同名点坐标的自动求取方法·····68
- 3.3 实验测量系统·····71
- 3.4 系统参数和精度分析·····83

第4章 光切法三维轮廓测量技术·····93

- 4.1 概述·····93
- 4.2 点结构光测量原理·····94
- 4.3 光切法三维测量原理·····96
 - 4.3.1 光切法基本测量原理·····96
 - 4.3.2 光切 360° 三维轮廓测量原理·····98
 - 4.3.3 测量精度及编码失效现象·····98
 - 4.3.4 双三角并联的光切法三维轮廓测量原理·····99
 - 4.3.5 光切法三维测量系统的基本组成·····102
- 4.4 光学编码与信息提取·····103
 - 4.4.1 高斯光束柱面反射展成法生成线结构光·····103
 - 4.4.2 编码信息提取·····107
- 4.5 测量系统的标定·····108
- 4.6 激光线扫描三维形面测量系统的设计·····111
 - 4.6.1 机械系统的结构·····112
 - 4.6.2 基本测量方式及数据合成·····112
 - 4.6.3 系统设计·····114

4.6.4	载物台回转中心的确定	117
4.7	多视测量与数据拼接	121
4.7.1	“三点法”测量与数据拼接的原理	121
4.7.2	“三点法”测量数据拼接应用实例	124
4.8	影响测量性能的主要因素	125
4.9	光切法三维轮廓测量	127
4.9.1	测量系统简介	127
4.9.2	测量实例	127
 第 5 章 单频光栅编码的三维轮廓测量技术		130
5.1	概述	130
5.2	强度调制傅里叶变换相位测量	130
5.2.1	相位与高度的关系	132
5.2.2	离散傅里叶变换	133
5.2.3	变形虚拟光栅图的离散傅里叶变换	134
5.3	强度调制变形光栅图像的分析	135
5.3.1	频谱混叠和泄漏对解调的影响	135
5.3.2	背景光和反射率对频谱的影响	136
5.3.3	待测物体高度分布对频谱的影响	136
5.4	单频率强度调制的相位解调	137
5.4.1	相位解调	137
5.4.2	相位解调精度分析	138
5.5	单频光栅编码的应用实例	139
 第 6 章 变频光栅编码的三维轮廓测量技术		143
6.1	概述	143
6.2	双频光栅测量方法	143
6.2.1	双频光栅编码技术的原理	143

6.2.2	虚拟复合光栅测量的原理及实验·····	145
6.3	变频光栅测量方法·····	147
6.3.1	变频光栅编码技术的原理·····	147
6.3.2	测量系统的标定·····	148
6.3.3	变频光栅编码技术·····	150
6.4	ATOS 光学扫描仪的工作原理与系统标定·····	152
6.4.1	ATOS 测量系统的工作原理·····	152
6.4.2	ATOS 扫描头的标定方法·····	153
6.4.3	扫描测量实例·····	156

第 7 章 正弦结构光编码的三维轮廓测量技术·····158

7.1	概述·····	158
7.1.1	空间条纹扫描相位检测·····	158
7.1.2	相移技术·····	159
7.2	正弦结构光编码的莫尔条纹图的形成与分析·····	160
7.2.1	莫尔条纹图的形成·····	160
7.2.2	莫尔条纹图的参数·····	164
7.2.3	莫尔条纹轮廓·····	166
7.2.4	莫尔条纹的傅里叶分析方法·····	167
7.3	正弦结构光测量物体三维轮廓的莫尔法·····	173
7.3.1	阴影莫尔法·····	174
7.3.2	相移阴影莫尔法·····	178
7.3.3	投影莫尔法·····	183
7.4	基于正弦结构光编码的相移三维物体面形测量技术·····	185
7.4.1	概述·····	185
7.4.2	基本原理·····	186
7.4.3	光学结构分析·····	187
7.4.4	正弦光场的产生·····	190

第8章 线性结构光编码的三维轮廓测量技术·····194

- 8.1 概述·····194
- 8.2 线性编码的三维面形相位求解原理·····195
 - 8.2.1 单边线性编码的准外差计量原理·····195
 - 8.2.2 利用3个采样值的对称双边线性编码的准外差计量原理·····199
 - 8.2.3 相位展开·····202
- 8.3 三维物体面形测量系统的测量原理·····205
 - 8.3.1 三维物体面形测量系统·····205
 - 8.3.2 空间交叉轴系统的测量原理·····207
 - 8.3.3 空间异面光轴系统的测量原理·····210
- 8.4 测量系统标定·····214
 - 8.4.1 系统标定概述·····214
 - 8.4.2 间接平差法标定·····215
 - 8.4.3 相位差空间局域标定法·····223
- 8.5 系统性能分析、仿真及三维面形的自动测量·····225
 - 8.5.1 测量系统的性能分析·····225
 - 8.5.2 系统仿真·····227
 - 8.5.3 线性编码的三维物体面形自动测量·····232

第9章 彩色光栅编码的三维轮廓测量技术·····240

- 9.1 概述·····240
- 9.2 彩色编码光栅直接分析法三维轮廓测量技术·····241
 - 9.2.1 测量原理·····241
 - 9.2.2 数字编码方法·····241
 - 9.2.3 解码方法·····243
- 9.3 基于彩色复合光栅投影的三维轮廓测量技术·····245
 - 9.3.1 相位法的基本原理·····245
 - 9.3.2 基于彩色复合光栅的三维轮廓测量方法的基本原理·····246

9.3.3	相位展开算法·····	247
9.3.4	变形光栅中的频谱混叠·····	248
9.3.5	模拟分析与实验·····	250
参考文献·····		252

第1章

绪论

1.1 概述

现代社会生活与生产的众多领域对三维物体面形的测量需求越来越多。

目前,复杂曲面应用广泛,作用举足轻重。比如飞机壳体、大型船体、汽车壳体、高速列车机头等,其形体设计不仅影响其外观质量,而且还直接影响其在水中或空气中摩擦阻力的分布状态。又如水轮机叶片,飞机、轮船的螺旋桨等,其曲面设计、加工精度直接影响产品的工作效率。再如,许多复杂的成形模具,其外形设计和加工精度直接影响产品的质量。

装备了数控机床的现代化工厂可以生产用于航空、航天、汽车及医疗保健方面的复杂三维零件,然而由于传统的利用机械探针的测试方法具有测量速度慢和难以适应曲面测量的特点,在线检测和加工过程质量保证技术的发展并不适应加工技术的发展水平,因此就需要一套复杂曲面的三维轮廓测量系统,以期评价成品的加工质量或为数控加工过程提供数据。

人体曲面是由一些不能由数学公式完整表达的异型曲面所组成的,且接触变形大,机械式测量几乎是不可能的,而其表面形状对医疗诊断、美容、雕塑、服装加工、模特制造、假肢制造等是极其重要的,但目前尚无成熟的表面形状测量系统。

此外,世界上有许多珍贵文物、工艺美术珍品受到严重破坏,亟待修复或进行原型复制。综上所述,对复杂三维面形测量的需求已深入到人们生产和生活的诸多领域。

随着电子技术、视频技术、信息及图像处理技术、计算机技术、检测技术等不断发展,人们对三维物体几何轮廓测量技术的研究范围越来越广,方法日趋多样。非相干光测量法因其非接触、无损、全场、快速、高分辨率和易于实现自动化等特点已被广泛用于三维面形的

测量中。

1.2 光学轮廓术回顾

1985 年, Jalkio Kimand 和 Case 对主要的光学三维测量方法已经作过分类, 但现在看来, 这种分类方法存在不完善之处。结合光学三维测量技术的最新进展, 本书对已有的光学三维测量方法进行了重新分类, 如图 1-1 所示。

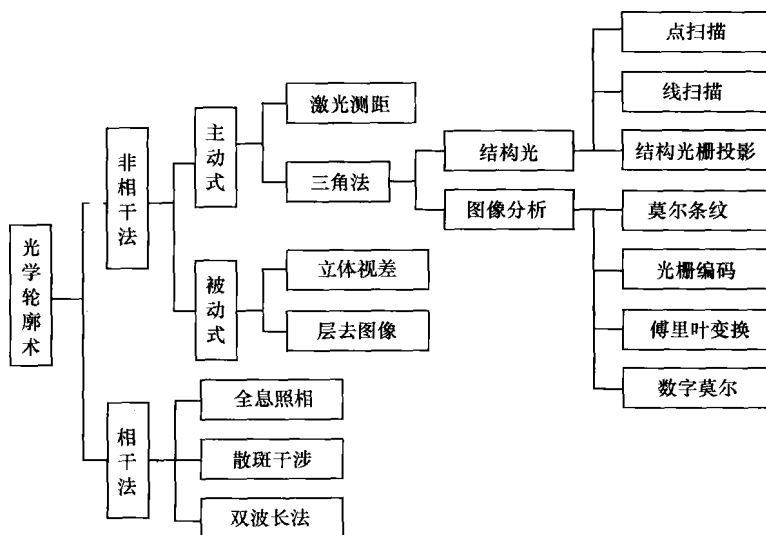


图 1-1 光学轮廓术的分类

激光测距仪测量法也叫飞行时间 (Time of flight) 法, 是自 1971 年发展起来的一种测量方法, 它利用光在空气中的传播速度为一定值的原理, 由光速测距仪主动发出脉冲, 在遇到物体表面时反射回来, 根据脉冲在测距仪与物体表面之间的飞行时间就可测得距离。

斯坦福大学的激光测距系统测得的图像像素为 128×128 , 物体表面与测距探测仪的距离为 $1 \sim 5\text{m}$, 测量所需时间为 2h 。

加州理工学院喷射推进实验室 (Jep Propulsion Laboratory) 研制的系统从相距 $1 \sim 3\text{m}$ 的物体测得像素为 128×128 的图像只需 3min , 测量精度为 2cm 。

澳大利亚的 Jarvis 研制的系统从相距 $1 \sim 4\text{m}$ 的物体测得像素为 64×64 的图像只需 40s , 测量精度为 0.5cm 。

激光测距仪测量法具有以下优点。

- ① 基于向物体发射能量, 不存在盲区 (Missing part)。
- ② 对物体表面性质 (颜色、质地、纹理) 不加限制。
- ③ 可直接进行绝对测量。
- ④ 无需取得图像及对图像作分析处理。

该方法的缺点是系统复杂, 测量精度低, 测量时间长, 只适合于特大型物体的测量。

1969 年, Hildebrand 和 Haines 从相干光学的观点出发, 提出了一种采用双波长光源的全息等高技术。它可以在物体上生成等高线, 等高线的分辨率取决于光源波长, 且不能任意变化。Hildebrand 和 Haines 提出的另一种方法是由两个具有不同波长的点光源产生的干涉条纹在物体上生成等高线, 与第一种方法相比, 第二种方法产生的等高线图的分辨率可以从波长级变化到忽米级。对于双光源系统来说, 其主要问题是, 若物体上有一些“漩涡花样”, 特定区域将不能清晰地描绘出全息等高图。

相干测量法对测量环境要求极高, 一般只能在实验室条件下测量, 且不易于实现自动化。

由于激光测距仪测量法和相干测量法都存在一些难以克服的缺点, 三角测量 (Triangulation) 法一直得到人们的重视。三角测量系统可以进一步分为主动式系统 (Active system) 和被动式系统 (Passing system)。

在相当长的一段时间里, 许多三维非接触测量工作都采用了被动式三角测量法, 三维信息的获取是基于图像分析的方法, 主要应用领域是航空测量、卫星遥感、机器人视觉等。军事方面的三维场景分析也对被动法有较大的需求, 因为这种场合下采用主动式测量是不现实的。典型的被动法是立体视差 (Stereo disparity) 法, 所谓视差就是物体表面同一个点在左右图像中成像点的位置差异, 根据左右图像成像点的位置就可解算出物体上对应点的空间坐标。近年来半导体光电器件的研究取得较大突破, 使得生产高分辨率的数字照相系统成为可能, 目前已能生产出 450 万像素的数码相机, 如禄来 6008 型、阿克法 Studio Cam 等。高分辨率数码相机已被用于三维测量中。这种测量方法的主要问题是多幅图像上同名点的搜索及自动匹配较为困难, 通常求取同名点的方法有两种: 一是依据被测物体上人工的或固有的特征点 (角点、局部灰度极值点等), 在各个视角方向的图像中形态的相似性进行匹配; 二是利用窗口或模板求对应点。

需要指出的是, “盲区”问题是光学三角测量的共性问题, 激光扫描法、光栅投影法及立体视差法都无法回避。根据双目视觉互补及光线的可逆性原理, 引入双 CCD 对称姿态摆

放测量方案或多视测量方法,能够在较大程度上消除测量“盲区”,但对物体的内腔测量仍无能为力。

层去图像法是一种二维半的轮廓测量技术,可用于测量物体截面轮廓的几何尺寸,其工作过程为:将待测零件用专用树脂材料(填充石墨粉或颜料)完全封装,待树脂固化后,把它装夹到铣床上,进行微吃刀量平面铣削,结果得到包含零件与树脂材料的截面;然后由数控铣床控制工作台移动到 CCD 摄像机下,位置传感器向计算机发出信号,计算机接收到信号后,触发图像采集系统驱动 CCD 摄像机对当前截面进行采样、量化,从而得到二维离散数字图像。由于封装材料与零件截面存在明显边界,利用滤波、边缘提取、纹理分析、二值化等数字图像处理技术进行边界轮廓提取,就能得到边界轮廓图像。通过物—像坐标关系的标定,并对此轮廓图像进行边界跟踪,便可获得物体该截面上各轮廓点的坐标值。每次图像摄取与处理完成后,再用数控铣床把待测物铣去很薄一层(如 0.1mm),又得到一个新的横截面,并完成前述的操作过程,就可以得到物体上相邻很小距离的每一截面轮廓的位置坐标。层切法可对有孔及内腔的物体进行测量,不足之处是这种测量方法的破坏性是不可逆的。

近年来,人们已经认识到在机器人领域三维视觉的重要性,对主动式测量的研究日益增长。在工业环境下用主动法获得三维数据要比被动法来得容易,主动式测量基于人为对景物的光学编码和与之相应的解码技术。光学编码可以是强度的,也可以是颜色的。按光学编码方式的不同,主动式测量方法可分为点扫描法、线扫描法及光栅投影法,其中用激光电光调制器生成的激光点阵编码照明法以及光栅投影法可以看作是点扫描法和线扫描法的一种扩充。单点扫描和光栅扫描法具有光效率高、测量意义明确且精度高的优点,其缺点是信息量小并且要求复杂的扫描装置。

激光点阵编码法是点编码法的扩展,它是一种全场的空间离散编码,所处理的信息量大,但由于诸编码点的相关性差,数据处理速度慢,且编码实施难,目前已很少使用。

光栅投影法是一种全场法,信息量大,由于其空间编码具有一定的相关性和连续性,测量速度快,具有较高的精度。通常将一正弦光栅(Sinusoidal grating)或矩形光栅(Ronchi ruling)投影到物体上对三维物体面形进行编码。当光栅投影到物体上时,因物体表面的高度变化产生了畸变光栅,通过对变形光栅的分析,就可获得物体的三维形状信息。根据对变形光栅解调方法的不同可将目前所遇到的光栅式测量法分为莫尔(Moiré)法和直接分析法两大类。莫尔法是一种变形光栅的间接分析法,它首先将光栅投影形成变形条纹,然后借助多种手段,对变形条纹进行分析得到待测信息。而直接分析法是通过直接分析

获得待测信息。

关于莫尔现象,可以追溯到 19 世纪 70 年代。英国物理学家 Lord Rayleigh 于 1874 年第一次描述了两块光栅叠合后形成的莫尔条纹,直到 20 世纪 70 年代它才被用于三维测量。在经典莫尔法中,变形光栅的解调借助于匹配一参考光栅来实现,结果产生了莫尔等高线,此即所谓的莫尔轮廓术。莫尔轮廓术按莫尔条纹生成方式的不同可分为投影型 (Projection Moiré) 和阴影型 (Shadow Moiré)。

1970 年, Takasaski 和 Meadows 提出了阴影莫尔法。在这种系统中,光源照射接近物体的光栅,从与照明光束成一夹角的另一方向观察物体上的光栅像(变形光栅)时,就可以观察到物理光栅与这一变形光栅叠合而形成的莫尔条纹。这种系统比较简单,但为了形成清晰的莫尔条纹必须避免衍射效应,光栅面要尽可能靠近被测物体,而且要求光栅尺寸与被测物体表面相当。由于参考光栅与变形光栅并不独立,因此这种系统无法运用传统意义上的相移方法提取信息,难以实现自动测量。

1975 年, Benoit 和 Mathieh 等人提出了将光栅投影在物体上,通过另一光栅来观察物体上的变形光栅的方法。同年 Miles 和 Speight 等人提出利用两张光栅照片获得莫尔条纹的方法。其中一张摄有光栅被投影在物体上后形成的变形光栅,另一张摄有投影光栅,然后将两张照片叠合形成莫尔条纹。这在本质上都是投影莫尔法,这种系统的特点是光栅可以远离被测物体表面,并且可用较小尺寸的光栅测量较大的物体。

Glatt 和 Kafri 于 1988 年提出了基于几何光线轨迹描绘的莫尔偏转测量术 (Moiré deflectometry),实质上它还是经典莫尔法的一种应用,其中,光栅的变形是由于被测物体的折射率变化引起的。这种方法主要用于光学零件的测试、流场密度分析、传播现象研究等特定领域。经典莫尔法主要用于测量长度,兼有高分辨率、大量程测量,可实现动态测量、自动测量及数字显示,但高精度的光栅尺价格较贵,制造量程大于 1m 的光栅尺尚有困难。莫尔法用于三维面形测量时,等高线的深度因衍射而受到影响,且物体的大量高度信息用等高线的形式描述容易被丢失,难以识别相邻等高线级间物体的高度变化(起伏),其测量精度主要取决于光栅常数和光栅的相对位置。

1977 年, Moore 和 Truax 提出了一种锁相莫尔法,它基于莫尔条纹的相位振荡和锁相原理,其精度能达到莫尔条纹间距的 1/20,并可在精度与测量深度之间取得折中,以满足不同场合的测量要求。实现相位振荡所需的机械系统比较复杂,实现锁相需要同时存储大量信息,这是这种方法的缺点所在。

1982 年, Yoshizawa 等人提出了一种在莫尔等高线级间实现内插,以提高测量精度和分

分辨率的方法,这实质上是一种外差法。它通过等速移动一参考光栅和改变其中一个探测器相对于另一个固定探测器的位置,可以获得对应于该位置的两路连续信号,两路信号经相位仪比较,就可描绘出相位图,其插值分辨率可达条纹间距的 $1/3\ 600$ 。为了提高测量精度,对机械系统本身的精度要求很高,尤其是等速运动精度,对光栅精度也有较高的要求,且由于它是离不开人工干预的逐点描图法,处理速度慢,难以实现自动化。

我们知道,光栅本身的参数决定着莫尔法的测量灵敏度,节距越小,灵敏度越高。为了满足不同测量场合对灵敏度的不同要求,或同一场合下对可变灵敏度的要求,就应该能简便地、快速地获得一个不同节距的光栅。

Chiany 和 Jaisingh 以及 Asundi 分别在反射莫尔及阴影莫尔领域各自发展了可改变节距的方法,但这些方法在测量过程中仍需变更光栅元件,且灵敏度变化范围有限。由于用物理光栅解调变形光栅的方法具有致命的弱点,人们开始尝试通过电子或计算机模拟产生的模拟光栅来解调变形光栅,这实质上是对变形光栅进行直接分析的方法。1977年,Idesawa 等人发展了一种称之为扫描莫尔的方法,它是利用扫描成像设备对变形光栅采样并通过计算机处理,借助于控制扫描相位、节距以及扫描线形成虚光栅的方向生成高对比度的莫尔条纹。这种方法可实现条纹自动内插,且能通过软件补偿系统误差,但扫描设备的暂态非稳定性(电噪声)引起的莫尔条纹的高次谐波项无法补偿,不能自动指定条纹绝对级,用于实际测量处理速度慢。

1989年,Blat 利用声光调制器(Acousto-Optic Cells)产生了模拟光栅,栅距可通过改变声光调制器的频率来实现,从而达到了在模式识别或机器人视觉中,为了减少运算量而匹配合适分辨率的目的,但这种系统所用到的机电装置比较复杂。1993年,Asundi 又将计算机产生的光栅用于莫尔法中,利用软件能快速、灵活地改变计算机光栅的间距及逻辑莫尔的灵敏度,快速实现相移,通过两步相移可自动确定逻辑莫尔的条纹级;如果配合使用液晶显示投影器,其应用更为广泛。计算机光栅为莫尔法开辟了新的天地。

许多年来,人们一直致力于莫尔法的研究,在提高精度、改善灵敏度、实现自动化等方面做了不少工作,积累了不少可为其他三维面形测量系统借鉴的经验,许多方法用于特定测量对象都取得了比较令人满意的结果,但都又不同程度地存在这样或那样的问题。也就是说,无论哪一种改进都不能从根本上克服莫尔轮廓术中所遇到的所有困难,莫尔法还有待于进一步完善和发展。

作为一种基于计算机技术的自动三维测量法,傅里叶分析法也是一种对变形光栅直接解调分析的方法。1983年,Takeda 和 Moutoh 提出了将变形光栅信息在频域上经过傅氏变换与