

東南大學
博士学位论文

高精度、实时数字图像相关变形测量

专业名称：固体力学

研究生姓名：邵新星

导师姓名：何小元

本论文获国家自然科学基金项目（11327201, 11532005, 11272089）、东南大学优秀博士论文基金（YBJJ1553）资助、东南大学优秀博士学位论文培育对象（YBPY1702）资助。

HIGH-ACCURACY, REAL-TIME DIGITAL
IMAGE CORRELATION FOR
DEFORMATION MEASUREMENT

A Dissertation Submitted to
Southeast University

BY
Xinxing Shao
Supervised by
Prof. Xiaoyuan He

School of Civil Engineering
Southeast University

April 2018

东南大学学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得东南大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名：_____日期：_____

东南大学学位论文使用授权声明

东南大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆、《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司、万方数据电子出版社、北京万方数据股份有限公司有权保留本人所送交学位论文的复印件和电子文档，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外，允许论文被查阅和借阅，可以公布（包括以电子信息形式刊登）论文的全部内容或中、英文摘要等部分内容。论文的公布（包括以电子信息形式刊登）授权东南大学研究生院办理。

研究生签名：_____导师签名：_____日期：_____

中文摘要

数字图像相关 (Digital Image Correlation, DIC) 方法是目前光测力学研究领域最为活跃的测量方法, 其在科研和工程测量都得到了广泛的应用。随着数字图像相关方法应用领域的拓宽, 其测量精度、计算效率和适用性都急需得到进一步提高, 以满足科研和工程领域不断提出的新需求。

目前, DIC 的位移测量精度可以达到 0.01 像素, 已经能够满足大部分位移测量的需求。但是, 与常规使用的电测应变技术相比, DIC 的应变测量精度还不能满足大多数情况下的测量需求。同时, 由于受到散斑制备质量、计算参数选取以及被测力学量的计量溯源等诸多因素的影响和制约, DIC 测量结果的一致性和正确性还难以得到保证。此外, 随着 DIC 技术的发展, 该技术越来越多地被用于工业在线检测和医学测量中。对于工业在线检测和医学测量, DIC 的测量速度显得尤为重要, 需要满足实时测量的需求。而且, 对于目前常规使用的单目和双目测量系统, 其适用性仍然不能满足实际测量需求, 如极端环境下的测量、多尺度变形测量和大尺度下的测量。

本文工作以实现高精度、实时 DIC 变形测量为目标, 从 DIC 计算精度、计算效率、系统标定三个角度出发, 取得了如下成果: (1)分析了反向组合高斯牛顿算法在噪声条件下的理论误差公式, 发现其均值误差中的噪声引入误差项在选择合适的灰度梯度算子时可以被消除, 揭示了噪声引入误差消除的机理。通过与传统的牛顿拉普森算法对比, 证明了反向组合高斯牛顿算法在计算效率和抗噪声能力上的全面优势, 给出了全新的 DIC 理论误差公式。(2)提出了一种基于种子点扩散的并行计算方法, 结合高效率的反向组合高斯牛顿算法与双三次 B 样条插值查找表, 实现了实时 DIC 变形测量。将并行方法扩展到三维数字图像相关方法中, 在子线程中逐步实现时序匹配、立体匹配和三维重构, 实现了 5000 点 10Hz 的三维变形实时测量。(3)提出了一种基于摄影测量和散斑特征匹配的相机内外参标定方法, 解决了三维 DIC 大视场条件下的相机内外参标定问题, 成功实现了大视场条件下的三维 DIC 高精度变形测量。(4)基于散斑自标定方法和反射式的单相机三维成像装置, 提出了一种自标定单镜头三维视频引伸计用于高精度实时应变测量, 解决了传统引伸计测量中的离面位移影响、相机同步、繁琐标定三项问题。(5)提出了一种基于相机阵列的高精度 DIC 全场应变测量方法, 通过高精度标定的相机阵列内外参数实现了亚像素级别的图像拼接和位移场拼接, 获得了亿级像素散斑图像和全场 10 微应变的应变测量分辨率。

关键词: 数字图像相关; 变形测量; 测量精度; 计算效率; 三维标定

Abstract

Digital image correlation (DIC) method is the most popular deformation measurement technique in the field of photomechanics. DIC technique has been widely used in both scientific and engineering measurements. With the widening of DIC applications, the measurement accuracy, computational efficiency and applicability of DIC are in urgent needs of further improvements, to meet the continuous needs of scientific and engineering fields.

At present, the displacement measurement accuracy of DIC can reach 0.01 pixels, which can meet the most of requirements of displacement measurement. However, compared to the traditional strain gauge technique, the strain measurement accuracy of DIC is not enough for measurement requirements in most situations. Meanwhile, affected by many factors, such as quality of speckle patterns, selection of calculation parameters and calibration of measured mechanical quantities, the consistency and correctness of the DIC measurements can't be guaranteed. Moreover, with the development of DIC technique, DIC is increasingly used in industrial online detection and medical measurement. For industrial online detection and medical measurement, the computational efficiency of DIC is vitally important, the requirement of real-time measurement needs to be met. Furthermore, for the normally used monocular and binocular measurement systems, their applicability still can't meet the practical measurement requirements, such as measurements in extreme environment, multi-scale deformation measurement and large-scale measurements.

The aim of this dissertation is to achieve the goal of high-accuracy and real-time deformation measurement using DIC, from the perspectives of measurement accuracy, computational efficiency and system calibration. The major achievements of this dissertation are as follows (1) The statistical error formula of the inverse compositional Gauss-Newton (IC-GN) algorithm is analyzed in terms of noise. We find that the noise-induced bias error of IC-GN algorithm can be eliminated when proper operator is used and the mechanism of elimination of noise-induced bias error is revealed. Through the comparisons to the Newton-Raphson algorithm, the comprehensive advantages of the IC-GN algorithm in computational efficiency and noise robustness are demonstrated. The new statistical error formula of DIC is also given. (2) A seed point-based parallel method is proposed for parallel computation of DIC. With the high-efficiency IC-GN algorithm and lookup table of bicubic B-spline interpolation, real-time DIC is realized. The seed point-based parallel method was

further extended to three-dimensional (3D) DIC, the temporal matching, stereo matching and 3D reconstruction are implemented step by step in child thread, the real-time 3D-DIC is realized at a frame rate of 10 frames/s with resolution of 5000 points per frame. (3) Based on the close-range photogrammetry and speckle analysis, we propose the intrinsic and extrinsic parameters calibration method. With the proposed method, the calibration of 3D-DIC in large field of view measurement is realized and high-accuracy 3D deformation measurement is achieved. (4) Based on the speckle-based self-calibration method and the reflection stereo imaging device, we propose a self-calibration single-lens 3D video extensometer for high-accuracy and real-time strain measurement. The problems of effects of out-of-plane displacement, stringent synchronization and complicated system calibration are solved. (5) We propose a camera array-based DIC method for high-accuracy full-field strain measurement. Through the high-accuracy calibrated camera array intrinsic and extrinsic parameters, sub-pixel image stitching and displacement field stitching are realized. The one hundred-million-pixel speckle image and the full-field $10 \mu\epsilon$ strain measurement resolution are achieved.

Keywords: digital image correlation; deformation measurement; measurement accuracy; computational efficiency; three-dimensional calibration

中文摘要	I
Abstract	II
第一章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 数字图像相关方法概述	1
1.2.1 二维数字图像相关方法	1
1.2.2 三维数字图像相关方法	3
1.2.3 数字图像相关测量中现存问题	4
1.3 主要研究内容	5
第二章 高精度高效率鲁棒性强的反向组合高斯牛顿算法	7
2.1 反向组合高斯牛顿算法	7
2.2 考虑噪声条件下的理论误差分析	8
2.2.1 反向算法理论误差分析	8
2.2.2 正反向算法噪声鲁棒性的比较	10
2.3 数值模拟及实验验证	10
2.4 数字图像相关方法理论误差公式	13
2.5 小结	13
第三章 基于 CPU 并行计算的实时数字图像相关测量方法	14
3.1 引言	14
3.2 反向组合高斯牛顿算法中的查找表	14
3.2.1 参考图不变量查找表	15
3.2.2 双三次 B 样条插值查找表	16
3.3 基于种子点扩散的并行计算方法	17
3.3.1 种子点初始化	18
3.3.2 种子点扩散并行计算方法	18
3.4 二维实时数字图像相关方法	20
3.4.1 基于 CPU 并行计算的二维实时数字图像相关方法	20
3.4.2 二维实时数字图像相关在土木准静态实验测量中的应用	20

3.4.3 二维实时数字图像相关在实验室地震实时加载控制中的应用	23
3.5 三维实时数字图像相关方法	24
3.5.1 高精度、高效率的立体匹配算法	24
3.5.2 基于 CPU 的三维多线程并行计算	25
3.5.3 三维实时数字图像相关方法	26
3.5.4 三维实时数字图像相关在人体脉搏测量中的应用	29
3.6 平面物体立体匹配算法	31
3.6.1 平面物体立体匹配原理	31
3.6.2 三维模拟与结果	32
3.6.3 实验与可行性分析	34
3.7 小结	37
第四章 基于散斑特征匹配的大视场三维数字图像相关高精度标定方法	38
4.1 引言	38
4.2 三维数字图像相关立体标定	38
4.2.1 单相机内参标定	39
4.2.2 双相机外参标定	42
4.3 基于散斑特征匹配的大视场立体标定方法	43
4.3.1 基于摄影测量的相机内参标定	43
4.3.2 基于散斑匹配的相机外参标定	44
4.3.3 基于散斑匹配的标定方法的优势和限制	46
4.4 标定方法的实验验证	46
4.4.1 四点弯实验验证	46
4.4.2 混凝土柱压缩实验验证	48
4.4.3 尺度信息标定	49
4.5 在球墨铸铁圆柱形容器跌落实验中的应用	50
4.6 小结	51
第五章 自标定单镜头实时三维视频引伸计	52
5.1 引言	52
5.2 单镜头三维视频引伸计测量装置和原理	53
5.2.1 单镜头三维视频引伸计测量装置	53

5.2.2 单镜头三维视频引伸计测量原理	54
5.2.3 基于散斑的自标定方法	54
5.2.4 鲁棒性强的立体匹配策略	56
5.2.5 基于单镜头三维视频引伸计的实时应变测量	57
5.3 铝合金拉伸实验及测量结果	57
5.3.1 单镜头三维视频引伸计静态噪声分析	58
5.3.2 铝合金单轴拉伸实验	60
5.3.3 对测量结果的讨论	61
5.4 优势、局限性以及未来适用性讨论	61
5.4.1 单镜头三维视频引伸计的优势	61
5.4.2 单镜头三维视频引伸计的局限性	61
5.4.3 单镜头三维视频引伸计的未来适用性	61
5.6 小结	62
第六章 基于相机阵列的高精度数字图像相关应变测量方法	63
6.1 引言	63
6.2 相机阵列	63
6.3 基于标定的亚像素图像拼接	65
6.3.1 图像拼接模型	65
6.3.2 常用的图像拼接方法	66
6.3.3 基于散斑标定的图像拼接方法	67
6.3.4 亚像素位移场拼接方法	70
6.4 高精度全场应变测量	71
6.4.1 全场高精度应变计算	71
6.4.2 矩形板静态噪声分析	71
6.4.3 四点弯荷载下的全场变形测量	73
6.5 小结	74
第七章 总结与展望	76
7.1 全文工作总结	76
7.2 未来工作展望	77
致谢	79

参考文献.....	80
攻读博士学位期间的研究成果.....	93

第一章 绪论

1.1 研究背景和意义

物体表面变形场测量是分析材料力学参数、研究结构力学性能、认知力学行为、探索自然奥秘的直接手段。近年来，非接触现代光测力学[1][1][2]方法日益受到工业和工程领域的广泛关注。现代光测力学方法主要有全息干涉法[4][5]、云纹干涉法[6][7]、电子散斑干涉法[8][9]、剪切散斑干涉法[10][11]、投影栅线[12][13]和数字图像相关方法[14][15][16][17][18][19][20](Digital Image Correlation, DIC)等。其中，数字图像相关方法以其测量设备简单、环境要求较低等特殊优势从众多方法中脱颖而出，是目前光测力学研究领域最为活跃的测量方法。

1.2 数字图像相关方法概述

自1982年W. H. Peters等人[21][22]提出数字图像相关方法以来，大量学者对其中的亚像素匹配算法[23][24][25]、散斑质量[26][27][28]、计算参数选取[29][30][31]、测量精度[32][33]和计算效率[34][35][36]等方面进行了深入的研究和探讨，使得这一方法在一定程度上满足了科研和工业测量的需求。数字图像相关方法最初使用单个相机测量面内变形，即二维数字图像相关方法[15]。二维数字图像相关只能用于平面物体的面内变形测量，并且要求相机光轴必须与被测平面垂直。为了实现曲面物体的三维变形测量，Luo等[37]提出了基于立体视觉的三维数字图像相关方法[14]。三维数字图像相关方法的提出大大拓宽了数字图像相关方法的应用领域。

目前，数字图像相关方法在科研[38][39][40][41][40]和工程领域[43][43]都得到了广泛的应用。美国的CSI、德国的Dantec和德国的GOM等也相继推出了自己的商业测量系统，进一步加速了该方法的推广和使用。目前，美国Sandia国家实验室和佐治亚理工学院也已经相继公布了开源的数字图像相关计算软件，希望通过开源化来加快该方法的发展进程。2013年，东南大学光测力学课题组与中国科学技术大学光力学实验室合作研发的PMLAB 3D-DIC测量系统也已面世。

1.2.1 二维数字图像相关方法

二维数字图像相关方法是一种使用单个相机测量平面物体面内变形的测量方法。二维数字图像相关方法的测量装置非常简单，如图1.1所示，只需要单个相机记录试样在变形前后的图像即可通过模板匹配计算出试样在变形过程中的变形信息。测量过程中，散斑是变形的载体，对变形测量的精度起着至关重要的作用。目前的制斑方法有很多，常用的包括喷漆[14]和喷枪[44]的方法。一般首先在物体表面喷一层白漆，然后通过喷漆或喷枪喷上黑色的斑点。与喷漆不同的是，喷枪可以通过气压阀精确地控制气压，因此喷出散斑颗粒的大小比较统一。近年来，研究者们提出了数字散斑转印[45]的方法，将电脑生成的散斑场通过转印的方式直

接复制到物体表面,这种方法可以大大提高测量的一致性和正确性。目前的转印方法包括水转印[46]、热转印[47]、丝网印刷[48]等。



图 1.1 二维数字图像相关测量装置。

二维数字图像相关中模板匹配的原理如图 1.2 所示,为了确定物体表面每个点的变形情况,需要在参考图像中定义模板并在变形图中搜索与其最相似的模板。为了搜索最相似的模板,需要预先定义相关函数[49][50],目前常用的相关函数有互相关(Cross correlation, CC)函数和最小平方距离(Sum-Squared difference, SSD)函数两类。考虑到各种相关函数的抗干扰能力和精度,目前零均值归一化最小平方距离(Zero-mean normalized sum of squared difference, ZNSSD)相关函数和参数化最小平方距离(Parametric sum of squared difference, PSSD_{ab})相关函数是两种最为推荐使用的相关函数。相关函数确定之后,一般通过非线性优化算法对相关函数取极值来获得亚像素精度,目前常用的算法有 Bruck 等[51]提出的牛顿拉普森(Newton-Raphson, NR)算法和计算机视觉领域提出的反向组合高斯牛顿(Inverse compositional Gauss-Newton, IC-GN)算法[52]。

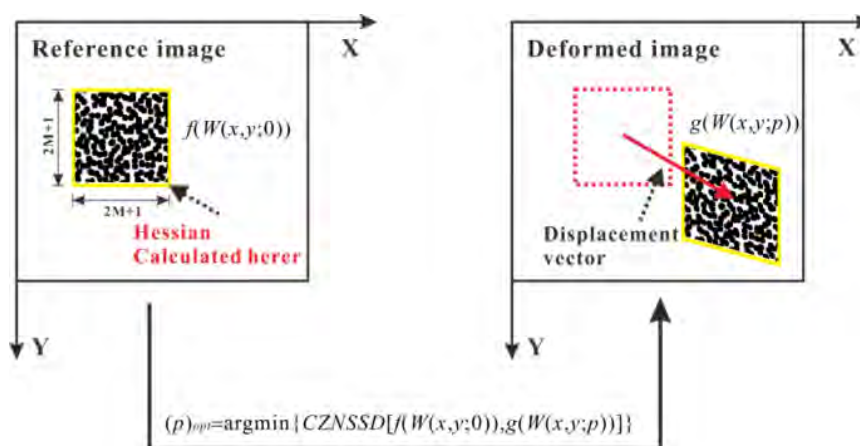


图 1.2 二维数字图像相关模板匹配示意图。

与其他光学测量方法相比,二维数字图像相关测量方法有如下几个优势:

- 装置相对简单且易于搭建;
- 数据采集是全数字化的,使用 CCD 相机和 CMOS 相机即可记录图像;
- 只需要使用普通的冷光进行照明,不需要相干光照明;
- 对环境震动的要求很低;
- 可以测量大变形;

- 可以实现全场变形测量；
- 随着图像传感技术的发展，其测量分辨率越来越高；
- 随着计算机技术的发展，其计算效率越来越快。

1.2.2 三维数字图像相关方法

基于双目立体视觉原理，三维数字图像相关方法使用两台相机实现曲面或平面物体的三维形貌和变形测量。三维数字图像相关典型的测量装置如图 1.3 所示，两个相机被固定在刚性杆上，刚性杆则被安装于三脚架上，通过调节三脚架来调整测量高度和测量距离。



图 1.3 三维数字图像相关测量装置。

为了实现三维数字图像相关测量，相机标定是一个必不可少的步骤，通常使用高精度平面标定板来完成测量系统的标定。需要标定的系统参数包括相机的内参和两个相机之间的相对外参，Zhang[53]提出的平面标定法可以同时完成相机内参和外参的标定。图 1.4 为双目立体视觉测量的原理图，对于左右图像上匹配的两点 m_1 和 m_2 ，若其图像坐标已知的话，基于标定参数即可对其实现三维重构从而计算出其空间点 M 的三维坐标 (X, Y, Z) 。左右图像上对应点的坐标可以通过模板匹配求得。

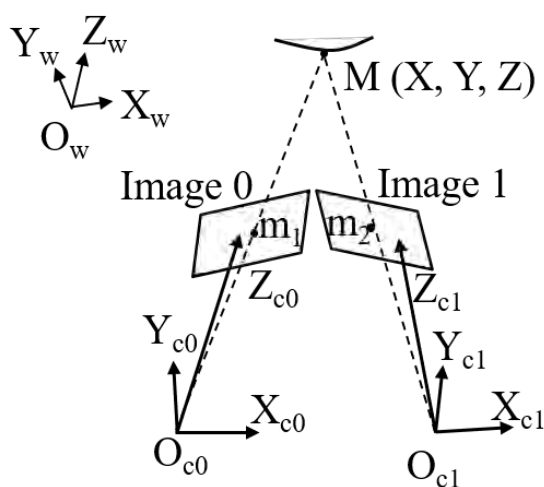


图 1.4 三维数字图像相关测量原理。

对被测物体变形前后的三维坐标进行重构得到坐标 $(X_{reference}, Y_{reference}, Z_{reference})$ 和坐标 $(X_{deformed}, Y_{deformed}, Z_{deformed})$ ，通过坐标相减的方法即可直接计算出物体表面每一个点的三维位移：

$$\begin{cases} u = X_{deformed} - X_{reference} \\ v = Y_{deformed} - Y_{reference} \\ w = Z_{deformed} - Z_{reference} \end{cases} \quad (1.1)$$

基于重构的三维坐标和计算出的三维位移，可以通过文献[14]中提出的方法计算局部应变。测得了物体的三维形貌后，物体上每个点的法线方向就可以确定下来。使用最小二乘法对每个点周边的数据进行平面拟合，每个点周边的局部表面就可以定义下来。根据局部表面和世界坐标系 X 的方向，就可以定义局部坐标系。然后，将该点三个方向上的位移都往该局局部笛卡尔坐标系上进行投影。对投影后的三维位移通过最小二乘的方法即可求得局部应变。

与二维数字图像相关方法相比，三维数字图像相关测量方法有如下几个优势：

- 可以测量完整的三维形貌和三维位移；
- 不仅可以测量平面物体，还可以测量曲面物体；
- 只要物体在景深范围内，可以测量很大的三维变形；
- 通过高速相机同步，可以测量瞬态三维变形；
- 通过刚性固定，标定后的系统可以直接带到现场测量，现场不需要标定。

1.2.3 数字图像相关测量中现存问题

虽然数字图像相关方法在科研和工程领域已经得到了广泛的使用，但其中仍然存在以下一些问题需要解决：

(1) 与应变片技术相比，数字图像相关的应变测量精度仍然是不够的。目前普遍认为应变片的应变测量精度可达 1 微应变。对于数字图像相关方法，考虑到离面位移的影响，二维数字图像相关的应变测量精度可达 100 微应变，三维数字图像相关的应变测量精度可达 50 微应变。达到这样的精度也是需要较好的实验环境、较优的散斑场、较熟练的实验人员等一系列条件下才能满足。与常规使用的电测应变技术相比，数字图像相关的应变测量精度仍然是不够的。

(2) 由于受到散斑制备质量[26][27][28]、计算参数选取[29][30][31]、被测力学量的计量溯源[54]等诸多因素的影响和制约，数字图像相关方法测量结果的一致性和正确性难以得到保证。目前的散斑制作方法在每次实验中制作的散斑图案都不同，无法保证测量结果的一致性。同时，目前数字图像相关计算过程中有很多计算参数需要选取，参数选取的不同对计算结果影响非常大。更重要的是，对于数字图像相关这种全场变形测量，目前没有可用的计量方法，无法考核数字图像相关测量的正确性。

(3) 虽然基于子区的亚像素位移算法相比于基于有限元的全局计算方法计算效率更高[55]，但是仍然难以满足实时测量的需求[56]，尤其是对于高速动态测量[57]。对于 CPU 单线程计算，文献中报道的最快的计算速度在 5000 个点每秒左右[58]。为了满足实时测量的需求，必须大幅度提高数字图像相关的计算效率。实时数字图像相关的实现，则有利于该方

法在科研和工程领域的进一步推广。

(4) 对于一系列特殊的应用场合, 目前商业测量系统的适用性仍然不足。目前市面上的商业测量系统主要包括使用单相机的二维数字图像相关系统[59]和使用双相机的三维数字图像相关系统[14]。尽管商业测量系统已经可以满足很多测试需求, 但对于一系列的特殊应用场合, 其适用性仍然有待提高, 如复杂环境下的测量[60][61][62]、多尺度测量[63][64]、大型结构的测量[65][66]等。

上述问题的存在, 不仅阻碍了数字图像相关方法的推广, 且已经成为了该方法在工业化进程中的瓶颈。

1.3 主要研究内容

本文的研究内容主要围绕章节 1.2.3 中数字图像相关测量的现存问题展开, 从数字图像相关计算精度、计算效率、系统标定三个角度出发, 以实现高精度、实时数字图像相关变形测量为最终目标。

论文第二章从数字图像相关方法中的模板匹配基本原理出发, 介绍了一种高精度高效率鲁棒性强的反向组合高斯牛顿算法, 分析了该算法的抗噪声能力, 并通过理论分析给出了该算法在噪声条件下的理论误差公式。同时, 对比了反向组合高斯牛顿算法与常规使用的牛顿拉普森算法的抗噪声性能, 从理论、数值模拟、实验三个角度进行了对比分析, 证明了反向组合高斯牛顿算法的抗噪声能力。最后, 给出了新的数字图像相关理论误差公式, 与 Sutton 等[14][67]提出的理论误差公式相比, 该公式不包含噪声引入误差。

论文第三章基于高效率的反向组合高斯牛顿算法与 CPU 并行计算, 提出了一种基于种子点扩散的并行计算方法, 实现了二维数字图像相关的实时测量, 并将其应用于土木工程准静态实验测量和实验室地震实时加载控制。将提出的并行算法在 4 核 8 线程的 CPU 上运行, 计算效率比可靠性导向算法[68]高 6-7 倍。同时, 将基于种子点扩散的并行计算方法扩展到了三维数字图像相关测量, 在子线程中逐步实现左相机图像匹配、右相机图像匹配与三维重构, 实现了三维数字图像相关的实时测量, 并将其用于人体脉搏测量。最后, 提出了一种用于平面物体的高效立体匹配算法, 与常规的立体匹配算法相比[69], 计算效率提高了 20 倍以上。

论文第四章为实现大视场条件下三维数字图像相关高精度变形测量, 提出了一种基于散斑特征匹配的大视场外参实时标定方法。将散斑匹配和经典的相对定向算法[70]相结合, 实现大视场条件下相机外参的实时标定, 且不需要额外的硬件辅助。该方法利用左右相机图像中点的匹配来建立极线约束, 从而标定出相机之间的相对外参。散斑匹配则可以保证左右相机图像匹配的高精度。通过四点弯实验和混凝土柱压缩实验证明了该方法的有效性和可行性。最后, 将提出的大视场标定方法用于球墨铸铁圆柱形容器跌落实验, 测量得到了容器跌落过程中的全场应变信息。

论文第五章基于散斑自标定方法和反射式[71]的单相机三维成像装置, 提出了一种高精度实时自标定单镜头三维视频引伸计。单相机三维成像装置的使用, 消除了离面位移对测量的影响且不需要严格的相机同步。同时, 该方法使用参考散斑图像对三维成像系统的内外参数进行标定, 不需要使用任何标定物。以相机及镜头的出厂内参作为相机内参的初值, 并通过散斑匹配和相对定向算法计算外参初值, 最后通过光束平差优化得到优化的相机内参、左右半图像外参以及空间点三维坐标。最后, 基于高效率的立体匹配算法, 实现了铝合金拉伸实验的高精度、实时应变测量。

论文第六章为了突破数字图像相关应变测量分辨率的瓶颈, 基于相机阵列与图像拼接算法, 提出了一种基于相机阵列的高精度应变测量方法。为了实现相机阵列亚像素图像拼接,

提出了一种基于标定的图像拼接方法，基于高精度内参标定和数字散斑场外参标定，实现了亚像素级别的图像拼接并成功获得了一亿像素散斑图像。该方法不需要重叠区域的特征或灰度匹配，可以最大限度的提高图像分辨率的利用率。同时，为了减小拼接对高精度变形测量的影响，提出了一种亚像素位移场拼接方法，继而使用最小二乘法计算应变，实现了全场高精度应变测量。最后，通过静态噪声分析和四点弯实验证明了所提出方法的可行性和有效性。

最后一章为本论文的总结与展望。

第二章 高精度高效率鲁棒性强的反向组合高斯牛顿算法

高斯牛顿算法

2.1 反向组合高斯牛顿算法

无论是对于二维数字图像相关(Digital image correlation, DIC)还是三维数字图像相关,图像匹配都是其中非常重要的一步。在二维数字图像相关中,变形后的图像需要和变形前的图像进行匹配,也即为时序匹配。在三维数字图像相关中,不仅需要进行时序匹配,还需要进行左右图像的立体匹配。

数字图像相关中目前常用的图像匹配算法包括经典的牛顿拉普森(Newton-Raphson, NR)算法(后面简称正向算法)[51]和反向组合高斯牛顿(Inverse compositional Gauss-Newton, IC-GN)算法(后面简称反向算法)[52],如图2.1(a)所示。反向算法是由美国卡耐基梅隆大学的Baker和Matthews提出[72],其目的是为了消除Lucas-Kanade算法[73]中的冗余计算,即Hessian矩阵的重复计算。Sutton等在其专著[14]中曾对反向算法在数字图像相关中的使用做了一些介绍,但是并不详细。潘兵等对比了该算法与正向算法的计算效率[59],并讨论了该算法的收敛条件[74]。高越等分析了该算法在一阶形函数和二阶形函数下的表现[69]。随后,Bai等提出了一种改进的二阶形函数并将其用于反向算法[75]。蒋震宇等[76]将反向算法与FFT-CC算法相结合,提出了一种基于GPU并行计算的路径无关算法。为了提高反向算法对环境光的抗干扰性能,Xu等提出使用基于灰度梯度的归一化相关准则[77]。同时,Simoncic等提出在反向算法中使用迭代参数化的平方和相关准则[78]。

图2.1为反向算法和正向算法的示意图。其中, $W(x,y;p)$ 是用于描述目标子区与参考子区之间的形函数, x,y 是指相对于模板中心的局部坐标, p 是指目标子区相对于参考子区的变形向量, Δp 是指每次迭代的变形增量。在反向算法的每次迭代中,增量的求解首先施加于参考图像上,然后将增量矩阵求逆后施加在目标模板的变形上,迭代过程中的Hessian矩阵保持不变。因此与正向算法相比,反向算法具有更快的计算速度。

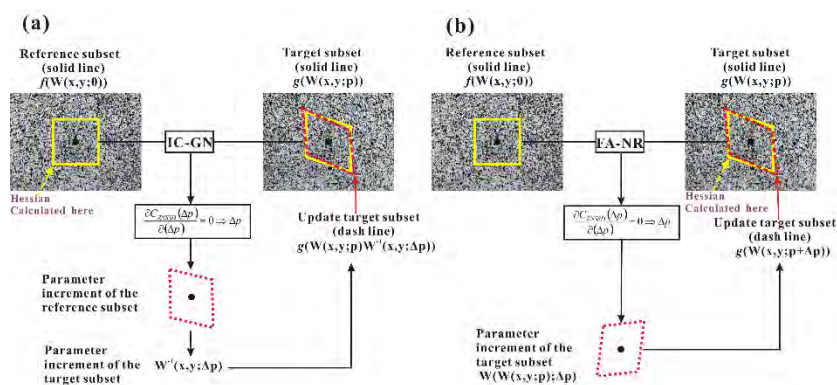


图 2.1 图像匹配算法: (a)反向组合高斯-牛顿算法和(b)正向迭代牛顿拉普森算法。

尽管反向算法已经得到了广泛的使用，但是其抗噪声性能[79]仍然是一个有趣但仍待解决的问题。抗噪声性能是反映算法鲁棒性非常重要的一个方面，抗噪声性能的分析有利于加深人们对反向算法的精度、效率、鲁棒性三个方面的全面理解。

2.2 考虑噪声条件下的理论误差分析

为了便于分析，一维的平方和准则被用于推导反向算法的理论误差公式。将图像噪声[67][80][81]细分为参考图噪声和变形图噪声，在一维尺度下推导了使用线性插值的反向算法的理论误差模型。假设参考图与变形图上的噪声服从高斯分布，参考图上有均值为0、方差为 σ_1^2 的高斯白噪声 ξ_1 ，变形图上有均值为0、方差为 σ_2^2 的高斯白噪声 ξ_2 。这里对图像点噪声有一点假设：图像上每个像素点上的噪声是不相关的。为求 u 的最优值，需要使用迭代算法：

$$(u)_{opt} = \arg \min \sum_{i=-M}^M [f(x_i) - g(x_i + u)]^2 \quad (2.1)$$

其中， $f(x_i)$ 指参考图坐标 (x_i) 的灰度； $g(x_i + u)$ 指变形图坐标 $(x_i + u)$ 的灰度； u 为变形图模板相对于参考图模板的变形。

2.2.1 反向算法理论误差分析

下面将给出反向算法误差理论模型的推导过程。反向算法的迭代形式为

$$u' = u_0 - \Delta u \quad (2.2)$$

其中， Δu 为变形增量； u_0 为真实的位移； u' 为迭代之后的计算位移。根据公式(2.1)和公式(2.2)可得

$$\frac{\partial (\sum_{i=-M}^M [f(x_i + \Delta u) - g(x_i + u_0)]^2)}{\partial (\Delta u)} = 0 \quad (2.3)$$

忽略 $f(x_i + \Delta u)$ 对 Δu 泰勒展开时的高阶项，可以得到

$$f(x_i + \Delta u) = f(x_i) + \Delta u f'_x \quad (2.4)$$

那么可以将公式(2.3)写成如下形式：

$$\Delta u = \frac{\sum_{i=-M}^M [g(x_i + u_0) - f(x_i)] f'_x}{\sum_{i=-M}^M (f'_x)^2} \quad (2.5)$$

其中 f'_x 为参考图上点 (x_i) 处的一阶灰度梯度。

由于图像上存在噪声，可以将公式(2.5)写成

$$\Delta u = \frac{\sum_{i=-M}^M [g'(x_i + u_0) - f'(x_i)] f'_x}{\sum_{i=-M}^M (f'_x)^2} \quad (2.6)$$

后面会证明反向算法的抗噪声能力与插值算法的选取无关，主要与灰度梯度算子的选取有关，所以为了简便，这里将 $g(x_i + u_0)$ 用线性插值表达， f'_x 也先用简单的前插来表达，可得

$$f'(x_i) = f(x_i) + \xi_1(x_i) \quad (2.7)$$

$$f'_x = f(x_{i+1}) + \xi_1(x_{i+1}) - f(x_i) - \xi_1(x_i) \quad (2.8)$$

$$g'(x_i + u_0) = g(x_i) + \xi_2(x_i) + u_0[g(x_{i+1}) + \xi_2(x_{i+1}) - g(x_i) - \xi_2(x_i)] \quad (2.9)$$

将公式(2.7)(2.8)(2.9)带入公式(2.6)中可得展开式为

$$\Delta u = \frac{\sum_{i=-M}^M [g(x_i) + \xi_2(x_i) + u_0(g(x_{i+1}) + \xi_2(x_{i+1}) - g(x_i) - \xi_2(x_i)) - f(x_i) - \xi_1(x_i))][f(x_{i+1}) + \xi_1(x_{i+1}) - f(x_i) - \xi_1(x_i)]}{\sum_{i=-M}^M [f(x_{i+1}) + \xi_1(x_{i+1}) - f(x_i) - \xi_1(x_i)]^2} \quad (2.10)$$

根据公式(2.10)，可以计算 Δu 的期望和方差为

$$E(\Delta u) \cong \frac{\sum_{i=-M}^M [h(x_i)f_x]}{\sum_{i=-M}^M (f'_x)^2} + \frac{(2M+1)\sigma_1^2}{\sum_{i=-M}^M (f'_x)^2} \quad (2.11)$$

$$Var(\Delta u) \cong \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{\sum_{i=-M}^M (f'_x)^2} \quad (2.12)$$

其中的 $h(x_i)$ 为插值误差，其可被写为

$$h(x_i) = g'(x_i + u_0) - f'(x_i) \quad (2.13)$$

根据公式(2.11)可知，均值误差有两项。第一项为插值误差，可以通过选择合适的插值方法来降低。第二项是噪声引入误差。通过观察公式(2.10)可以进一步知道，噪声引入误差的原因在于

$$E(\xi_1(x_i)^2) = Var(\xi_1(x_i)) + E(\xi_1(x_i))^2 = Var(\xi_1(x_i)) = \sigma_1^2 \quad (2.14)$$

若要消除图像噪声对均值误差的影响，最根本的方法就是避开相同图像点噪声的平方项。为此，在反向算法中，可以使用不包含 $f(x_i)$ 的灰度梯度算子（如光流[82]中的中心差分算子

$[\frac{1}{12}, -\frac{8}{12}, 0, \frac{8}{12}, -\frac{1}{12}]$ ）。使用不包含 $f(x_i)$ 的灰度梯度算子，可以避免 $\xi_1(x_i)^2$ 项，因此可以从根本上消除噪声引入误差。包含噪声项的中心差分算子可写为

$$f'_x = \frac{1}{12}f(x_{i-2}) + \frac{1}{12}\xi_1(x_{i-2}) - \frac{8}{12}f(x_{i-1}) - \frac{8}{12}\xi_1(x_{i-1}) + \frac{8}{12}f(x_{i+1}) + \frac{8}{12}\xi_1(x_{i+1}) - \frac{1}{12}f(x_{i+2}) - \frac{1}{12}\xi_1(x_{i+2}) \quad (2.15)$$

将公式(2.7)(2.9)(2.15)带入公式(2.6)，并重新计算 Δu 的期望和方差为

$$E(\Delta u) \cong \frac{\sum_{i=-M}^M [h(x_i)f_x]}{\sum_{i=-M}^M (f'_x)^2} \quad (2.16)$$

$$Var(\Delta u) \cong \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{\sum_{i=-M}^M (f'_x)^2} \quad (2.17)$$

从公式(2.16)可知， Δu 的期望中已不再包含噪声引入项。那么最终反向算法的理论误差公式为

$$E(u') \cong u_0 - \frac{\sum_{i=-M}^M [h(x_i) f_x]}{\sum_{i=-M}^M (f_x')^2} \quad (2.18)$$

$$Var(u') \cong \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{\sum_{i=-M}^M (f_x')^2}, \sigma_{u'} = \sqrt{Var(u')} \quad (2.19)$$

从公式(2.18)中可以看出反向算法的噪声引入误差被消除了, 尽管其均值误差仍然受到灰度插值误差和灰度梯度平方和[80]的影响。从公式(2.19)中可以发现, 与正向算法相比, 反向算法的标准差没有发生明显变化, 其准度并没有得到提高。

2.2.2 正反向算法噪声鲁棒性的比较

普遍认为, 在 DIC 测量中, 均值误差共有两项。第一项为插值偏差, 其主要由插值的灰度值与真实的灰度值之间的差别造成的。第二项为噪声引入误差, 其对精度有很大的影响。这里值得指出的是, 插值偏差也会受到图像噪声的影响。

从章节 2.2.1 中可以看到, 反向算法中的噪声引入误差是可以消除的。这是因为在反向算法中, 因计算变形增量引起的一阶泰勒展开作用于整像素点。值得一提的是, 最近 Cheng 等[83]通过理论推导发现, 在正向算法中, 如果在计算变形图梯度时, 先计算整像素位置的灰度梯度, 然后用插值的方法对亚像素位置的梯度进行插值, 正向算法的噪声引入误差虽然存在, 但是其数值变小很多, 乃至可以忽略不计。这样的操作会使得正向算法因为做更多的插值计算而使其计算效率会变得更慢。与正向算法相比, 反向算法具有精度和噪声鲁棒性的双重优势, 且其噪声引入误差的消除从理论上来说是非常直接的。

2.3 数值模拟及实验验证

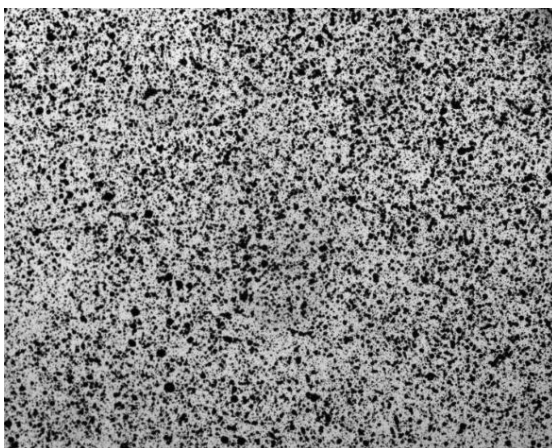


图 2.2 实际散斑图。

为了定量评估反向算法的抗噪声性能及其与正向算法的性能对比, 首先采用散斑图频域平移的模拟实验来进行验证。图 2.2 为散斑频域平移实验中使用的 8 比特散斑图, 散斑图的大小为 1280×1024 像素, 散斑图拍摄于一次实验。在第一组图片中, 通过 MATLAB 使用

频域平移的方法对散斑图进行平移[84]，每次沿横向平移 0.05 像素，共平移 20 次。对于第二组至第六组图片，通过 MATLAB 对第一组图片分别加 8 比特灰度等级的 1%噪声、3%噪声、5%噪声、8%噪声和 10%噪声来生成。计算时，采用 31×31 像素的模板，共有 22704 个均匀分布的点（每个计算点之间间隔 5 个像素）。

为了定量评估正向算法与反向算法，使用均值误差与标准差[25]来对两种算法的精度进行评估。均值误差的公式定义如下：

$$E_u = u_{mean} - u_{imp} \quad (2.20)$$

其中 $u_{mean} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i$ 代表 N 个计算点的平均位移， u_{imp} 代表真实施加的亚像素位移。位移标准差的公式如下：

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (u_i - u_{mean})^2} \quad (2.21)$$

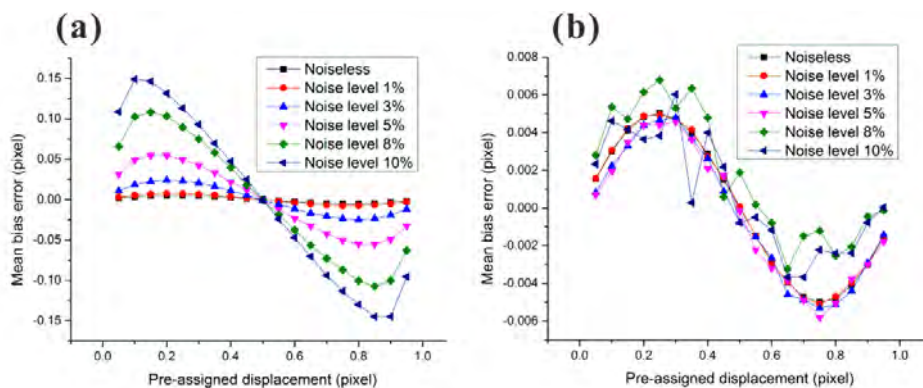


图 2.3 (a)正向算法和(b)反向算法在不同噪声等级下的均值误差。

图 2.3(a)与图 2.3(b)分别为使用了相同的双三次样条插值下的正向算法与反向算法的均值误差。从图 2.3 中可以得到如下结论：(1)正向算法的均值误差随着噪声等级的提高而增大，当噪声从 1%增长到 10%时，最大误差从 0.00522 像素增加到 0.148865 像素；(2)尽管噪声等级增加了，反向算法的均值误差几乎保持不变，只受到插值误差的影响，最大的误差也不超过 0.00678 像素。图 2.3(b)同时也表明灰度插值误差也受到图像噪声的影响，但与噪声引入误差相比非常小。图像存在噪声时，使用相同的双三次样条插值算法，反向算法的均值误差显著降低。

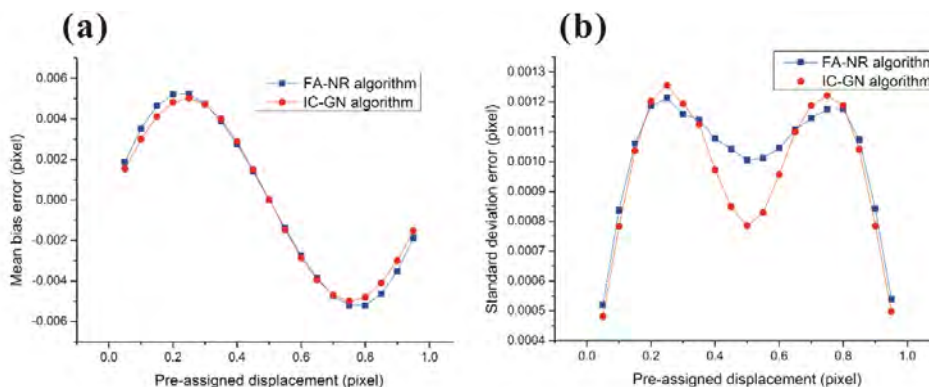


图 2.4 正向算法与反向算法在噪声等级为 0 时的(a)均值误差和(b)标准差。

图 2.4 与图 2.5 分别显示了正向算法与反向算法在噪声等级为 0 和 3% 的均值误差与标准差。其中，图 2.4(a) 为噪声等级为 0 时正向算法与反向算法的均值误差，图 2.4(b) 为噪声等级为 0 时正向算法与反向算法的标准差，图 2.5(a) 为噪声等级为 3% 时正向算法与反向算法的均值误差，图 2.5(b) 为噪声等级为 3% 时正向算法与反向算法的标准差。对于无噪声图像，两种算法的均值误差和标准差几乎是保持一致的，其中微小的差别是由于两种算法实现上的不同造成的。结果证明对于无噪声图像两种算法的精度是相当的。当图像噪声为 3% 时，正向算法与反向算法的测量标准差差不多，但是两种算法的均值误差有非常大的差别，反向算法的均值误差要远远小于正向算法的均值误差。通过实验结果可知，反向算法的抗噪声能力比正向算法更好且选择合适的梯度算子时反向算法没有噪声引入误差。

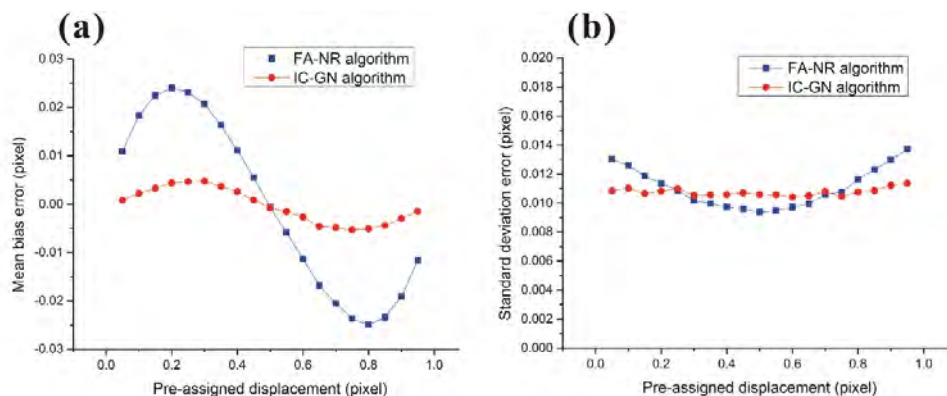


图 2.5 正向算法与反向算法在噪声等级为 3% 时的(a)均值误差和(b)标准差。

为了进一步比较正向算法与反向算法的噪声鲁棒性，使用铝制的悬臂梁实验来进行验证。图 2.6 为试样的几何尺寸，试样的宽度为 78 毫米，高度和厚度分别为 15 毫米和 2 毫米。为了增加图像的噪声等级，使用一个低质量的相机进行图像采集，变形前后采集了 2048×2048 像素 8 比特灰度的参考图和变形图。在数字图像相关分析中，选择了如图 2.6 所示的矩形测量区域进行计算。计算模板的大小是 51×51 像素，计算的步长是 5 个像素，共计 16020 (267×60) 个计算点。

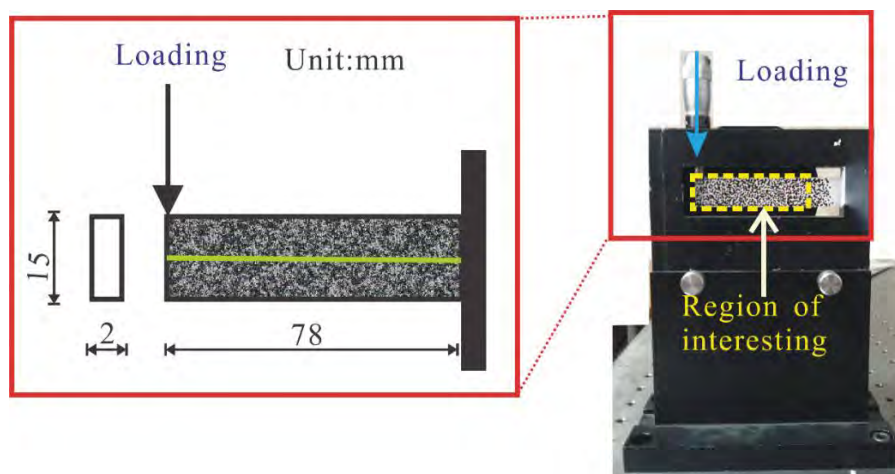


图 2.6 悬臂梁实验图。

图 2.7(a) 和 2.7(b) 为了使用了相同的双三次样条插值时使用正向算法和反向算法计算得到的纵向位移场。另外，图 2.7(c) 和 (d) 中为计算的相关系数分布图。从图中明显可以看到绝大多数相关系数的值都大于 0.96，证明了两种算法的收敛性。从图 2.7(a) 和 2.7(b) 中可以看到反向算法计算的位移场比正向算法计算的位移场更加平滑。图 2.7(a) 的分布类似于一个接

近一个像素宽度的台阶。由于真实的位移场应该是平滑的，实验结果清楚地反映了正向算法与反向算法抗噪声能力上的差别。

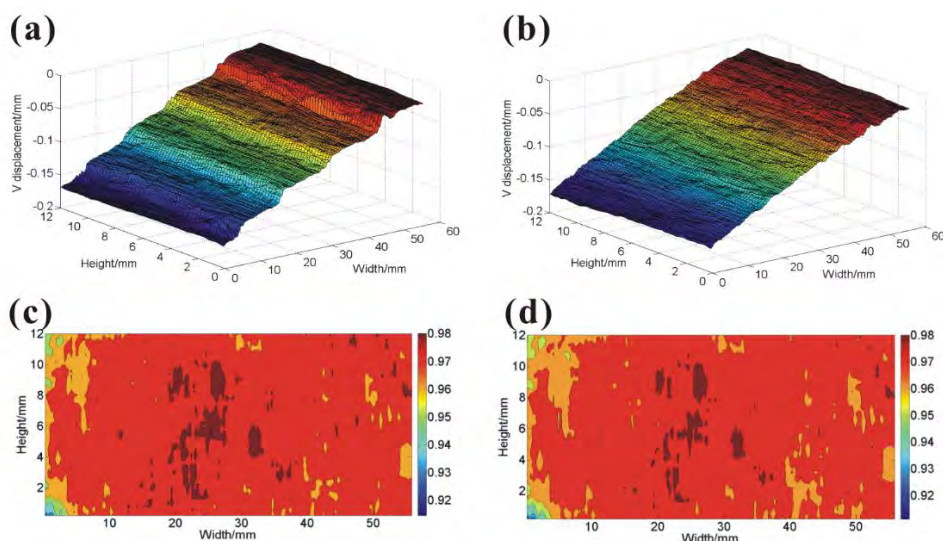


图 2.7 使用正向算法和反向算法时的悬臂梁测量结果：(a)正向算法计算的 V 场；(b)反向算法计算的 V 场；(c)正向算法计算的相关系数分布；(d)反向算法计算的相关系数分布。

2.4 数字图像相关方法理论误差公式

Sutton 等在其专著[14](章节 5.7)中曾分析并给出了数字图像相关方法的理论误差公式，其分析主要针对的是正向算法，并没有对反向算法进行理论误差分析。对于专著[14]中给出的公式，均值误差共有两项，分别是插值偏差与噪声引入误差。与 Sutton 等专著中给出的理论误差公式相比，反向算法理论误差公式中没有噪声引入误差，而只有插值偏差。为此，反向算法的理论误差公式应该作为数字图像相关方法新的理论误差公式得到推广，如公式(2.18)和(2.19)。值得说明的是，该公式不仅适用于一维尺度，同样适用于二维尺度和三维尺度（即数字体图像相关方法[85][86]）。

公式(2.18)中的插值误差的一般形式可以由频域的方法[87][88]推导得到。理论误差公式(2.18)中均值误差不包含噪声引入项，只有插值误差项。当选择合适的插值算法，如双五次 B 样条插值时，数字图像相关的插值误差非常小。在未来的研究中，数字图像相关测量标准差的减小将会是一个研究目标。

2.5 小结

本章分析了反向算法在噪声条件下的理论误差公式。理论分析结果表明反向算法计算位移的均值误差中不包含噪声引入误差。同时，将反向算法与正向算法进行了抗噪声能力的对比，证明了反向算法在计算效率和噪声鲁棒性上的全面优势。最后，通过与 Sutton 等提出的数字图像相关理论误差公式比较，给出了全新的数字图像相关理论误差公式，该理论误差公式应该作为数字图像相关新的理论误差公式。反向算法的使用使得数字图像相关计算效率得到了提升，这使得实时数字图像相关成为可能，反向组合高斯牛顿算法在数字图像相关中应该得到推广。

第三章 基于 CPU 并行计算的实时数字图像 相关测量方法

3.1 引言

随着数字图像相关(Digital image correlation, DIC)测量技术的发展,该技术不仅被用于科研领域,同时也越来越多地被用于工业测量[42]和医学测量[38]中。在工业测量和医学测量中,数字图像相关技术的计算效率就显得尤为重要,需要满足实时测量的要求。为了提高数字图像相关的计算效率,研究者们已经做了大量的工作。潘兵等[25]通过对三种亚像素位移计算方法的比较,指出曲面拟合的方法具有最高的计算效率。基于全局的求和表,黄建永等[34]提出使用一种快速的递归方法来提高数字图像相关的计算效率。为了减少图像灰度插值的计算量,潘兵和李凯[89]提出使用预先计算的全局插值查找表。周轶昊等[90]提出使用精确的初值传递策略来提高数字图像相关的计算效率。Tong 等[36]对数字图像相关方法中多种迭代策略进行了综述,说明了反向组合式的迭代策略具有更高的计算效率。潘兵等[58]将插值查找表、质量导向算法以及反向组合高斯牛顿算法相结合,提出了一种没有冗余计算的快速、高精度数字图像相关方法。同时,为了进一步提高整像素搜索的效率,张东升等提出使用粒子群优化算法和梯度下降法相结合的方法[91],薛远和张青川等提出一种搜索步长大于一个像素的并行整像素搜索方法[92]。以上的研究主要从减少算法冗余计算的角度来提高计算效率,对于数字图像相关这种逐块处理的技术,使用并行计算同样可以大幅度提高其计算效率。

作者等[79]和潘兵等[93]分别独立提出了一种基于种子点扩散的并行计算方法,结合 CPU 并行计算,与可靠性导向算法[68]相比其计算效率提高了 7 倍左右。蒋震宇和钱克矛等提出将基于快速傅里叶变换的初值计算方法与反向组合高斯牛顿算法相结合,基于 GPU 并行计算[94],大大提高了数字图像相关的计算效率,其最新研究[95]表明基于 CPU 和 GPU 的混合并行算法已经实现了每秒 100 万个点的快速计算。本章节基于提出的基于种子点扩散的并行计算方法与反向组合高斯牛顿算法,主要介绍实时数字图像相关[97][97]测量方面的工作。

3.2 反向组合高斯牛顿算法中的查找表

第二章中已经提到过,与牛顿拉普森(Newton-Raphson, NR)算法(后面简称正向算法)相比,反向组合高斯牛顿(Inverse compositional Gauss-Newton, IC-GN)算法(后面简称反向算法)具有更高的计算效率。其主要原因在于反向算法中的 Hessian 矩阵只需要在参考图中计算,且迭代过程中保持不变。因为对照明的线性变化不敏感,在反向算法中一般使用零均值归一化最小平方距离(Zero-mean normalized sum of squared difference, ZNSSD)相关函数,其形式如下:

$$C_{ZNSSD} = \sum_{y=-M}^M \sum_{x=-M}^M \left[\frac{f(W(x,y;\Delta p)) - f_m}{f_s} - \frac{g(W(x,y;p)) - g_m}{g_s} \right]^2 \quad (3.1)$$

其中 f 和 g 代表像素点 (x,y) 在参考图和变形图模板中的灰度值, f_m 和 g_m 代表参考图和变形图模板中的平均灰度, M 是指模板的宽度, $W(x,y;p)$ 用于表示变形模板相对于参考模板的形函数。在数字图像相关中, 一阶形函数和二阶形函数是最常用的两种形函数。

在计算过程中, 变形增量向量 Δp 可以通过迭代求解, 其迭代公式如下:

$$\begin{aligned} \Delta p &= -H^{-1} \times \sum_{y=-M}^M \sum_{x=-M}^M \left\{ \left(\nabla f \frac{\partial W}{\partial p} \right)^T \left[f(W(x,y;0)) - f_m - \frac{f_s}{g_s} g(W(x,y;p)) + \frac{f_s}{g_s} g_m \right] \right\} \\ H &= \sum_{y=-M}^M \sum_{x=-M}^M \left\{ \left(\nabla f \frac{\partial W}{\partial p} \right)^T \left(\nabla f \frac{\partial W}{\partial p} \right) \right\} \end{aligned} \quad (3.2)$$

其中 $\nabla f = ((\partial f / \partial x), (\partial f / \partial y))$ 是参考图模板中每个点的灰度梯度。

计算完变形增量之后, 因为增量的变换是在参考图上计算的。因此, 需要对其求逆并施加在变形图的变形量上。如果使用一阶形函数的话, 这一操作过程的公式如下:

$$\begin{aligned} W(x,y;p) &\leftarrow W(x,y;p) \circ W^{-1}(x,y;\Delta p) \\ &= \begin{bmatrix} 1+u_x & u_y & u \\ v_x & 1+v_y & v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1+\Delta u_x & \Delta u_y & \Delta u \\ \Delta v_x & 1+\Delta v_y & \Delta v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \end{aligned} \quad (3.3)$$

其中的 u, v 为位移值, u_x, u_y, v_x, v_y 为位移梯度。迭代的过程会一直持续下去直到满足预先设定的收敛条件。在本文中, 使用了文献[74]中推荐的收敛条件 $\|\Delta p\| \leq 0.01$, 其中

$$\|\Delta p\| = \sqrt{(\Delta u)^2 + (\Delta u_x \times M)^2 + (\Delta u_y \times M)^2 + (\Delta v)^2 + (\Delta v_x \times M)^2 + (\Delta v_y \times M)^2} \quad (3.4)$$

3.2.1 参考图不变量查找表

在反向算法中, 除了 Hessian 矩阵在迭代过程中保持不变, 其实还有很多其他参数也是保持不变的, 这些参数都只与参考图像有关。如公式(3.5)所示, 其中包括:

$$\begin{aligned} \Delta p &= -H^{-1} \times \sum_{y=-M}^M \sum_{x=-M}^M \left\{ \left(\nabla f \frac{\partial W}{\partial p} \right)^T [f(W(x,y;0)) - f_m] \right\} \\ &\quad - H^{-1} \times \frac{f_s}{g_s} \sum_{y=-M}^M \sum_{x=-M}^M \left\{ \left(\nabla f \frac{\partial W}{\partial p} \right)^T [g_m - g(W(x,y;p))] \right\} \\ \left(\nabla f \frac{\partial W}{\partial p} \right)^T &= \text{Invariant} \\ H^{-1} &= \text{Invariant} \\ H^{-1} \times \sum_{y=-M}^M \sum_{x=-M}^M \left\{ \left(\nabla f \frac{\partial W}{\partial p} \right)^T [f(W(x,y;0)) - f_m] \right\} &= \text{Invariant} \\ f_s &= \sqrt{\sum_{y=-M}^M \sum_{x=-M}^M [f(x,y) - f_m]^2} = \text{Invariant} \end{aligned} \quad (3.5)$$

这些不变量在采集参考图之后就可以预先计算好并创建查找表。其中的后三项占用很少

的内存，对于第一项雅可比矩阵则需要占据较多的内存，但是与现在的电脑内存相比，其占据的内存仍然是非常小的。另外，为了节省计算时间，将 f_s / g_s 放在求和计算之外进行计算，这样可以大大减少乘法的计算量。

3.2.2 双三次 B 样条插值查找表

在反向算法中，计算每一幅变形图时的灰度插值占用了很大一部分计算时间。为了减少这一部分的计算时间，潘兵和李凯[89]提出使用预先计算的全局插值查找表，大大减少了插值所用的计算时间。但是，文献[89]中使用的是双三次插值。与双三次插值相比，双三次 B 样条插值具有更高的插值精度[84][87][97]。为了兼顾计算精度和计算效率，本文提出使用双三次 B 样条插值查找表。

$$g(x + \Delta x, y + \Delta y) = \begin{bmatrix} \Delta y^3 & \Delta y^2 & \Delta y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x^3 \\ \Delta x^2 \\ \Delta x \\ 1 \end{bmatrix} \quad (0 \leq \Delta x \leq 1), (0 \leq \Delta y \leq 1) \quad (3.6)$$

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} = M_B D M_B^T \quad (3.7)$$

$$M_B = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$D = \begin{bmatrix} c(x-1, y-1) & c(x, y-1) & c(x+1, y-1) & c(x+2, y-1) \\ c(x-1, y) & c(x, y) & c(x+1, y) & c(x+2, y) \\ c(x-1, y+1) & c(x, y+1) & c(x+1, y+1) & c(x+2, y+1) \\ c(x-1, y+2) & c(x, y+2) & c(x+1, y+2) & c(x+2, y+2) \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

如公式(3.6)(3.7)(3.8)(3.9)所示，亚像素点处的灰度值可以由像素点位置和插值系数计算得到。公式(3.9)为插值系数，若采用镜像边界条件，其可以通过以下方法由灰度值计算得到：

$$\begin{bmatrix} c(x-1, y-1) & c(x, y-1) & c(x+1, y-1) & c(x+2, y-1) \\ c(x-1, y) & c(x, y) & c(x+1, y) & c(x+2, y) \\ c(x-1, y+1) & c(x, y+1) & c(x+1, y+1) & c(x+2, y+1) \\ c(x-1, y+2) & c(x, y+2) & c(x+1, y+2) & c(x+2, y+2) \end{bmatrix} = (M_C)^{-1} \begin{bmatrix} g(x-1, y-1) & g(x, y-1) & g(x+1, y-1) & g(x+2, y-1) \\ g(x-1, y) & g(x, y) & g(x+1, y) & g(x+2, y) \\ g(x-1, y+1) & g(x, y+1) & g(x+1, y+1) & g(x+2, y+1) \\ g(x-1, y+2) & g(x, y+2) & g(x+1, y+2) & g(x+2, y+2) \end{bmatrix} (M_C^T)^{-1} \quad (3.10)$$

$$M_C = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{3} & 0 & 0 \\ \frac{1}{6} & \frac{2}{3} & \frac{1}{6} & 0 \\ 0 & \frac{1}{6} & \frac{2}{3} & \frac{1}{6} \\ 0 & 0 & \frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

可以通过 Maple 软件预先把矩阵运算中的系数计算出来，在编程的时候直接用计算好的系数进行计算，这样可以大大节省电脑的实际运算时间。同时，对于双三次 B 样条插值查找表，由于每幅图像只有部分区域需要进行插值计算，并不需要对整张图像创建插值查找表。为此，需要建立双查找表，一个查找表用于保存插值系数，一个查找表用于记录变形图上点的插值系数状态。在相关计算中，并不需要预先计算整幅图的插值系数，而是在计算过程中计算插值系数，并用第二个查找表对插值系数的状态进行保存，0 代表没有计算过插值

系数，1 代表已经计算过插值系数。对于已经计算了插值系数的点，用到的时候可以直接调用插值查找表。对于没有计算插值系数的点，则需要重新计算插值系数，并记录点的状态为 1。

3.3 基于种子点扩散的并行计算方法

并行计算可以被用于提高数字图像相关的计算效率。然而，数字图像相关的并行计算方面受到的关注并不多，只有很少的文献有这方面的报道。

对于数字图像相关的并行计算来说，很多个点需要同时计算，因此可靠性导向算法[68]不能被直接用于并行计算。为此，蒋震宇等[76]使用 FFT-CC 算法来计算反向算法中的初值并提出了一种路径无关算法来进行并行计算。然而，在路径无关算法中存在两个劣势。首先，由 FFT-CC 计算得到的初值局限于平移，因此该算法并不适用于大的旋转和变形。为了解决这一问题，潘兵等[99]提出使用 Fourier-Mellin 变换来计算初值。其次，与从周边点传递的初值相比[90]，由 FFT-CC 计算得到的初值会造成更多的迭代。为了解决这些问题，本文提出了一种基于种子点扩散的并行计算方法。

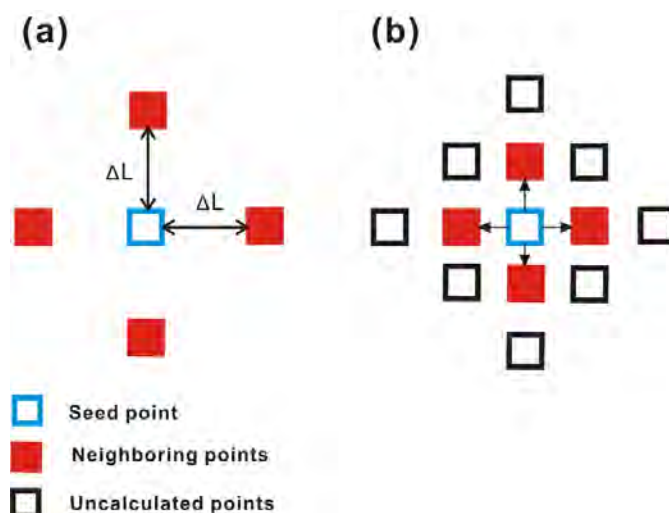


图 3.1 基于种子点扩散的并行计算方法示意图。

种子点的变形被用于给周边点提供改进的初值估计，每一个计算成功的点则被当作一个新的种子点向周边点传递初值，零均值归一化互相关函数 (zero-mean normalized cross-correlation, ZNCC) 被用于区分该点是否计算成功。若该计算点的相关系数大于 0.8，则可认为该点计算成功。若该计算点的相关系数小于 0.8，则可认为该点计算失败。这些计算不成功的点将不会被作为新的种子点。同时，这些计算不成功的点的计算结果也不会被使用，因为在这么低的相关系数下其收敛性和正确性不能得到保证。在一些极端情况下，大多数点的相关系数都低于预先设定的 0.8。在这种情况下，则推荐使用可靠性导向算法来对这些点进行计算。

图 3.1 为基于种子点扩散的并行计算方法示意图，周边点的初值可以由种子点的变形参数计算得到[90]。一旦种子点被确定了，其周边 4 个点便可以同时计算。计算成功的 4 个计算点将作为新的种子点，接着就会有 8 个点可以同时计算。通过这种方式，越来越多的点可以被同时计算。将周边点的初值表示为 $P_{NP(\text{Neighboring point})} = (u_{NP}, u_{x_NP}, u_{y_NP}, v_{NP}, v_{x_NP}, v_{y_NP})$ ，将

种子点的变形表示为 $P_{SP(\text{Seed point})} = (u_{SP}, u_{x_SP}, u_{y_SP}, v_{SP}, v_{x_SP}, v_{y_SP})$ ，则改进的初值估计传递方式如下式：

$$\begin{aligned}
 u_{NP} &= u_{SP} + u_{x_SP} \times \Delta L + u_{y_SP} \times \Delta L \\
 u_{x_NP} &= u_{x_SP} \\
 u_{y_NP} &= u_{y_SP} \\
 v_{NP} &= v_{SP} + v_{x_SP} \times \Delta L + v_{y_SP} \times \Delta L \\
 v_{x_NP} &= v_{x_SP} \\
 v_{y_NP} &= v_{y_SP}
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

种子点的初值估计可以采用快速的整像素搜索方法[30]，对于大变形则可以采用特征点匹配的方法[99]。常用的特征匹配算法有 SIFT 算子和 SURF 算子[100]，SURF 算子具有更快的计算速度，SIFT 算子和 SURF 算子都可以基于 OpenCv 的开源库直接调用。与 FFT-CC 等整像搜索算法相比，SIFT 算子与 SURF 算子具有更慢的计算速度。由于在基于种子点的并行算法中只需要对种子点进行初值的搜索，其计算速度可以得到大幅度的提高。

3.3.1 种子点初始化

种子点初始化是该并行算法的第一步，目前很多商业软件中都是通过用户手动设定的方式来进行选取。这里采用的是自动选取的方式，选取的准则为计算区域内每一个子区的灰度梯度平方和。计算被测区域内每一个子区的灰度梯度平方和，将灰度梯度平方和最高的子区作为种子点。

如果被测物体上存在不连通区域，则需要每个不连通区域内都自动选取一个种子点。当变形过程中出现部分区域计算结果很差不能保证种子点传递（如变形很大导致部分区域出现了掉漆或失相关）时，则可以在特殊区域手动选取种子点。

3.3.2 种子点扩散并行计算方法

基于种子点并行算法的流程图如图 3.2 所示。在计算之前，需要创建一个序列 Q 和二进制模板 M_C ，其中 M_C 的大小与未被计算点的数量相同。另外，需要将子线程提前创建好。在计算过程中，对于一个计算成功的点（也即是种子点），如果其周边点还没有被计算，其周边点和种子点的序号需要被插入到序列 Q 中。种子点的序列号可以被用于检索其对应的变形从而提供改进的初值估计。二进制模板 M_C 则被用于标注已计算点从而避免对相同点的重复计算。 M_C 中每一个计算点一开始被标注为 0，当该点被计算之后则将其标注为 1。种子点扩散变形算法的实现过程如下：

- 1) 根据章节 3.3.1 中介绍的方法在计算区域中选取种子点，通过初值搜索方法[34][91]及反向算法计算其变形，并将种子点在 M_C 中标注为 1。判断种子点是否计算成功，检查计算成功种子点邻近的四个点，将四个点中未被计算过的点放入待计算列表中。触发多线程，开始并行计算；
- 2) 对于每一个线程，从待计算列表中获取一个可计算点。通过改进的初值估计及反向算法来计算可计算点，将计算过的点在 M_C 中标注为 1。若该计算点计算成功，则检查该点相邻的四个点，将四个点中未被计算过的点放入待计算列表中；
- 3) 重复第二步直到计算序列 Q 是空的且所有的线程已经结束计算。

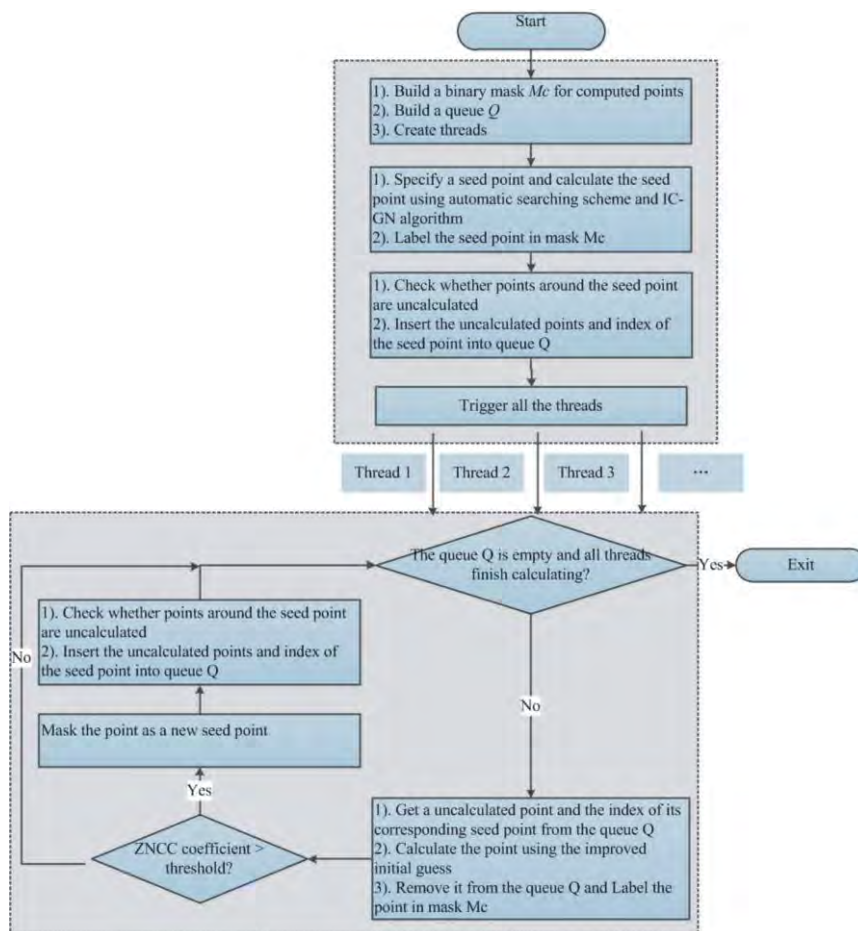


图 3.2 基于 CPU 的多线程二维数字图像相关流程图。

3.3.2.1 单种子点扩散并行计算方法

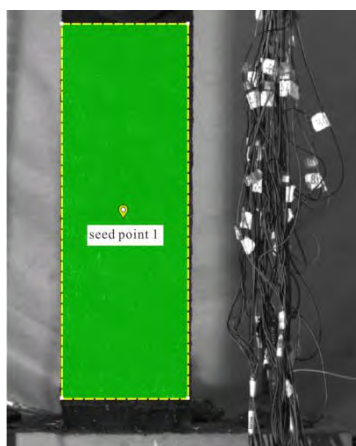


图 3.3 单种子点扩散并行计算方法。

对于如图 3.3 中的待计算区域，计算区域为一个整体，因此在其中定义一个种子点作为初始的计算点即可以完成整个区域的计算。如果在试样加载的最后阶段，测量区域内出现了断裂或者掉漆，则可能会导致种子点的变形无法传递，这个时候就需要添加多个种子点。

3.3.2.2 多种子点扩散并行计算方法

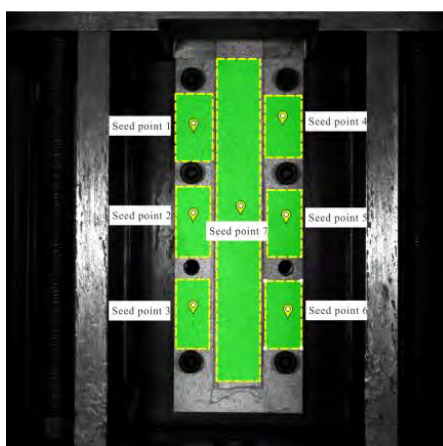


图 3.4 多种子点扩散并行计算方法。

对于如图 3.4 中的待计算区域，计算区域本身是不连续的，则必须定义多个种子点才能实现全场变形的测量。一般需要在每个不连通区域内至少选取一个种子点。对于因为掉漆或者失相关导致的测量区域不连续，则需要根据实际情况定义多个种子点。

3.4 二维实时数字图像相关方法

3.4.1 基于 CPU 并行计算的二维实时数字图像相关方法

章节 3.3 中介绍的基于种子点扩散的并行计算方法在二维实时数字图像相关中可以直接用于计算位移。二维 SG 差分器则被用于应变的求解，由于每个计算点的应变计算是不相关的，因此可以直接采用并行计算的方式来提高其计算速度。关于 SG 差分器的构造，可以参考文献[101]。

3.4.2 二维实时数字图像相关在土木准静态实验测量中的应用

这里介绍二维实时数字图像相关方法在土木实验现场测量的应用实例，这里应用的实验为 CFRP 片材-钢板界面粘结滑移关系测试。粘结滑移关系[103]决定了界面的粘结强度、应变分布、有效粘结长度等重要指标。实验中一般通过黏贴应变片的方式获得加载过程中纤维增强复合材料（FRP）表面的应变，通过差分 and 积分运算获得界面的剪应力和滑移分布，进而得到界面的粘结滑移关系。实际测量中，应变片不可能布置得非常紧密，导致差分得到的剪应力结果偏差较大。采用数字图像相关方法的全场变形测量方法，可以缩小数据计算点的间隔，有利于提高计算结果的准确度。同时，数字图像相关方法计算得到的位移通过逐点局部最小二乘的方法可以直接计算得到应变，可以直接用于后续的数据分析。

实际测量中，实时地计算出变形结果，不仅避免了后续长时间的处理工作，提升了数据分析的时效性。更重要的是，依据求得的变形场，可以调整合适的加载速率和荷载大小，有利于更全面、直接地进行力学性能的分析。

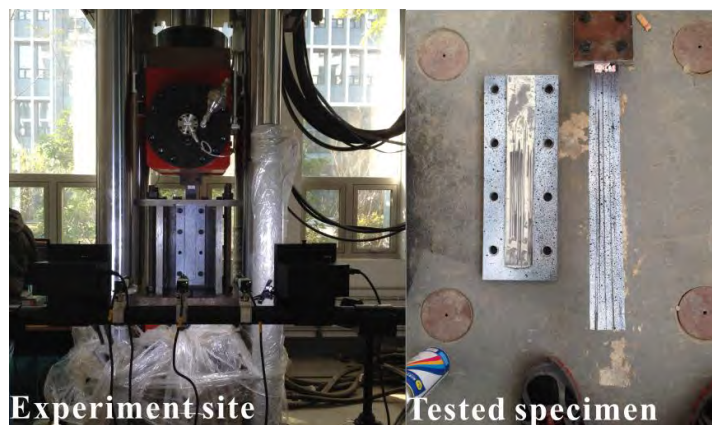


图 3.5 实验现场图（左）与已测试样（右）。

图3.5为实验现场及试样典型的破坏模式图。采用了喷漆的方式对试样表面进行了喷涂，获取用于相关计算的均匀散斑场。图3.6为加载曲线及加载方向示意图，加载过程中CFRP片材会发生剥离直至破坏。相机型号为UI-3370CP-M-GL，相机分辨率为 2048×2048 像素，实验过程中采集图像的频率为2帧/秒。为了实验方便，采用了易携带的笔记本电脑进行实时数字图像相关计算，其配置为Inter(R) Quad-Core (TM) i7-3720QM CPU，电脑主频为2.6GHZ，内存大小为8.0GB。计算中，使用了全部四个核的8个线程进行并行计算。

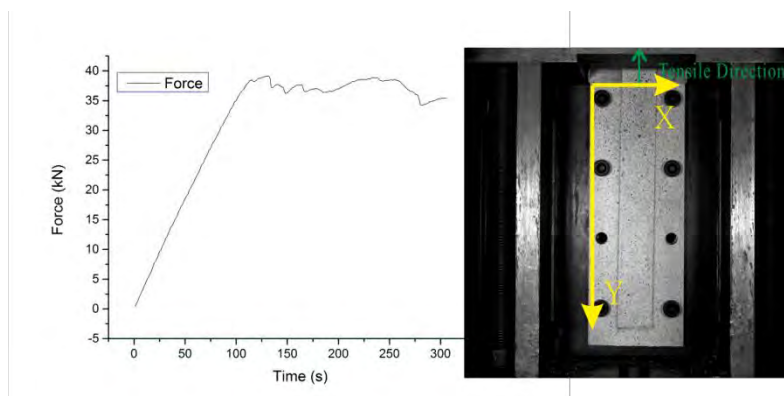


图 3.6 加载曲线（左）与加载方向（右）。

针对图3.4中的计算区域及种子点选取，将计算步长设为5个像素，此时总的计算点个数为20041个点。应变计算窗口选取为 15×15 个计算点。表3.1为实时数字图像相关方法的计算效率，当计算模板逐渐变大时，其计算速度逐渐变慢，平均迭代次数逐渐减小。更大的计算模板意味着更多像素需要计算，但是可以为周围的点提供更高精度的初值。为了满足2帧/秒的计算效率，本文选取了15pixel的模板来进行实时计算，此时计算速度可达44573个点每秒，每幅图加上应变计算的总时间也仅为0.48秒。

表 3.1 实时数字图像相关方法计算效率

Subset size (pixel)	Displacement Calculation speed (points/s)	Average number of iterations	Strain calculation time (s)	Total time for each image (s)
11	54987.5	3.7	0.03	0.39
15	44573.8	3.2	0.03	0.48
19	33955.3	3.0	0.03	0.62
23	25892.8	2.7	0.03	0.81

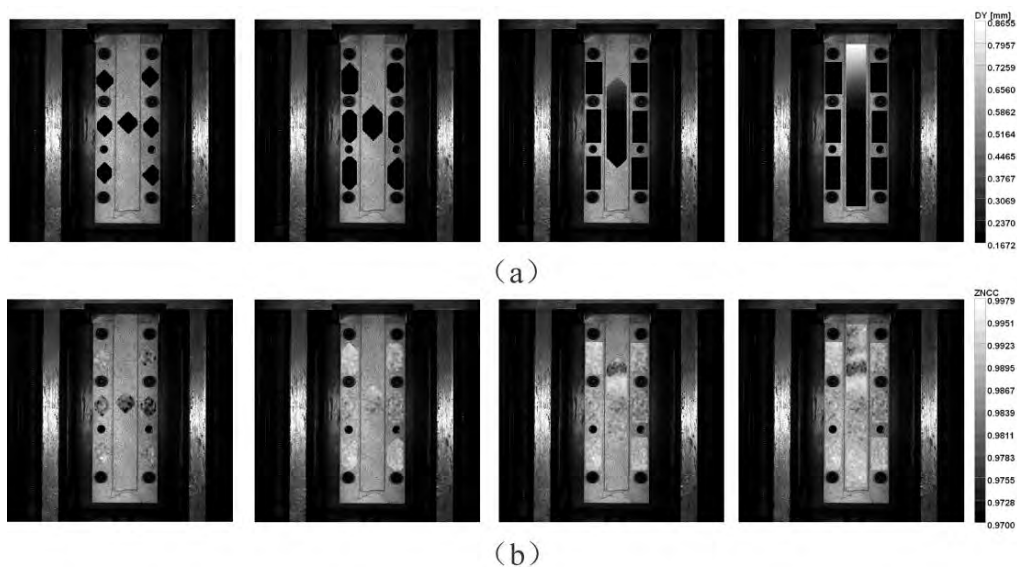


图 3.7 位移计算的中间过程和最终结果：(a)V 场与(b)相关系数分布。

图 3.7 为计算过程中种子点扩散示意图，其中图 3.7(a)为沿 y 方向的位移场，图 3.7(b)为 ZNCC 系数分布图。采用多种子点并行计算方法，多个区域可以同时计算，很好的解决了不连通区域的测量问题。从图 3.7(b)中可知，ZNCC 系数基本都大于 0.97，证明了计算结果的正确性。

图 3.8(a)与图 3.8(b)分别给出了试件在加载过程中试件表面的位移场及应变场，可以直观地观察出界面受力变形、剥离、直至破坏的发展过程。随着载荷的逐渐增大，CFRP 表面的位移和应变逐渐增大并且由加载端逐渐向自由端方向扩展；CFRP 两侧的钢板表面位移及应变很小，几乎没有受力，加载过程中仅发生刚体位移。这里值得说明的是，加载过程中的变形场都是在实验过程中实时获取的。因此，实验过程中若发现问题，也可以及时地对实验装置或实验方法进行改进。

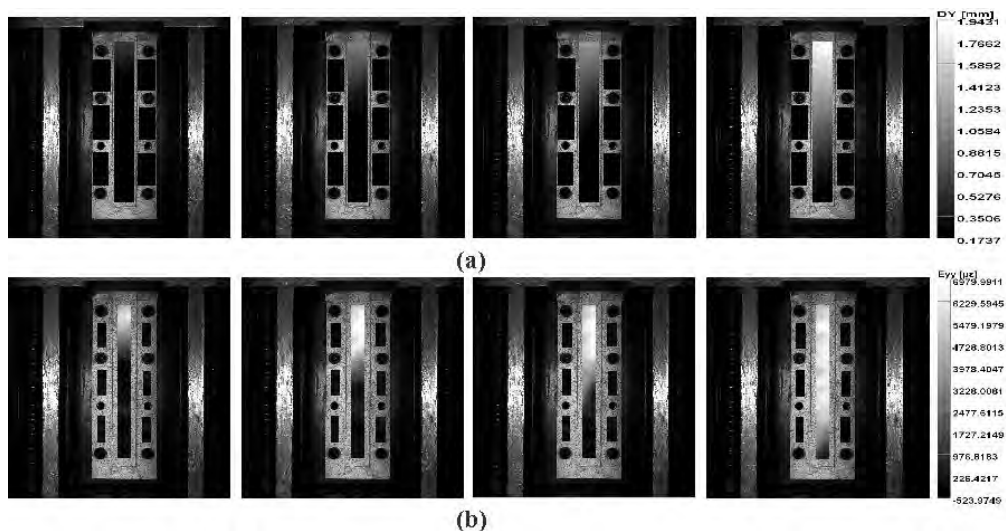


图 3.8 随着荷载增大试件表面变形分布：(a)V 场与(b) ϵ_{yy} 场。

3.4.3 二维实时数字图像相关在实验室地震实时加载控制中的应用

除了在土木准静态实验中的应用外,提出的二维实时数字图像相关方法还被用于实验室地震的实时加载控制,如图 3.9 所示。在进行实验室地震时,需要预先对试样进行加载以达到所需要的应力状态。在加载过程中,如果可以实时观测试样表面的应变状态,不仅可以有利于加载的控制,还可以了解加载过程中全场变形信息。采用了普通的工业相机(型号为 IDS UI-1240SE)进行加载过程中变形的实时记录,帧频为 1Hz。如图 3.9 所示,采用普通的笔记本电脑即可完成实时数字图像相关计算,无需昂贵的硬件成本。

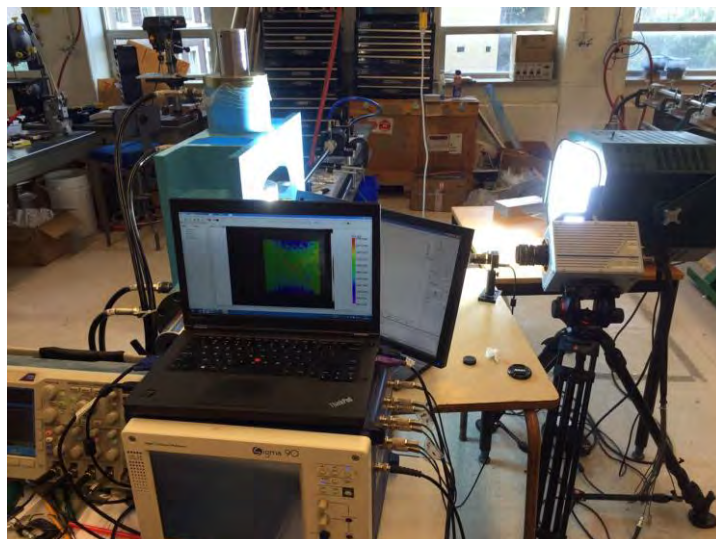


图 3.9 实验室地震实时加载控制。

图 3.10 为动态加载的实验图,采用高速相机和高亮光源进行采图,图像分辨率为 1024×112 像素。相机的采集帧频为 50000Hz,相邻图像之间的时间间隔为 0.02ms。实验中使用霍普金森杆来进行远场动态加载并通过数字图像相关技术记录地震触发后的全场变形,使用应变片信号来触发高速相机采集。图 3.11 为实验中使用的优化散斑图案,使用数字散斑转印[45]的方法制作在试样表面,以取得好的计算精度和计算效率。



图 3.10 基于霍普金森杆加载的实验室地震实验装置图。

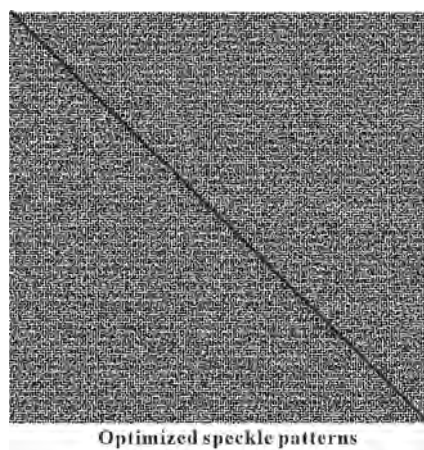


图 3.11 实验过程中使用的优化散斑图案。

图 3.12 为界面之间发生超剪切破裂时的全场位移图，从图中可以明显的看到裂纹尖端的传播。除了裂纹尖端的传播以外，高速数字图像相关方法的使用，使得破裂过程中的全场变形的可视化成为可能。在实验过程中，实时数字图相关方法的使用使得实验加载更加可控，高速数字图像相关方法的使用则使得实验中变形的观测变得更加直接。

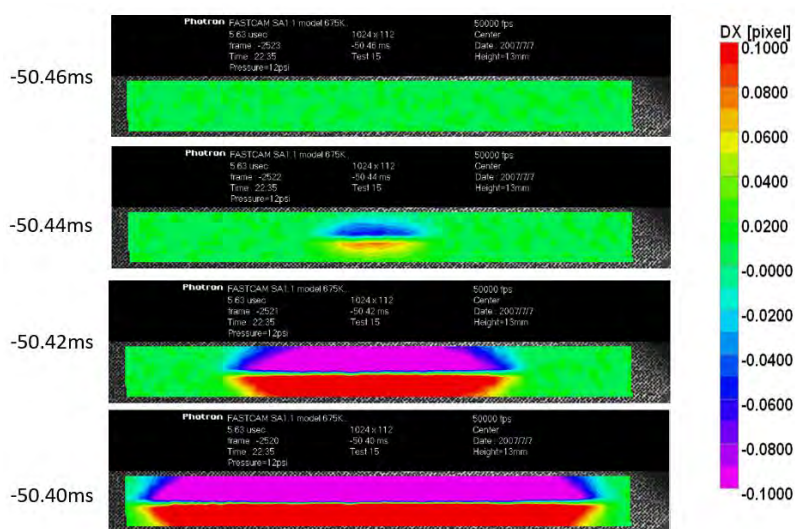


图 3.12 基于数字图像相关技术获取的超剪切破裂中的变形。

3.5 三维实时数字图像相关方法

3.5.1 高精度、高效率的立体匹配算法

一般来说，三维数字图像相关中共有三种匹配策略[69]。如图 3.13 所示，第一种匹配策略是在参考图阶段先进行左右相机的立体匹配，然后左右相机图像分别进行时序匹配；第二种匹配策略是只有左相机图像进行时序匹配，每一个阶段都需要左右相机的立体匹配；第三种匹配策略是参考图左相机图像分别与参考图右相机图像匹配、变形图左相机图像匹配、变形图右相机图像匹配。在第一种匹配策略中，只需要在参考图阶段进行立体匹配，在变形图阶段只需要做时序匹配。在第三种匹配策略中，不存在增量相关，因此不会引起误差传递。

为了实现最高的匹配精度，一般推荐使用没有增量相关的第三种匹配策略[97]。

在时序匹配中，如果不存在复杂的变形，一阶形函数即可满足要求。对于立体匹配，由于左右图像之间是透视变换，一般需要选用二阶形函数。当相机夹角较小时（不超过 30° ），为了提高匹配效率，一阶形函数也可以被采用且可以满足立体匹配的精度要求。

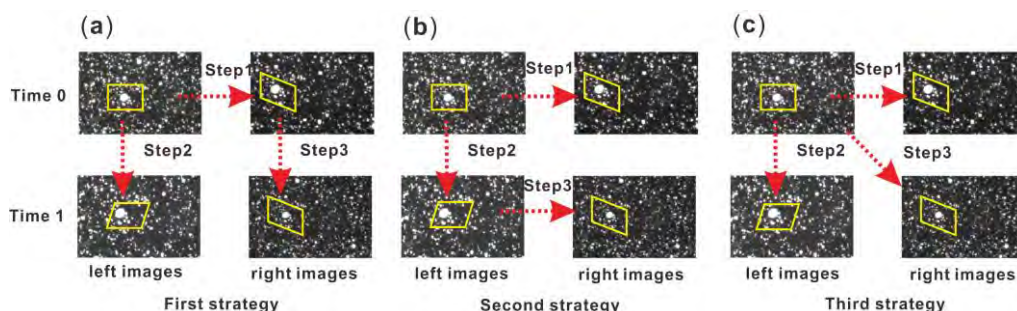


图 3.13 三维数字图像相关立体匹配策略: (a)第一种匹配策略; (b)第二种匹配策略与(c)第三种匹配策略。

3.5.2 基于 CPU 的三维多线程并行计算

为了实现三维数字图像相关的并行计算，可以采用基于种子点扩散的并行计算方法。基于种子点扩散的三维数字图像相关并行计算示意图如图 3.14 所示。三维数字图像相关变形阶段对每个点的计算包括与左图像匹配、与右图像匹配以及三维重构。在测量区域中，有数千个点需要计算，并行计算可以用于提高三维数字图像相关的计算速度。

在计算前，需要创建一个与未被计算点数量相同的序列 Q 。另外，在计算过程中需要提前创建子线程。在计算过程中，对于一个已经计算成功的点，如果其周边点没有被计算过，则其周边点和其对应种子点的索引被嵌入到序列 Q 中。种子点的索引可以被用来检索种子点的变形，从而提供一个改进的初值估计。三维数字图像相关并行计算的步骤如下：

- 1) 使用整像素搜索方法和高效率的反向组合高斯-牛顿算法在左相机图像和右相机图像中对种子点进行匹配。对于右相机图像中的整像素匹配，极线约束可以被用于缩小搜索范围。在计算完种子点之后，检查其周围四个点。周围点中没有被计算的点和种子点的索引被插入到序列 Q 中。最后，触发所有的子线程；
- 2) 对于每一个线程，从待计算列表中获取一个可计算点，通过改进的初值估计及高效的反向算法在左相机图像和右相机图像中进行匹配。每一个线程计算都可以是同步的。与左相机图像匹配、与右相机图像匹配、三维重构，这些在子线程中都可以按步实现。该点计算完之后，检查种子点周围四个点，将周围点中没有被计算的点和种子点的索引插入到序列 Q 中；
- 3) 重复第二步直到计算序列 Q 是空的且所有的线程已经结束计算，也就说明计算已经结束了。

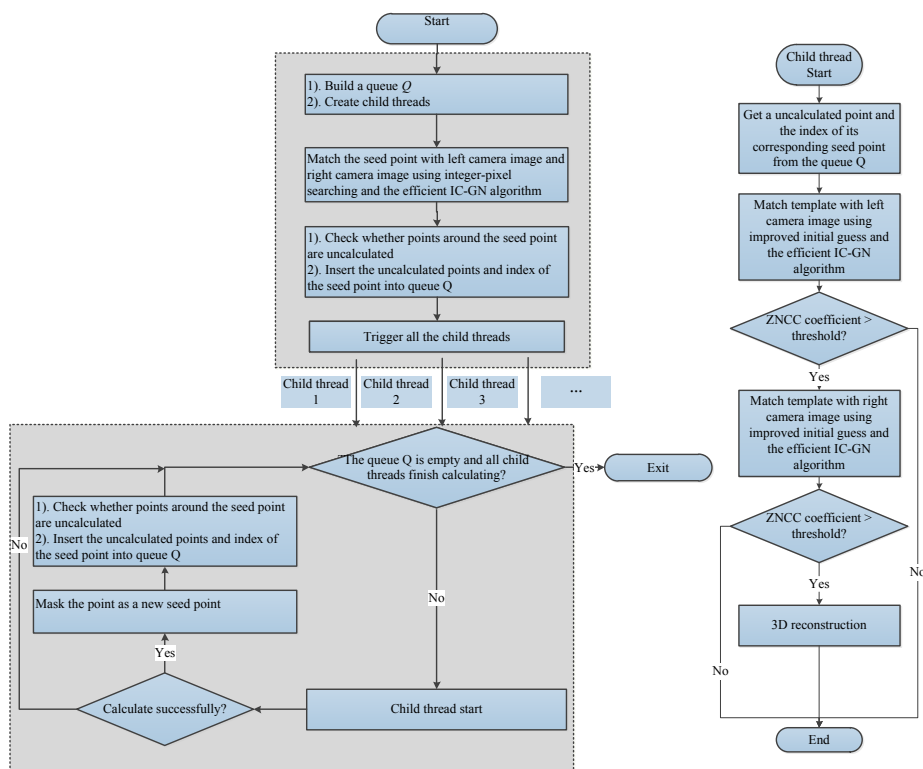


图 3.14 基于 CPU 的多线程三维数字图像相关流程图。

零均值归一化互相关函数被用于区分每次计算是否计算成功，零均值归一化互相关函数的阈值被设为 0.8。在计算过程中，如果与左相机图像匹配失败，则不再需要和右相机图像进行匹配且可以判定该点计算失败。值得指出的是，种子点的整像素搜索时间远远小于一个毫秒，因此其对整体计算效率是几乎没有影响的。

3.5.3 三维实时数字图像相关方法

图 3.15 为三维实时数字图像相关的计算流程图。在实验之前，需要先架设好测量设备并对测量设备进行三维标定。在正式测试前，还需要做其他一些准备，如采集参考图像，选择测量区域。同时，需要创建合理的内存用于存储反向算法中的不变量，参考阶段的三维重构也需要完成。

在实验过程中，使用快速三维数字图像相关方法来实现实时计算。实验结果可以在显示器上实时显示。同时，值得注意的是，在参考图像采集和三维重构之后可以预先计算坐标变换的参数。这一点非常重要，尤其是将三维实时数字图像相关用于圆柱和球面物体测量。

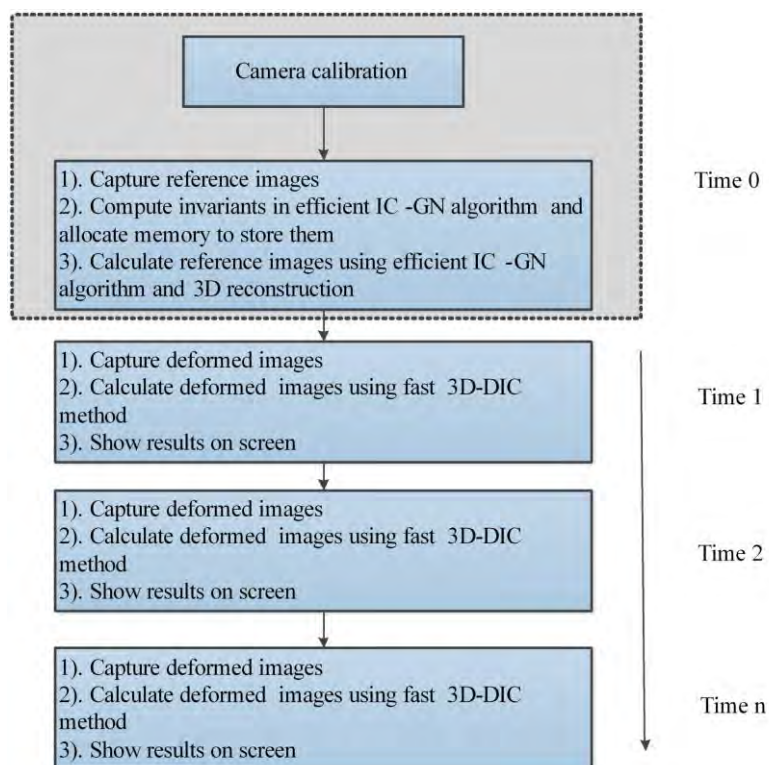


图 3.15 基于 CPU 的多线程三维数字图像相关流程图。

为了验证实时三维数字图像相关方法的计算效率，做了一个塑料试样的四点弯实验。四点弯实验是一个可以被用于识别材料参数的典型实验且其变形趋势是可以预测的。人工的黑白散斑被喷涂在试样表面上，实验装置如图 3.16(a)所示。两台分辨率为 2048×2048 像素的相机被用于从两个方向采集试样表面图像。基于实时三维数字图像相关方法，一个包含 10050 (50×201) 个点的矩形测量区域被选取并用于计算，如图 3.16(b)所示。测量过程中，试样的变形被实时的显示在电脑屏幕上。所有的算法都通过 C++实现且在一台台式机电脑 [Inter (R) Quad-Core (TM) i7-4770] 上进行测试，电脑 CPU 的主频为 3.4GHz，内存为 16 GB。

图 3.17 为使用不同模板下的三维数字图像相关方法的计算速度，模板尺寸从 11 个像素到 31 个像素，步长为 5 个像素。从图 3.17 可以看到，一般来说，随着模板的增大计算效率降低。但是，这并不意味着模板尺寸越小，计算速度越快。事实上，小的模板尺寸需要更多的迭代次数才能满足预先设定的收敛条件，如表 2 所示。当模板尺寸为 15 像素时，使用一阶形函数的计算速度可以达到 50000 个点每秒。对于一个包含 10000 个点的测量区域，使用实时三维数字图像相关方法计算一帧图只需要 0.2 秒，这样的计算效率可以满足很多应用的需求。当模板尺寸为 31 像素时，计算效率低于 30000 个点每秒。为了保持快速的计算速度，不应该选择过大的计算模板。因此，需要好的散斑图案来保证小的模板内有足够的灰度信息。

表 3.2 进一步比较了一阶形函数和二阶形函数下不同计算模板的计算时间。从表 3.2 中可以看到，使用相同的计算模板时，一阶形函数的计算速度接近为二阶形函数的 2 到 5 倍。同时，为了降低由图像噪声引起的随机误差，二阶形函数往往需要两倍的模板来抑制噪声 [104]。因此，一阶形函数更适合于实时测量。

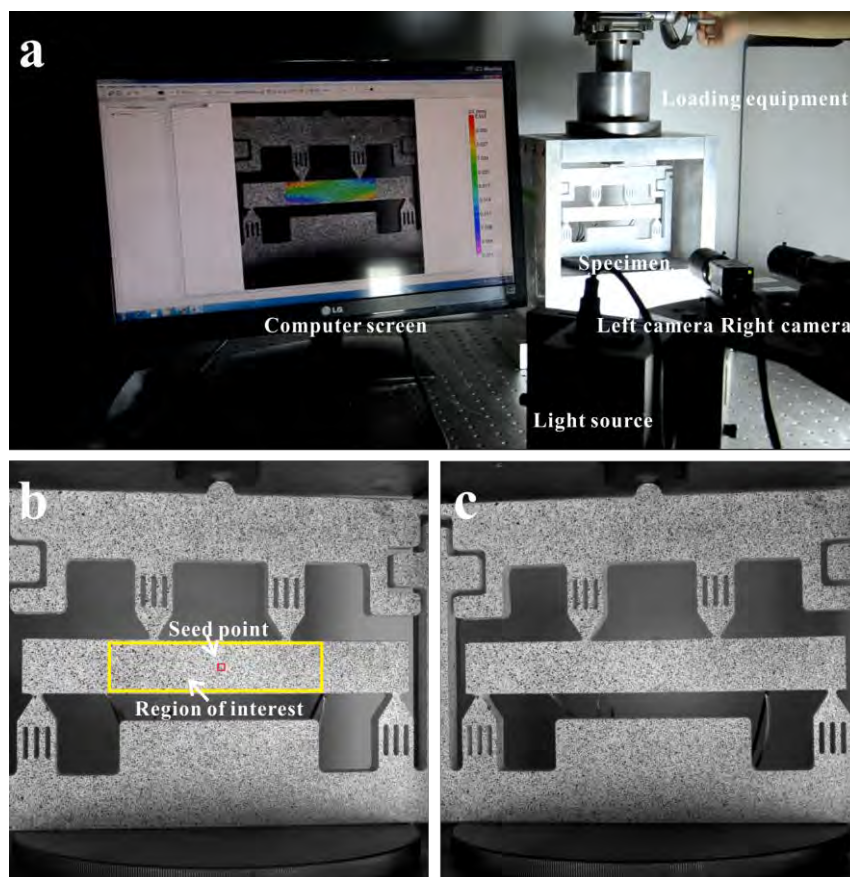


图 3.16 四点弯实时变形测量实验：(a)实验装置；(b)和(c)为左右相机的参考图像。

表3.2 使用不同模板时一阶形函数和二阶形函数的计算时间对比

Subset size	Execution time (second)/Average number of iterations	
	First-order shape function	Second-order shape function
	11	0.21/3.1
15	0.20/2.3	0.70/3.2
19	0.25/2.0	0.55/2.5
23	0.31/1.9	0.56/2.1
27	0.35/1.7	0.65/2.0
31	0.39/1.5	0.78/1.9

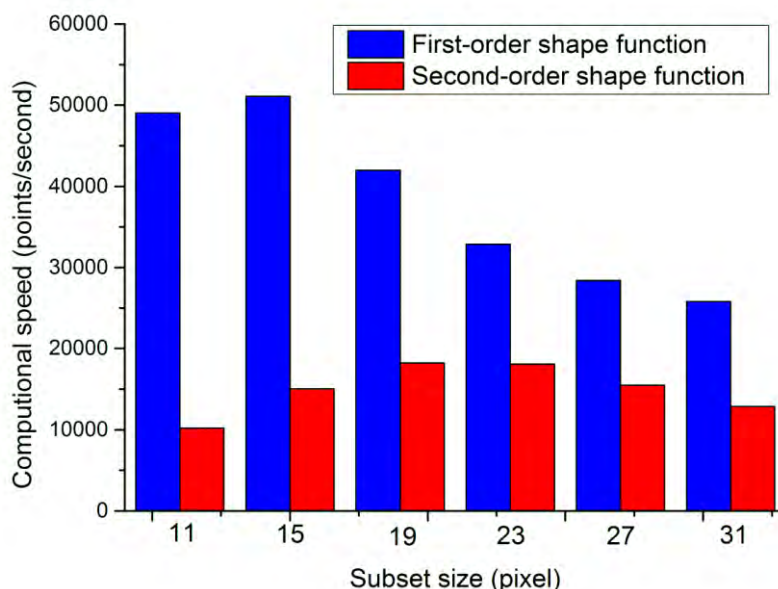


图 3.17 不同计算模板下一阶形函数和二阶形函数的计算速度对比。

3.5.4 三维实时数字图像相关在人体脉搏测量中的应用

基于人体生理学和病理学，中医学的目标是研究、预防、诊断和治疗人类疾病。人体脉搏的研究或触诊是中医疾病诊断的重要环节[105][106][107]。与传统的三维数字图像相关方法相比，基于提出的三维实时数字图像相关方法在时间和空间维度上获取全场的信息并实时诊断是更有意义的[97]。

图 3.18 为实时脉搏监测的实验装置图。两台分辨率为 1280×1024 像素的相机被用于同步的采集图像。为了清晰的观测志愿者手腕上的散斑图案，两个 25 毫米的定焦镜头被安装在相机上。值得指出的是，对人体无伤害、便捷、可重复的水转印散斑制作技术被用于在志愿者手腕上制作散斑图案[46]。

实验前需要先对测量系统进行三维标定。一个包含 5040 个计算点的测量区域被在选定在脉搏位置。计算中使用的两个关键参数为：模板 15×15 像素，步长为 5 像素。

因为人体脉搏的频域为 0.7 到 2 Hz，相机的帧频被设为 10 Hz 来获得测量过程中周期性脉搏。计算过程中的平均迭代次数为 2.2，每帧图像的计算时间少于 0.1 秒。实时三维变形被记录并以 10 帧每秒显示在电脑显示器上。

在中医诊断中，一共有三个脉搏诊断的位置，“寸”、“关”、“尺” [105]。图 3.19(a)和图 3.19(c)为两个志愿者在关位置的脉搏波形图。每个数据点为关位置的平均位移。从图 3.19(a)和图 3.19(c)可以看到脉搏呈现一个严格的周期性，这些波形图与中医诊断中的最常见的 29 中波形图是类似的。图 3.19(a)和图 3.19(c)中波形对应的频谱图分别如图 3.19(b)和图 3.19(d)所示。从图中可以发现两个志愿者的脉搏频率分别为 1.18 Hz 和 1.22 Hz，这些在中医诊断中都预示着健康状况。

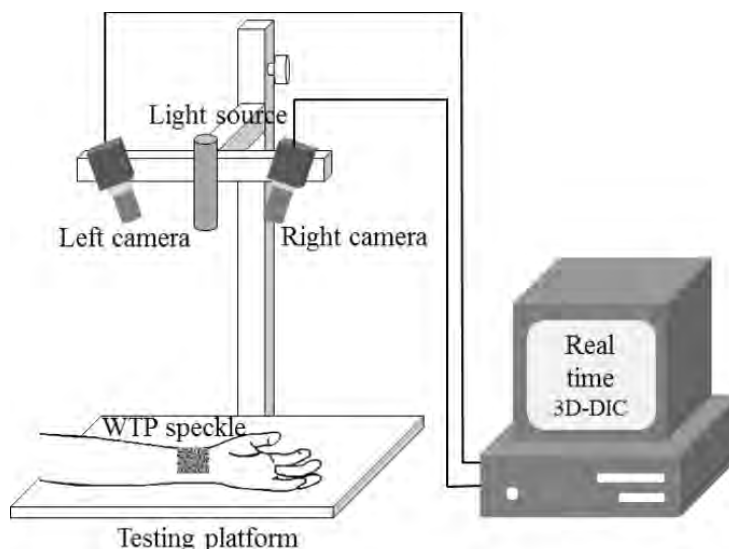


图 3.18 人体脉搏监测装置图。

图 3.20(a)到图 3.20(d)为一个周期内四个典型状态下的离面位移场。对应的振幅和测量时间分别在图 3.19(a)中标注为 A、B、C 和 D。只有“关”位置的脉搏信息被分析，这是因为“关”位置的脉搏跳动比其他两处的脉搏跳动更大。很明显可以看到，使用实时三维数字图像相关方法可以获得很多信息，包括全场变形、振幅和频谱。更重要的是诊断的精度、效率和可重复性都可以得到提高。此外，基于所提出的方法，有望实现不依赖于经验的脉搏诊断。

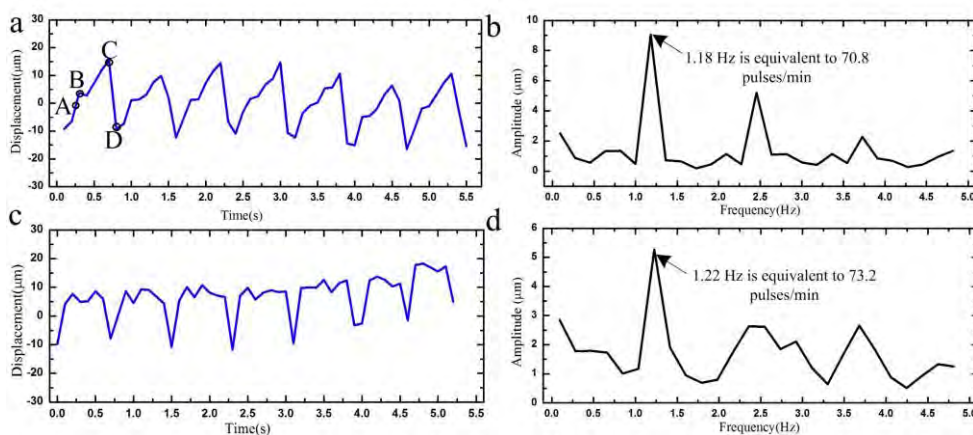


图 3.19 测得的脉搏图和对应的频域分析：(a)第一个志愿者的脉搏图；(b)第一个志愿者脉搏图的频域分析；(c)第二个志愿者的脉搏图；(d)第二个志愿者脉搏图的频域分析。

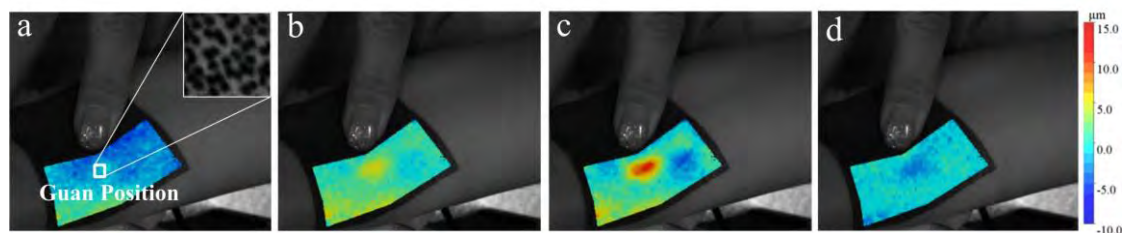


图 3.20 测得的离面位移场：(a)图 3.19 中 A 点的离面位移场；(b)图 3.19 中 B 点的离面位移场；(c)图 3.19 中 C 点的离面位移场；(d)图 3.19 中 D 点的离面位移场。

3.6 平面物体立体匹配算法

3.6.1 平面物体立体匹配原理

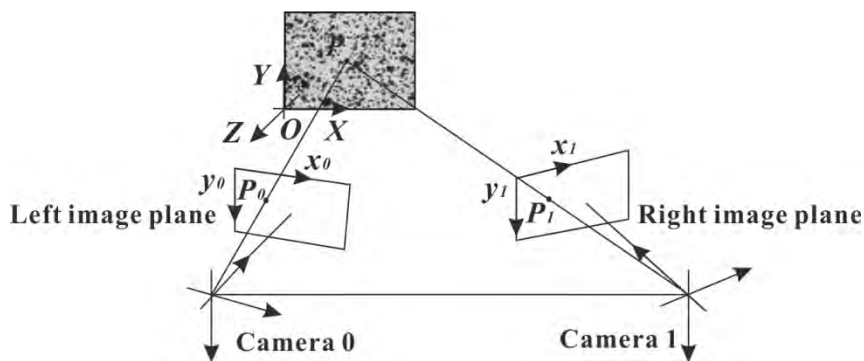


图 3.21 平面物体立体测量示意图。

在三维数字图像相关中，即使使用了高效率的匹配算法和并行计算，传统的立体匹配算法仍然是非常耗时的。为此，我们提出了一种用于平面物体的高效率立体匹配算法。如图 3.21 所示，对于平面物体，其世界坐标可以建立在被测平面上，也就是说 $Z=0$ 。左相机投影方程的表达如下：

$$\alpha_0 \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & f_s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$T = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

其中 f_x, f_y, f_s, c_x 和 c_y 为左相机的内参， R 是左相机坐标系相对于世界坐标系的旋转矩阵， T 是左相机坐标系相对于直接坐标系的平移向量， α_0 为比例因子。为了简化，公式(3.13)可以写成如下形式：

$$\alpha_0 \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} = H_0 \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$H_0 = \begin{bmatrix} f_x & f_s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & t_3 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

同样地，对于右相机可以得到：

$$\alpha_1 \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = H_1 \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

根据公式(3.16)和公式(3.18)，可以得到

$$\alpha \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = H_1 H_0^{-1} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

其中 $\alpha = \alpha_1 / \alpha_0$ ，公式(3.19)代表了左右相机坐标系之间的投影变换。值得一提的是公式(3.19)同样是计算机视觉领域中图像拼接的基本原理公式[108]。

从公式(3.19)中可以看出左右图像中点的投影变换参数都是相同的且可以被表达为一个 3×3 的矩阵。这就意味着如果可以计算出变换矩阵 H 则点对点的立体匹配是不需要的。把矩阵中的参数对 h_{33} 进行正则化，变换矩阵中共有 8 个参数需要求解：

$$\alpha \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11}/h_{33} & h_{12}/h_{33} & h_{13}/h_{33} \\ h_{21}/h_{33} & h_{22}/h_{33} & h_{23}/h_{33} \\ h_{31}/h_{33} & h_{32}/h_{33} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11}' & h_{12}' & h_{13}' \\ h_{21}' & h_{22}' & h_{23}' \\ h_{31}' & h_{32}' & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

每一对匹配点可以提供两个方程，所以在每一个变形阶段至少需要 $4 (2 \times 4 = 8)$ 个点来计算变换矩阵，然后基于该变换矩阵即可完成所有点的立体匹配而不再需要点对点的模板匹配，如下式：

$$\begin{cases} x_1 = \frac{h_{11}'x_0 + h_{12}'y_0 + h_{13}'}{h_{31}'x_0 + h_{32}'y_0 + 1} \\ y_1 = \frac{h_{21}'x_0 + h_{22}'y_0 + h_{23}'}{h_{31}'x_0 + h_{32}'y_0 + 1} \end{cases} \quad (3.21)$$

通过这种方式，用于立体匹配的时间就可以被省下了，从而可以大幅度地提高三维数字图像相关的计算效率。正如大家所知，立体匹配几乎占了三维数字图像相关中一半的计算时间。基于提出的方法[109]，三维数字图像相关的计算效率可以被提高为原来的两倍。

3.6.2 三维模拟与结果

为了验证所提出立体匹配算法的可行性，首先通过三维模拟实验进行验证。采用了由 Hu 等[110]提出的三维散斑生成技术来生成尺寸为 $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的平面物体。由于物体是平面的，物体表面的散斑场可以表达为：

$$I(X_w, Y_w) = \sum_{k=1}^s I_k^0 \times \exp\left[-\frac{(X_w - X_w^k)^2 + (Y_w - Y_w^k)^2}{R_0^2}\right] \quad (3.22)$$

其中 s 是总的散斑个数， R_0 是散斑尺寸， (X_w^k, Y_w^k) 是每个散斑在世界坐标中的随机位置， I_k^0 是每个散斑点的峰值灰度。

散斑尺寸被设为 0.5mm ，散斑的个数被设为 10000 个。在 8 比特的灰度值下，每个散斑点的峰值灰度被设为 128。用于模拟的立体参数如表 3.3 所示，其中 K_L 和 K_R 分别是左右相机的内参， r 和 t 是两个相机之间的旋转和平移向量， r_{w-L} 和 t_{w-L} 是左相机坐标系与世界坐标系之间的相对旋转和平移向量。详细的标定参数来自于一次实际的标定实验，这些参数

被用于本文的模拟实验。

表3.3 模拟立体散斑图像的参数

$$K_L = \begin{bmatrix} 6726 & 0 & 1293 \\ 0 & 6726 & 1000 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad r = \begin{bmatrix} 0.77 \\ 34.68 \\ -0.05 \end{bmatrix} \quad r_{W-L} = \begin{bmatrix} 0 \\ -17 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$K_R = \begin{bmatrix} 6621 & 0 & 1248 \\ 0 & 6621 & 1045 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad t = \begin{bmatrix} -291.94 \\ 0.31 \\ 82.50 \end{bmatrix} \quad t_{W-L} = \begin{bmatrix} -45 \\ -24.488 \\ 537.105 \end{bmatrix}$$

图 3.22 为模拟生成的左右相机图像。图 3.22 中显示了计算测量区域和用于计算投影变换矩阵的四个点。关键的计算参数如下：计算模板为 41×41 像素，步长为 10 个像素。图 3.23 (a) 和 (b) 为使用传统点对点立体匹配算法时匹配点的 X 方向图像坐标和 Y 方向图像坐标。图 3.23 (c) 和 (d) 为使用本文提出的立体匹配算法时匹配点的 X 方向图像坐标和 Y 方向图像坐标。图 3.23 (e) 和 (f) 为使用两种匹配算法下匹配点的 X 方向图像坐标和 Y 方向图像坐标的差别。从图 3.23 中可以看到，使用传统的匹配算法的本文提出的匹配算法的匹配结果几乎是一样的。X 方向图像坐标和 Y 方向图像坐标的区别的标准差分别为 0.006 像素和 0.005 像素。普遍认为模板匹配的精度一般不超过 0.01 像素，因此这点微小的区别是可以接受的。

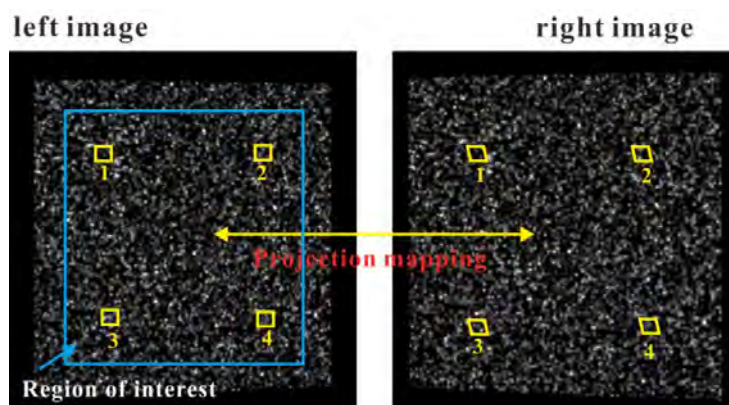


图 3.22 平面物体的三维模拟散斑图。

为了进一步验证所提出匹配算法的适用性，本文另外实施了五组试验。在每组试验中，在匹配图像中随机选取了四个点来计算投影变换矩阵。这五组试验中使用两种不同匹配算法下 X 方向图像坐标和 Y 方向图像坐标的区别的标准差如表 3.4 所示。在所有的测试中 X 方向图像坐标和 Y 方向图像坐标的区别的标准差均没有超过 0.006 像素。测量结果成功说明了本文提出算法的适用性。

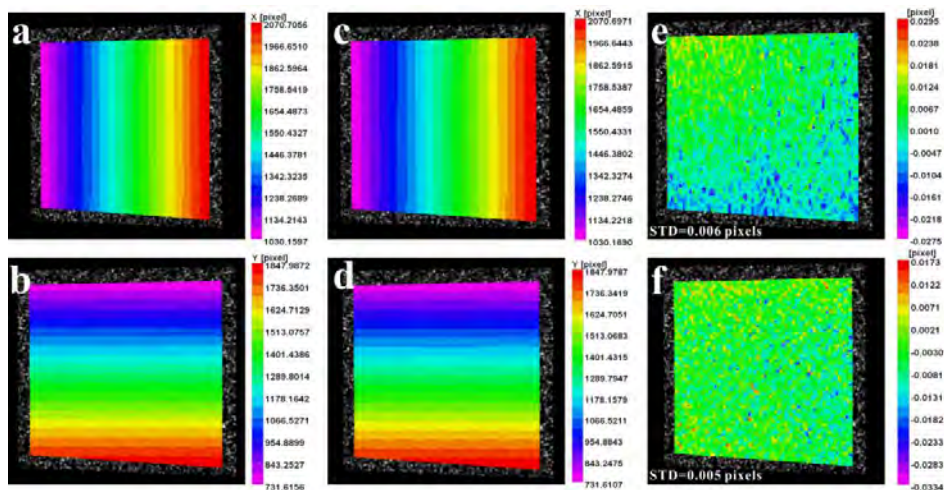


图 3.23 使用传统匹配算法下的(a)X 方向图像坐标和(b)Y 方向图像坐标;使用本文提出匹配算法的(c) X 方向图像坐标和(d)Y 方向图像坐标;两种匹配算法下匹配点坐标的差别(e)X 方向图像坐标和(f)Y 方向图像坐标。

表3.4 使用两种方法时匹配点X和Y图像坐标的区别

Position	Standard deviations of the differences (pixels)	
	X image coordinates	Y image coordinates
No. 1	0.0049	0.0055
No. 2	0.0048	0.0054
No. 3	0.0051	0.0049
No. 4	0.0047	0.0054
No. 5	0.0048	0.0056

3.6.3 实验与可行性分析

3.6.3.1 带裂缝板弯曲试验

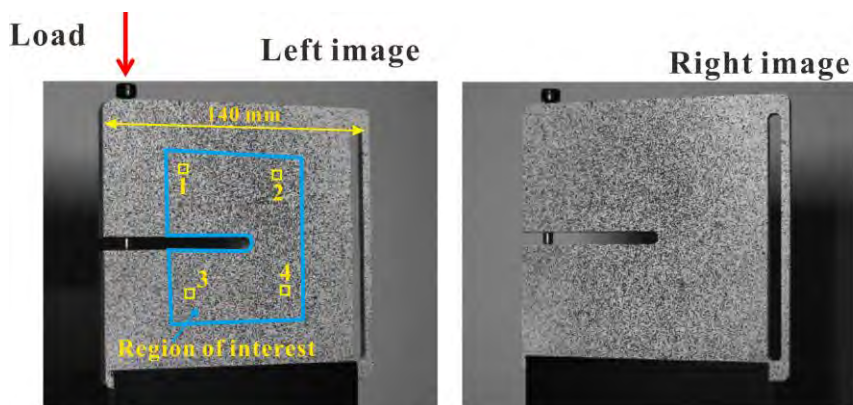


图 3.24 带裂缝板的真实弯曲实验。

为了进一步验证所提出匹配算法的可行性,做了带裂缝板的弯曲试验。如图 3.24 所示,由两个相机从不同的角度采集得到 2448×2048 像素的左右图像,每个相机的视场约为 200 毫米 \times 200 毫米。在平面的试样表面通过喷漆制作了黑白的人工散斑场,计算区域共包含 18457 个点。计算参数的选取如下:计算模板为 35×35 像素,步长为 7 个像素,应变计算尺寸为 9×9 个点。四个用于计算投影变换矩阵点的位置如图 3.24 所示。使用两种不同匹配算法下 X 方向图像坐标和 Y 方向图像坐标的差别的标准差不超过 0.01 像素。

图 3.25 (a) 和 (b) 分别为使用传统的立体匹配算法和所提出立体匹配算法计算得到的竖向位移场。从图 3.25 中可以看出两种匹配算法计算得到的竖向位移场结果几乎是一样的。图 3.25 (c) 为线 1 上两种匹配算法的计算结果以及结果之间的差别,线 1 的位置如图 3.25 (a) 所示。两种匹配算法的计算结果之间最大的差别为 0.0017 毫米,没有超过视场的十万分之一。

图 3.26 (a) 和 (b) 分别为使用传统的立体匹配算法和所提出立体匹配算法计算得到的 ε_{yy} 应变场。从图 3.26 中可以看出两种匹配算法计算得到的 ε_{yy} 应变场结果几乎是一样的。图 3.26 (c) 为线 1 上两种匹配算法的计算结果以及结果之间的差别,线 1 的位置如图 3.26 (a) 所示。两种匹配算法的计算结果之间最大的差别为 71 个微应变且平均差别小于 50 个微应变。

对试样施加了更大的荷载,但是误差的等级没有发生改变,误差小于 100 个微应变。误差的大小甚至小于因计算参数选取导致的误差。在数字图像相关方法中,计算参数对计算结果有很大的影响。计算结果成功地说明了所提出的立体匹配算法的可行性和有效性。

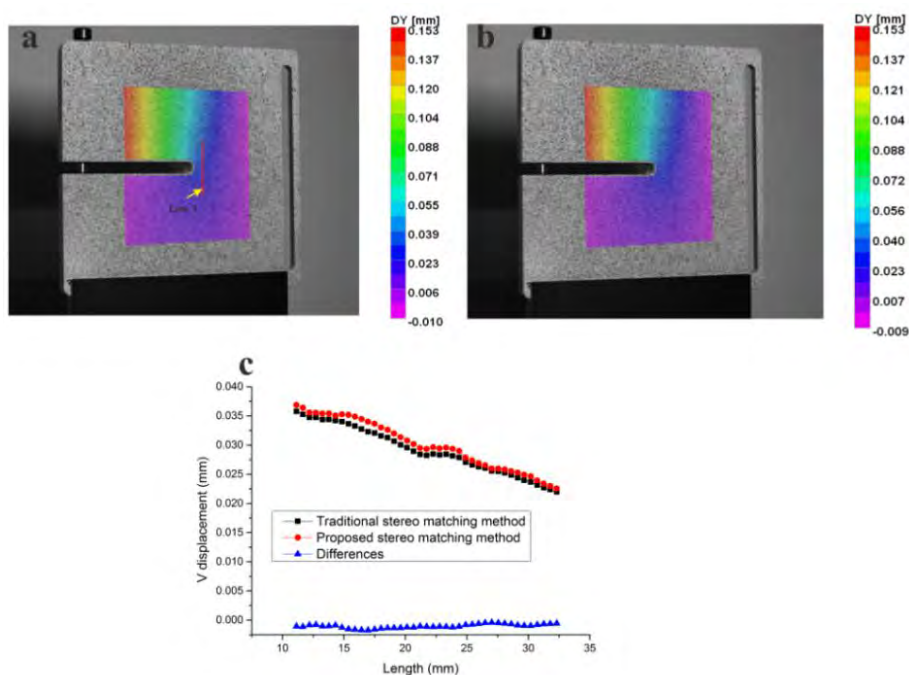


图 3.25 (a)使用传统的立体匹配算法计算得到的 V 位移场;(b)使用所提出立体匹配算法计算得到的 V 位移场;(c)两种立体匹配算法计算结果在线 1 上的差别。

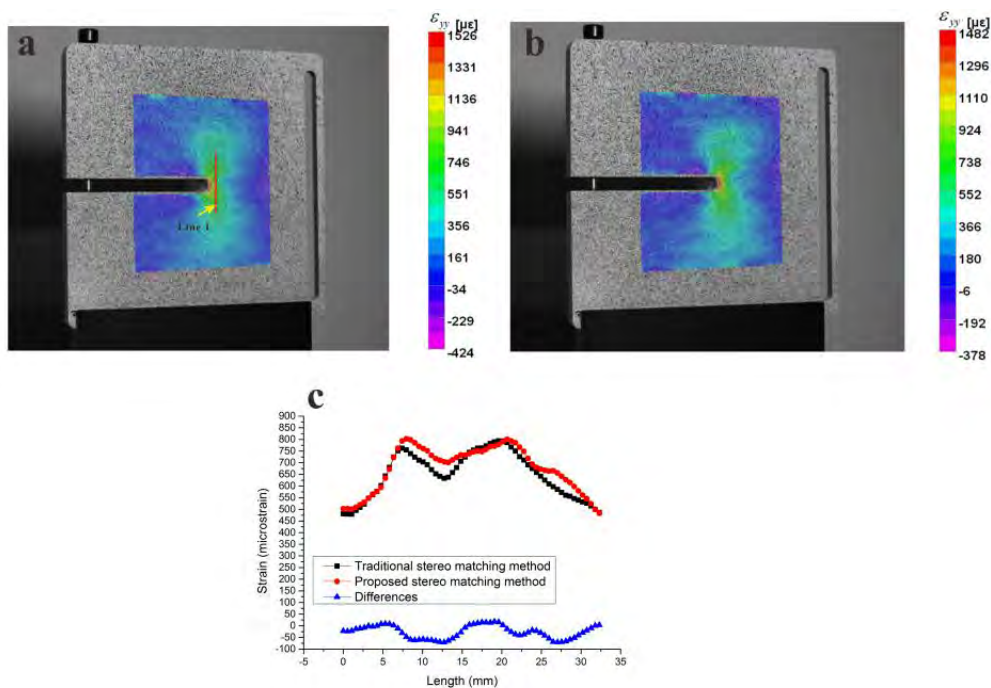


图 3.26 (a)使用传统的立体匹配算法计算得到的 ε_{yy} 应变场；(b)使用所提出立体匹配算法计算得到的 ε_{yy} 应变场；(c)两种立体匹配算法计算结果在线 1 上的差别。

3.6.3.2 可行性理论分析

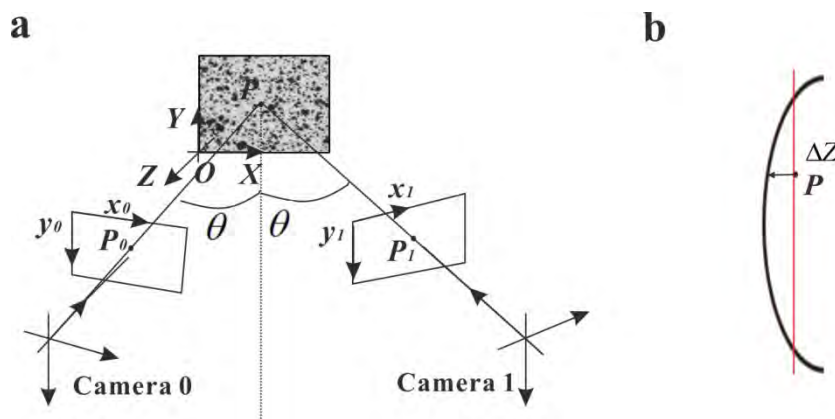


图 3.27 试样轻微弯曲的简化理论分析：(a)在同一高度对称分布的立体视觉；(b)平面物体的轻微弯曲。

对于章节 4.1 中的实验，如果试样在加载过程中发生了轻微的弯曲，则试样表面不再是平面。在这种情况下，必须得考虑所提出算法的适用性。为了简化分析，本文采用了一个简化的模型。如图 3.27 (a)所示，两个相机被对称布置且在同一高度。对于图 3.27 (b) 中的红线（代表平面表面），左右图像坐标系之间的关系如下所示：

$$\begin{cases} x_1 = f(x_0) \\ y_1 = y_0 \end{cases} \quad (3.23)$$

对于点 P ，可以得到

$$\begin{cases} x_1 = x_0 - \Delta x \\ y_1 = y_0 \end{cases} \quad (3.24)$$

其中 Δx 为点 P 在左右图像坐标中的差别。由于轻微的弯曲，对于点 P

$$x_0' = x_0 + \left(-\frac{\Delta Z}{Z}\right) \cos \theta (x_0 - c_{x0}) + \Delta Z \sin \theta \frac{ImageSize}{FOV} \quad (3.25)$$

$$x_1' = x_1 + \left(-\frac{\Delta Z}{Z}\right) \cos \theta (x_1 - c_{x1}) - \Delta Z \sin \theta \frac{ImageSize}{FOV} \quad (3.26)$$

$$y_0' = y_0 + \left(-\frac{\Delta Z}{Z}\right) \cos \theta (y_0 - c_{y0}) \quad (3.27)$$

$$y_1' = y_1 + \left(-\frac{\Delta Z}{Z}\right) \cos \theta (y_1 - c_{y1}) \quad (3.28)$$

其中 ΔZ 是点 P 因为轻微弯曲所引起的离面位移。假设两个相机的主点位置都在图像中心，根据公式(3.25)(3.26)(3.27)(3.28)，可以得到如下公式：

$$\begin{cases} x_1' = x_0' - \Delta x + \left(\frac{\Delta Z}{Z}\right) (\Delta x) \cos \theta - 2\Delta Z \sin \theta \frac{ImageSize}{FOV} \\ y_1' = y_0' \end{cases} \quad (3.29)$$

基于所提出的算法和公式(3.24)中的原始模型，公式(3.29)中因轻微弯曲引起的匹配误差为 $\left(\frac{\Delta Z}{Z}\right) (\Delta x) \cos \theta - 2\Delta Z \sin \theta \frac{ImageSize}{FOV}$ 。

在章节 4.1 中，夹角 θ 约为 15 度，左右图像坐标的差别小于 100 像素，工作距离约为 300 毫米，图像尺寸约为 2000 像素，视场大小约为 200 毫米。如果允许的匹配误差是 0.01 像素的话，因轻微弯曲引起的离面位移必须小于 0.002 毫米。

3.7 小结

本章主要介绍了实时数字图像相关测量方面的工作。提出了基于种子点扩散的并行计算方法，并将其用于实时数字图像相关测量。通过 CPU 多线程并行计算，成功将二维实时数字图像相关用于土木工程准静态实验测量和实验室地震实时加载控制，使用普通的笔记本电脑即可完成 2Hz 的现场实时测量。成功地将三维实时数字图像相关测量用于人体脉搏测量中，实现了 5000 个计算点 10Hz 的实时测量，取得了很好的应用效果。同时，为了提高平面物体的实时计算效率，基于单投影变换，还提出了一种高效率的立体匹配算法。这种立体匹配算法可以显著地提高三维数字图像相关的计算效率。

未来，我们将致力于将实时数字图像相关方法应用于更多的测量领域，尤其是在土木工程领域。另外，进一步提高数字图像相关方法计算效率也是我们长期努力的目标，如芯片级别的数字图像相关运算。

第四章 基于散斑特征匹配的大视场三维数字图像相关高精度标定方法

4.1 引言

在实际工程测量中, 三维数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)方法经常被用于工程构件的变形测量, 如风力叶片[111][112]、汽车顶板[43]、火箭发动机和管道[66]等。一般工程构件的体积都比较大, 对测量视场有较高的要求。将三维数字图像相关用于大视场测量时, 存在两个问题: 首先由于相机的分辨率是有限的, 视场的增大会导致测量空间分辨率的降低; 另外, 常规使用的平面标定法在大视场条件下实施起来非常不方便, 且加工大的平面标定板是非常昂贵的。为了解决第一个问题, 研究者们提出使用多相机的方法来提高测量空间分辨率。Chen 和 Yang 等[65][113]基于多相机标定提出了一种多相机三维数字图像相关方法。Dong 等[114]提出了一种基于摄影测量的多相机外参标定方法, 可以实现非重叠区域的测量系统外参标定。为了解决第二个问题, 研究者们亦提出了很多办法。Ghorbani 和 Sutton 等[115]提出使用小的标定板在视场的多个区域标定多次。这样的标定方法会大幅度增加标定时间, 同时标定板上的角点位置会因占的像素过少导致难以识别。即使可以识别到角点位置信息, 其识别精度亦得不到保证。在栅线投影测量中, An 和 Zhang 等[116]提出使用大范围三维传感器来辅助标定, 如微软的 Kinect。

为了实现三维数字图像相关的大视场高精度变形测量, 本文将介绍一种基于散斑特征匹配的大视场相机标定方法。将散斑匹配[14][15][16]和经典的相对定向算法[70][117][118]相结合, 实现大视场条件下相机外参的实时标定, 且不需要额外的硬件辅助。该方法利用左右相机图像中点的匹配来建立极线约束, 从而标定出相机之间的相对外参。散斑匹配则可以保证左右相机图像匹配的高精度。相机内参可以提前标定且内参在测量过程中是保持不变的。为了提前标定相机内参, 使用摄影测量方法[1][119]对贴在墙上的标记点进行重构作为标定物。

在章节 4.2 中, 将首先介绍常用的三维数字图像相关立体标定方法, 其中包括单相机内参标定和双相机外参标定。在章节 4.3 中, 将详细介绍用于大视场的散斑特征匹配标定方法, 包括相机内参标定方法和外参标定方法。在章节 4.4 中, 通过四点弯实验和混凝土柱压缩实验验证了所提出标定方法的有效性。在章节 4.5 中, 将所提出的方法用于球墨铸铁圆柱形容器跌落实验并取得了很好的效果。章节 4.6 是本章的小结。

4.2 三维数字图像相关立体标定

在三维数字图像相关中, 相机标定是一个非常重要的环节。标定参数对于三维重构是非常重要的, 而三维重构则是三维测量的一个基础环节。同时, 相机标定得到的基础矩阵可以用于建立极线约束, 从而减少立体匹配的搜索范围。

由于高精度和易实现的特性, 平面标定法[53][120]是目前最常用的一种标定方法。使用平面标定法, 只需要在实验前或实验后采集标定板不同姿态下的图片即可完成标定。为了实

现高精度标定，文献[121]中推荐采集至少 50 组不同姿态下的图片完成标定。张正友[53]提出的标定方法是计算机视觉领域中最常用的标定方法，该方法的缺点在于标定精度会受到标定板加工精度影响。为此，文献[122][123]中提出使用光束平差法，将标定板的三维坐标同样作为待求解参数进行迭代。该方法的优点在于不再需要高精度的标定板，但是其尺度信息[117][118]仍然需要高精度已知距离的两点确定。在实际测量中，如果标定板的加工精度非常高，张正友提出的标定方法与使用光束平差的标定方法在标定精度上其实没有区别。如图 4.1 所示，棋盘格标定图案和圆点标定图案是两种常规使用的标定图案。与圆点标定图案相比，棋盘格标定图案对投影变换具有更强的鲁棒性，因为其特征为一个角点，而圆点标定图案中的圆则会因为投影变换发生畸变。与棋盘格标定图案相比，圆点标定图案则对图像虚焦具有更强的鲁棒性。显微测量时，测量系统容易产生虚焦，这种情况下圆点标定板更加推荐使用。

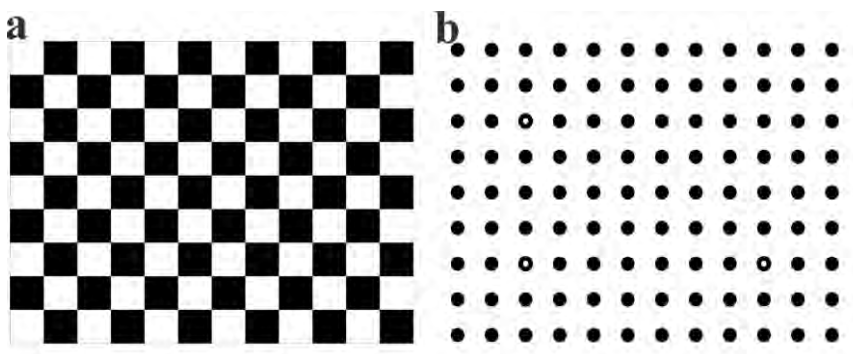


图 4.1 常规使用的标定图案：(a)棋盘格标定图案；(b)圆点标定图案。

重投影误差一般用于衡量系统标定精度，通常认为重投影误差小于 0.1 像素时的标定精度是可以接受的。对于操作得当的标定，通常重投影误差都小于 0.05 像素，甚至可以达到 0.01 像素以下[125]。

4.2.1 单相机内参标定

4.2.1.1 初值计算

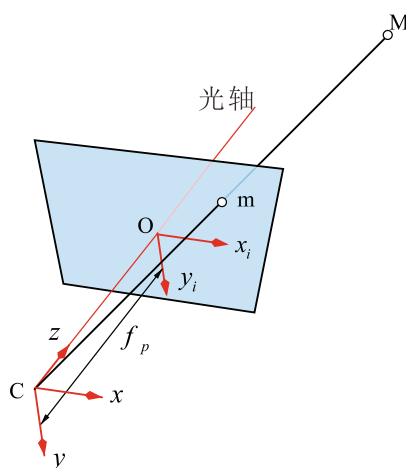


图 4.2 透视投影成像几何示意图。

单相机标定的主要目的是标定相机的内参，目前较为常用的是张正友提出的平面标定法

[53], 本文为了实现高精度标定采用了包含光束平差[123]的标定方法。

一个空间的三维点坐标可以表达为 $M = [X, Y, Z, 1]^T$, 其对应的图像坐标为 $m = [u, v, 1]^T$ 。三维空间点和其在图像上投影点的关系可以表达为

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & t_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & t_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

其中 s 为比例因子, P 为相机的投影矩阵, R 和 T 分别为世界坐标系相对于相机坐标系的旋转和平移, A 为相机的内参, 可以表达为

$$A = \begin{bmatrix} f_x & f_s & c_x & 0 \\ 0 & f_y & c_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

其中 c_x 和 c_y 是主点坐标, f_x 和 f_y 分别是图像 u 和 v 轴的等效焦距, f_s 是用于描述两个图像轴偏斜度的参数。

对于平面标定, 则可以将世界坐标定于标定平面上, 也即 $Z=0$ 。公式(4.1)可以简化为

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & t_x \\ R_{21} & R_{22} & t_y \\ R_{31} & R_{32} & t_z \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

假设不存在图像轴偏斜, 可以将公式(4.3)写为

$$\begin{aligned} u &= \eta_1 + \eta_3 X + \eta_4 Y - \eta_7 u X - \eta_8 u Y \\ v &= \eta_2 + \eta_5 X + \eta_6 Y - \eta_7 v X - \eta_8 v Y \end{aligned} \quad (4.4)$$

其中 $\eta_1 = c_x + \frac{f_x t_x}{t_z}$, $\eta_2 = c_y + \frac{f_y t_y}{t_z}$, $\eta_3 = \frac{c_x R_{31} + f_x R_{11}}{t_z}$, $\eta_4 = \frac{c_x R_{32} + f_x R_{12}}{t_z}$, $\eta_5 = \frac{c_y R_{31} + f_y R_{21}}{t_z}$, $\eta_6 = \frac{c_y R_{32} + f_y R_{22}}{t_z}$, $\eta_7 = \frac{R_{31}}{t_z}$, $\eta_8 = \frac{R_{32}}{t_z}$ 。

对于公式(4.4), 其中共有 8 个未知数, 所以至少需要 4 个三维点的坐标及其在图像上的投影坐标即可对其进行求解, 一般直接使用最小二乘的方法进行求解。

为了计算相机内参和外参, 求解如下的方程:

$$\begin{bmatrix} (\eta_3 \eta_8 + \eta_4 \eta_7) & \eta_5 \eta_6 & (\eta_5 \eta_8 + \eta_6 \eta_7) & \eta_7 \eta_8 \\ 2(\eta_3 \eta_7 + \eta_4 \eta_8) & \eta_5^2 - \eta_6^2 & 2(\eta_5 \eta_7 + \eta_6 \eta_8) & \eta_7^2 - \eta_8^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \\ \xi_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\eta_3 \eta_4 \\ \eta_4^2 - \eta_5^2 \end{Bmatrix} \quad (4.5)$$

其中 $\xi_1 = -c_x$, $\xi_2 = \left(\frac{f_y}{f_x}\right)^2$, $\xi_3 = -c_y \left(\frac{f_x}{f_y}\right)$, $\xi_4 = c_y^2 \left(\frac{f_x}{f_y}\right)^2 + c_x^2 + f_x^2$ 。公式(4.5)中共有 4 个未知数, 因此需要至少不同视角下的两组方程才能对其进行求解。计算得到 $\{\bar{\xi}\}$ 后可以通过

如下方程直接得到相机内参:

$$\begin{aligned}
 c_x &= -\xi_1 \\
 c_y &= -\frac{\xi_3}{\xi_2} \\
 f_x &= \sqrt{\xi_4 - \frac{\xi_3^2}{\xi_2} - \xi_1^2} \\
 f_y &= \sqrt{\frac{\xi_4 - \frac{\xi_3^2}{\xi_2} - \xi_1^2}{\xi_2}}
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

最后，根据公式(4.6)中计算得到的内参可以计算得到每个视角下的相机平移向量：

$$\begin{cases} 0.5t_z^2 \\ t_x \\ t_y \end{cases} = \begin{cases} \left(\frac{(\eta_3 - \eta_7 c_x)^2 + (\eta_4 - \eta_8 c_x)^2}{f_x^2} + \frac{(\eta_5 - \eta_7 c_y)^2 + (\eta_6 - \eta_8 c_y)^2}{f_y^2} + \eta_7^2 + \eta_8^2 \right)^{-1} \\ (\eta_1 - c_x) \frac{t_z}{f_x} \\ (\eta_2 - c_y) \frac{t_z}{f_y} \end{cases} \tag{4.7}$$

旋转矩阵的计算如下：

$$\begin{aligned}
 R_{11} &= \frac{t_z(\eta_3 - \eta_7 c_x)}{f_x} \\
 R_{12} &= \frac{t_z(\eta_4 - \eta_8 c_x)}{f_x} \\
 R_{21} &= \frac{t_z(\eta_5 - \eta_7 c_y)}{f_y} \\
 R_{22} &= \frac{t_z(\eta_6 - \eta_8 c_y)}{f_y} \\
 R_{31} &= t_z \eta_7 \\
 R_{32} &= t_z \eta_8
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

公式(4.8)中只有旋转矩阵的前两列，旋转矩阵的最后一列可以通过前两列的交叉乘积得到。由于上述求解过程不能保证旋转矩阵 R 的正交性，可以通过最佳正交逼近 $R=UV^T$ 来计算旋转矩阵 R ，其中矩阵 U 和 V 可以通过 SVD 分解得到[53]。

4.2.1.2 镜头畸变

上述求解过程中没有考虑镜头畸变。对于工业镜头，一般分为径向畸变和切向畸变。径向畸变主要是由于光学镜头的径向曲率变换引起的，该畸变是对称的，通常认为主点是其对称中心。径向畸变主要使像点沿径向产生偏差，如图 4.3 所示，正的径向形变量会使图像点向远离图像中心的方向移动，称为枕形畸变；负的径向形变量会使图像点向靠近图像中心的方向移动，称为桶形畸变。切向畸变则主要由多个镜片在组装时的镜片中心偏离光轴引起的。镜头畸变模型表达式如下：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \tag{4.9}$$

$$\begin{aligned}x' &= x/z \\y' &= y/z\end{aligned}\quad (4.10)$$

$$\begin{aligned}x'' &= x'(1+k_1r^2+k_2r^4)+2p_1x'y'+p_2(r^2+2x'^2) \\y'' &= y'(1+k_1r^2+k_2r^4)+p_1(r^2+2y'^2)+2p_2x'y'\end{aligned}\quad (4.11)$$

其中 $r^2 = x'^2 + y'^2$ ， k_1 和 k_2 为径向畸变系数， p_1 和 p_2 为切向畸变系数。考虑畸变的图像坐标为：

$$\begin{aligned}u &= f_x x'' + f_s y'' + c_x \\v &= f_y y'' + c_y\end{aligned}\quad (4.12)$$

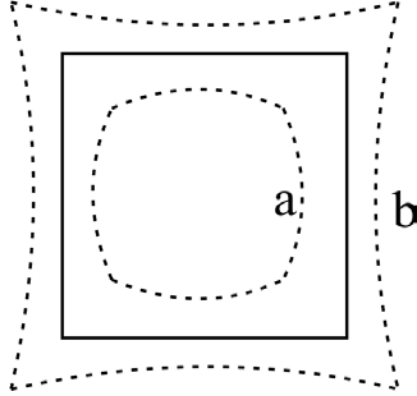


图 4.3 径向畸变：(a)桶形畸变；(b)枕形畸变。

4.2.1.3 光束平差法

相机参数初值计算得到之后，就可以通过光束平差法对相机内参、相机外参、镜头畸变以及空间三维坐标进行整体优化。相机内参包括公式(4.2)中的 5 个参数，相机外参为每一个视角下相机坐标系与世界坐标系之间的旋转和平移，空间三维坐标为标定板上角点的空间坐标。如果标定板上存在 N 个点且共有 M 个视角下的标定板图像，则优化的目标函数为：

$$E(Int, Ext, Dis, M) = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \|m_{ij} - \hat{m}_{ij}(Int, Ext_j, Dis, M_i)\|^2 \quad (4.13)$$

其中 m_{ij} 为第 j 个视角下第 i 个角点的图像坐标， $\hat{m}_{ij}(Int, Ext_j, Dis, M_i)$ 为第 j 个视角下第 i 个角

点根据投影模型和畸变模型计算的图像坐标， Ext_j 为第 j 个视角下的相机坐标系与世界坐标系的相对外参， M_i 为标定板上第 i 个角点的世界坐标。公式(4.13)可使用非线性优化算法，如 Levenberg-Marquardt 算法[124]进行优化。

由于该方法在标定过程中将标定板的三维坐标同样作为待求解参数进行迭代，因此其标定精度不会受到标定板加工精度的限制。公式(4.13)中的角点图像坐标需要通过角点识别算法进行计算，因此标定精度很大程度的依赖于角点识别的精度。文献[125]中通过使用模板匹配算法来提高角点识别精度，从而大大提高了标定精度。

4.2.2 双相机外参标定

对于双目立体视觉测量系统，不仅需要标定每个相机的内参，还需要标定两个相机之间的相对外参，也即两个相机坐标系之间的相对旋转和平移。在三维数字图像相关中，由于两

个相机的视场是重叠的，因此可以在标定相机内参的过程中同时标定两个相机的相对外参。

在公式(4.13)中，对于每一个相机，已经计算了相机坐标系与世界坐标系之间的相对外参。对于如图 4.4 中的两个相机的相对外参，根据坐标变换有：

$$T_{O_1-O_2} \bullet T_{O_w-O_1} = T_{O_w-O_2} \quad (4.14)$$

其中的 $T_{O_1-O_2}$ 为待求量，而 $T_{O_w-O_1}$ 和 $T_{O_w-O_2}$ 为已知量。对于多个视角，为了提高计算的精度和稳定性，一般使用最小二乘的方法对两个相机之前的相对外参进行计算。

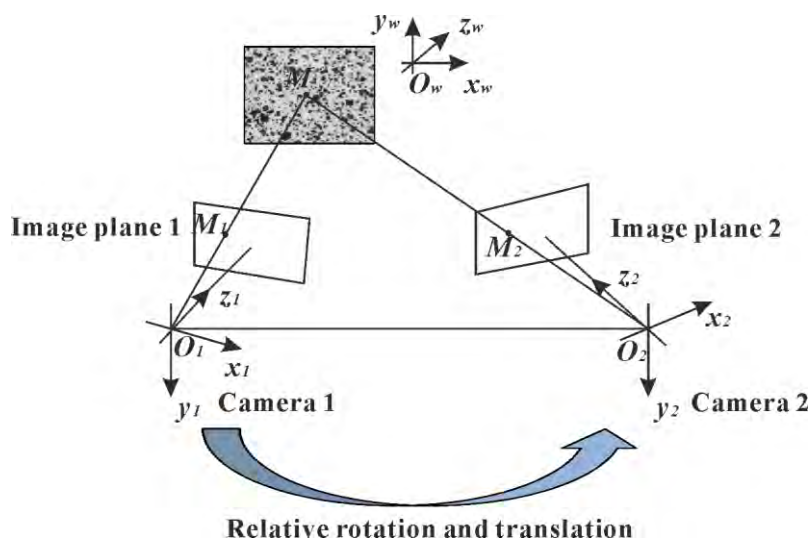


图 4.4 双相机系统相对旋转和平移标定。

4.3 基于散斑特征匹配的大视场立体标定方法

平面标定法在大多数情况都是有效的，然而该方法有一定的缺点和限制。在大视场条件下，该方法难以实施，且加工大的标定板是非常昂贵的。这样的缺点限制了该方法在大型工程构件测量中的应用。为此，本文提出基于散斑特征匹配的标定方法并将该方法用于大视场条件下三维数字图像相关系统外参标定[126]。本章详细介绍了该方法的实现、优点和局限性。

4.3.1 基于摄影测量的相机内参标定

与常规的标定方法相同，相机内参标定是系统标定的第一步。为了实现大视场条件下相机的内参标定，本文采用了基于摄影测量的相机内参标定方法。将编码标记点贴在实验室的墙上，通过摄影测量中的单相机三维重构方法对墙上的标记点进行三维重构[119]，如图 4.5 所示。通过这样的方法，整面墙即可作为一个大的标定板来使用。在实验室进行内参标定时，根据实际的视场和工作距离，将相机调整到合适的焦距从而可以清晰的看到墙上的编码标记点。移动相机从不同的位置采集墙上编码标记点的图片，基于根据编码号和重构的三维坐标，即可使用章节 4.2.1 中的算法进行内参的求解。在内参标定之后，相机被带到实验现场进行实验和测量。通过机械固定，相机内参在标定后几乎保持不变。

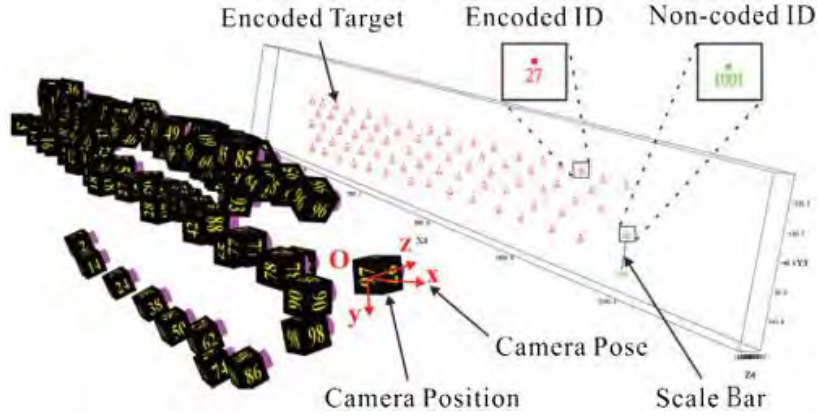


图 4.5 摄影测量方法重构标记点三维坐标。

4.3.2 基于散斑匹配的相机外参标定

将相对转动向量定义为 $(n_x, n_y, n_z)^T$ ，将相对平移向量定义为 $(t_x, t_y, t_z)^T$ 。对于三维空间中的一点 M ，如图 4.4 所示，其三维坐标可以表示为 $M(X, Y, Z)^T$ 。基于小孔成像模型， $M_1(x_1, y_1, f_L)^T$ 和 $M_2(x_2, y_2, f_R)^T$ 是点 M 在左右相机坐标系的投影。点 M 在二维图像坐标系上投影的坐标为 $M_1(u_1, v_1)^T$ 和 $M_2(u_2, v_2)^T$ 。相机坐标系和图像坐标系之间的变换可以写成：

$$\begin{cases} x_1 = (u_1 - u_{0L}) \frac{1}{S_{xL}} \\ y_1 = (v_1 - v_{0L}) \frac{1}{S_{yL}} \end{cases} \quad (4.15)$$

$$\begin{cases} x_2 = (u_2 - u_{0R}) \frac{1}{S_{xR}} \\ y_2 = (v_2 - v_{0R}) \frac{1}{S_{yR}} \end{cases} \quad (4.16)$$

其中 (u_0, v_0) 是主点的坐标， (S_x, S_y) 是图像水平和垂直方向上的比例因子（单位为像素数/单位公制长度），下标 L 和 R 分别代表左右相机。主点坐标和比例因子是内参且可以被预先标定。

如图 4.4 所示，点 M ， O_1 和 O_2 在同一个平面上，所以可以得到

$$\overline{O_1 O_2} \cdot (\overline{O_1 M_1} \times \overline{O_2 M_2}) = 0 \quad (4.17)$$

在右相机坐标系， O_1, M_1 可以被表示为

$$O_1 = R[0 \ 0 \ 0]^T + T, M_1 = R[x_1 \ y_1 \ f_L]^T + T \quad (4.18)$$

其中 $T = (t_x, t_y, t_z)^T$ 是平移向量， R 是旋转矩阵且可以由旋转向量通过 Rodrigues 变换得到。从公式(4.17)，可以有

$$\overline{O_1 O_2} = -T \quad (4.19)$$

$$\overline{O_1 M_1} = R[x_1 \ y_1 \ f_L] = [X_1 \ Y_1 \ Z_1] \quad (4.20)$$

$$\overline{O_2M_2} = [x_2 \ y_2 \ f_R] = [X_2 \ Y_2 \ Z_2] \quad (4.21)$$

将公式(4.19)(4.20)(4.21)带入到公式(4.17)中, 可以得到如下公式

$$t_x(Y_1Z_2 - Y_2Z_1) + t_y(X_2Z_1 - X_1Z_2) + t_z(X_1Y_2 - X_2Y_1) = 0 \quad (4.22)$$

对于世界坐标系的每一个点 M_i , 可以定义

$$F_i = t_x(Y_1Z_i - Y_2Z_i) + t_y(X_2Z_i - X_1Z_i) + t_z(X_1Y_i - X_2Y_i) \quad (4.23)$$

最终的求解方程可以表示为

$$(n_x, n_y, n_z, t_x, t_y, t_z)_{opt} = \arg \min \sum_{i=1}^n (F_i)^2 \quad (4.24)$$

其中 n 是世界坐标系中点的个数。

为了得到两个相机之间相对旋转和平移参数的最优值, 非线性迭代算法(如 Levenberg-Marquardt[124])可以被使用。在公式(4.15)和公式(4.16)中, 使用数字图像相关方法对左右图像的对应点进行匹配, 图像坐标 (u_1, v_1) 和 (u_2, v_2) 就成了已知量。

如果相机是水平放置的, 可以将平移向量归一化为 $(1, t_y/t_x, t_z/t_x)^T$ 。类似的, 如果相机是垂直放置的, 将平移向量归一化为 $(t_x/t_y, 1, t_z/t_y)^T$ 。因此, 共有 5 个参数需要求解, 也就是说至少需要左右图像中的 5 对匹配点来计算这 5 个参数, 如图 4.6 所示。在三维数字图像相关中, 左右图像中有数千个点可以被匹配上, 因此可以简单和精确地求解这 5 个参数。如果相机是水平放置的, 将旋转向量设为 $(0, 0, 0)^T$, 将平移向量设为 $(1, 0, 0)^T$ 。如果相机是垂直放置的, 则将平移向量设为 $(0, 1, 0)^T$ 。尽管初始参数没有非常精确, 但足以收敛到正确的结果。然而, 比例因子仍然是不知道的。为了获取比例因子, 可以使用图像中已知距离的两点来对平移向量中的比例进行校正, 图 4.7 即为摄影测量中确定比例信息的标定尺。值得一提的是, 如果只需要计算应变的话, 三维数字图像相关测量中的尺度信息是不需要的, 即使被测物是曲面的, 因为应变是一个无量纲的量。



图 4.6 左右图像中的散斑匹配点。



图 4.7 摄影测量中的标定尺。

4.3.3 基于散斑匹配的标定方法的优势和限制

4.3.3.1 基于散斑匹配标定方法的优势

从图 4.5 中可以看到，传统的平面标定法在实验中难以实施，因为测量视场太大了。本章提出的基于散斑匹配的相机标定方法则可以被用于这类实验中。基于散斑匹配的相机标定方法的优势如下：

- 现场测量无需标定板。使用本文提出的标定方法，在现场测量是不需要标定板的，这样的标定方法更适合于实际工程测量。
- 快速、简单、自动标定。现场相机安装之后，实验可以立即开展，实验图片可以立即采集，而相机间旋转和平移的标定可以通过分析实验图片完成。
- 人工成本和时间成本降低。避免了现场测量时繁琐的标定，人工成本可以大幅度降低，实验时间也可以大幅度节省。

4.3.3.2 基于散斑匹配标定方法的限制

虽然基于散斑匹配的标定方法有如上的优势，但其中也存在一些限制：

- 用于标定的散斑区域必须占视场的 50% 上，如果占的视场过小的话，则需要将被测散斑区域至于图像中心区域；
- 由于该方法只有一幅图来标定相机的相对外参，其求解精度略低于章节 4.2.2 中的最小二乘方法。

4.4 标定方法的实验验证

4.4.1 四点弯实验验证

为了验证所提出方法的可行性和精度，开展了一个塑料试样的四点弯实验。试样的几何尺寸如图 4.8 所示。使用喷漆在试样表面制作了黑白的人工散斑。使用两台分辨率为 2048×2048 像素的相机从两个不同方向同时采集试样表面的图像。左右相机的相距分别为 25.633 毫米和 25.635 毫米。如图 4.8 所示，一个包含 10050 (201×250) 个点的矩形测量区域被选

取用于计算。计算步长为 5 个像素，模板的大小为 31×31 像素。

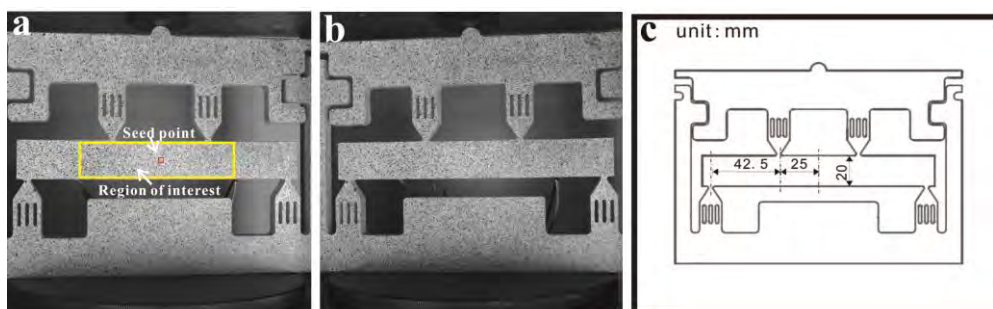


图 4.8 四点弯塑料试样的实验图像：(a)左相机图像；(b)右相机图像；(c)试样几何尺寸。

表4.1 使用平面标定法和本文提出标定方法的标定外参值对比

Extrinsic parameters	Calibrated extrinsic parameters		
	Planar method	Speckle-based method	Relative error (%)
n_x (deg)	0.687	0.637	-7.278
n_y (deg)	14.288	14.416	0.895
n_z (deg)	-1.062	-1.067	0.471
t_x (mm)	-60.391	-60.489	0.162
t_y (mm)	0.442	0.619	40.045
t_z (mm)	12.108	11.878	1.899

表 4.1 为使用所提出方法和传统的平面标定法标定的结果对比，平面标定法使用 PMLAB 3D-DIC[®]来实施。在所提出方法中，试样的几何尺寸被用于确定平移向量的尺度信息。从表 4.1 可以看到，由平面标定法和所提出标定方法标定出的外参几乎是相同的。除了 t_y 以外，表中的相对百分比误差都很小。然而， t_y 是一个很小的值，因此 40.045% 的相对误差并不意味着一个很大的误差。

图 4.9(a)和(b)为使用平面标定法时三维数字图像相关方法计算得到的 ε_{xx} 应变场和 ε_{yy} 应变场。图 4.9(c)和(d)为使用本文提出方法时三维数字图像相关方法计算得到的 ε_{xx} 应变场和 ε_{yy} 应变场。图 4.9(e)和(f)为两种标定方法下计算结果的不同。从图 4.9 中可以看出，在两种不同标定方法下，三维数字图像相关方法计算的应变场结果几乎是一致的。 ε_{xx} 和 ε_{yy} 应变场最大的不同为 36 微应变。一般来说，三维数字图像相关的应变测量精度低于 50 个微应变，因此这么小的差异是可以接受的。从图 4.9 中可以发现，在应变测量精度上，两种标定方法的精度是没有明显差异的。测量结果证明了本文提出的基于散斑特征匹配标定方法的有效性和实用性。

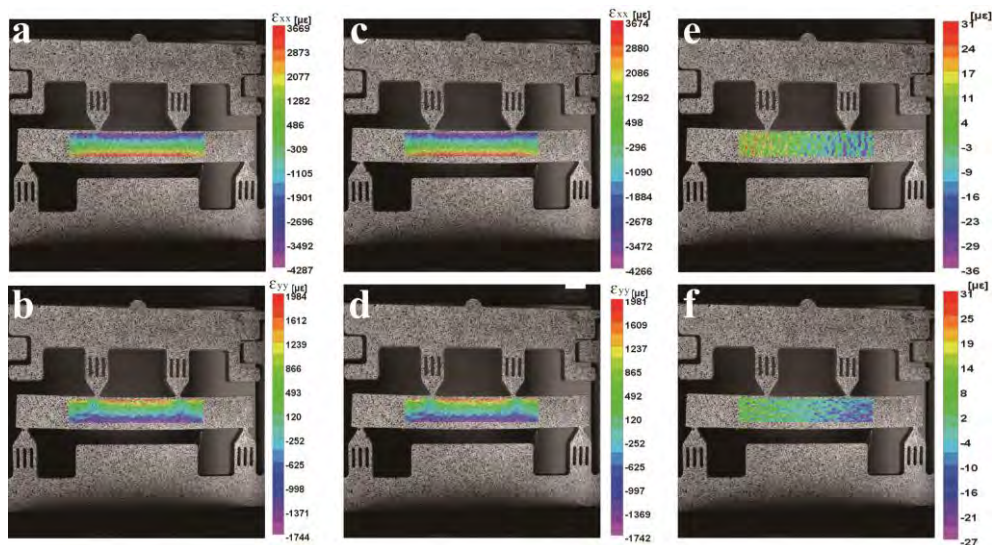


图 4.9 使用平面标定法和本文提出方法时三维数字图像相关计算结果对比：使用平面标定法的计算结果(a) ε_{xx} 应变场和(b) ε_{yy} 应变场；使用本文提出方法的计算结果(c) ε_{xx} 应变场和(d) ε_{yy} 应变场；两种标定方法下计算结果的不同(e) ε_{xx} 应变场和(f) ε_{yy} 应变场。

4.4.2 混凝土柱压缩实验验证

为了进一步验证所提出标定方法在曲面物体测量上的可行性,开展了一个混凝土柱单轴压缩实验,实验中的标定采用本文提出的基于散斑特征匹配的标定方法。试样的几何尺寸如图 4.10 所示。应变片被贴在试样表面,然后在试样表面喷上散斑。应变片的尺寸为 3×100 毫米。两台分辨率为 2048×2448 像素的相机被用于从两个不同的方向记录试样图片,相机的采集频率被设为 1Hz。在实验中,左右相机的相距分别为 25.298 毫米和 25.394 毫米。如图 4.10(a)所示,两个矩形的测量区域被选取用于计算,计算的步长为 7 个像素,计算的模板大小为 31×31 像素。在测量区域 1 中,共有 3×98 个点,这个区域主要用于三维数字图像相关的计算结果和应变片测量结果的对比。在测量区域 2 中,共有 91×77 个点,这个区域主要用于验证形貌重建的精度。尺度信息由试样的高度确定,试样的高度为 300 毫米。

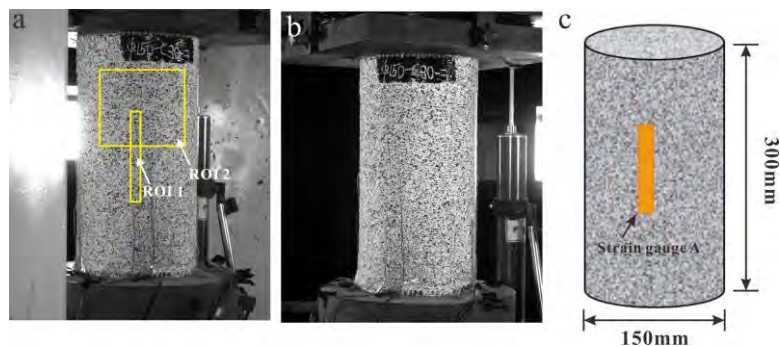


图 4.10 混凝土柱单轴压缩实验：(a)左相机图像；(b)右相机图像；(c)试样几何尺寸。

图 4.11 为应变片测量结果和三维数字图像相关测量结果的对比。从图 4.11 中可以看到，

由三维数字图像相关测量得到的应变值和应变片测得的应变值是几乎一致的。两种方法测得结果之间的最大差异为 202 个微应变。当应变值达到 18945 个微应变时，相对误差仅为 0.89%。测量结果成功地证明了所提出方法的有效性。

图 4.12 为测量区域 2 的三维形貌重构结果。测得的直径为 150.738 毫米，测量标准差为 0.373 毫米。真实的直径应该为 150 毫米，所以测量相对误差仅为 0.49%。测量结果成功证明了所提出标定方法在曲面物体测量上的可行性。

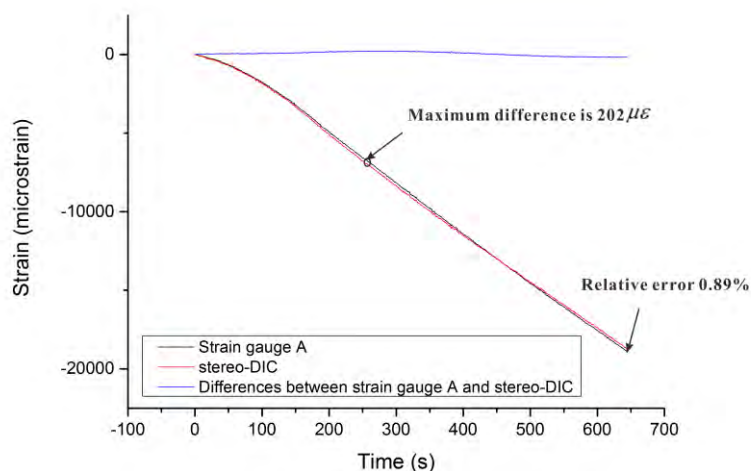


图 4.11 应变片测量结果和三维数字图像相关测量结果的对比。

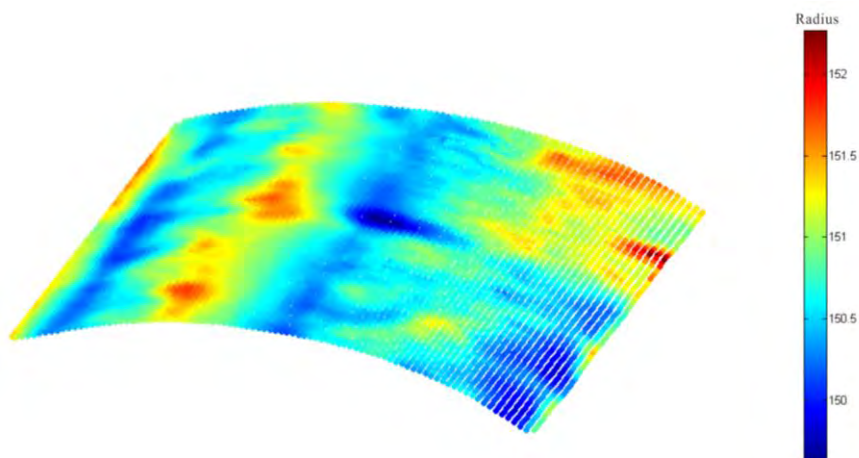


图 4.12 测量区域 2 的三维形貌重构结果。

4.4.3 尺度信息标定

如果想精确地测得形貌和位移，必须要知道尺度信息。为了标定尺度信息，物体上已知的几何尺寸可以被用于确定尺度信息。另外一种常用的方法是使用摄影测量中的标定尺，如图 4.7 所示。在超大视场时，推荐使用全站仪。然而，与形貌和位移不同的是，应变是一个无量纲的量。应变测量是不需要尺度信息的，即使被测物体是曲面。因此，在某些情况下无法标定尺度信息时，所提出的基于散斑特征匹配的标定方法仍然可以用于应变的测量。

4.5 在球墨铸铁圆柱形容器跌落实验中的应用

球墨铸铁圆柱形容器一般用于核废料的保存,因此其安全性能是非常重要的。作为一个应用,使用三维数字图像相关方法结合本文提出的标定方法测量了球墨铸铁圆柱形容器在跌落过程中的表面应变。采集系统包括两台分辨率为 1024×1024 像素的高速相机(Photron FASTCAM SA3, Japan)和两个镜头(Nikon F24, Japan)。高速相机被固定于三角架上。高速相机的采集频率被设置为 1000Hz ,从而完整地记录跌落过程中容器的表面变形。

图 4.13 (a) 为真实的实验图,试样的示意图如图 4.13 (d) 所示。图 4.13 (b) 和 (c) 为左右相机采集的参考图像。试样表面的散斑是用记号笔点的,散斑如图 4.13 (b) 所示。这里值得指出的是水转印散斑场是另一种在大型试样上制作散斑的好方法。

图 4.14 给出了跌落过程中应变片的应变-时间曲线。应变片的位置如图 4.13 (d) 所示。从图 4.14 中可以看出,撞击发生在 2.126 秒且最大的压应变为 6235 个微应变。应变片无法获得全场的应变数据,因此采用三维数字图像相关方法来获取容器表面的全场应变数据。如图 4.13 (b) 所示,测量的视场大小超过 2×2 米。很显然,使用传统的平面标定方法难以获得相机内外参数。为此,将使用本文提出的基于散斑特征匹配的标定方法来进行标定。

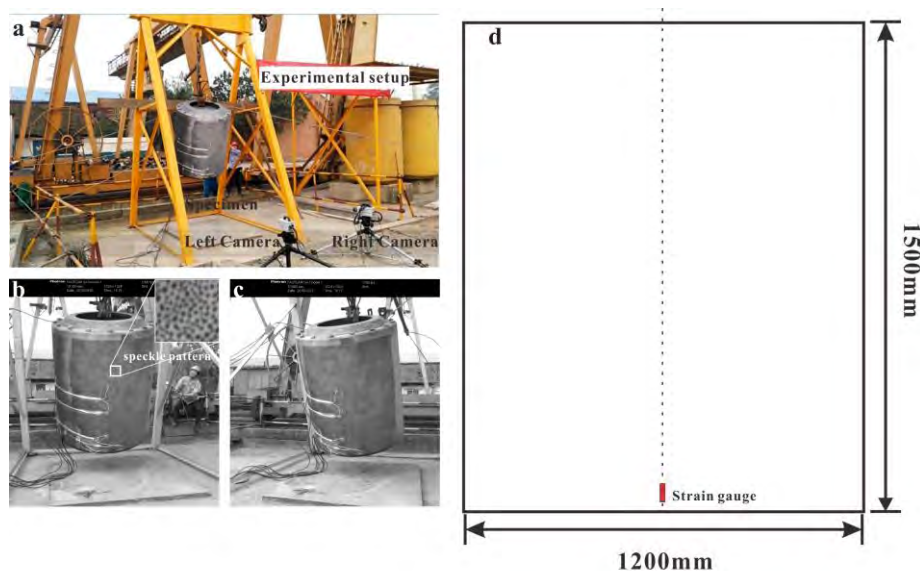


图 4.13 球墨铸铁圆柱形容器跌落实验的实验装置:(a)实验现场图;(b)左相机参考图像;(c)右相机参考图像;(d)实验几何尺寸图。

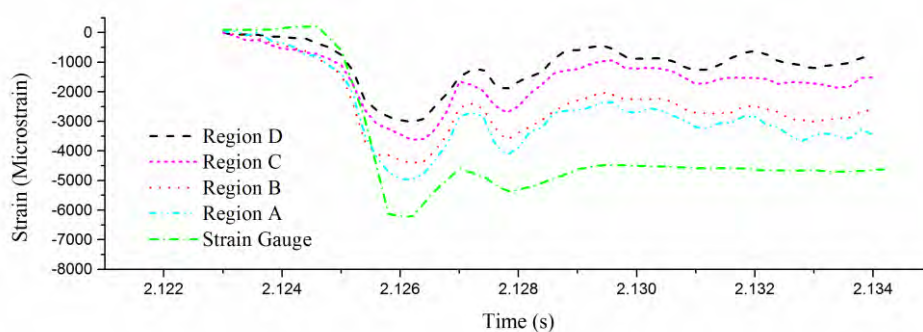


图 4.14 应变片以及图 4.15 中 A-D 测点的应变-时间曲线。

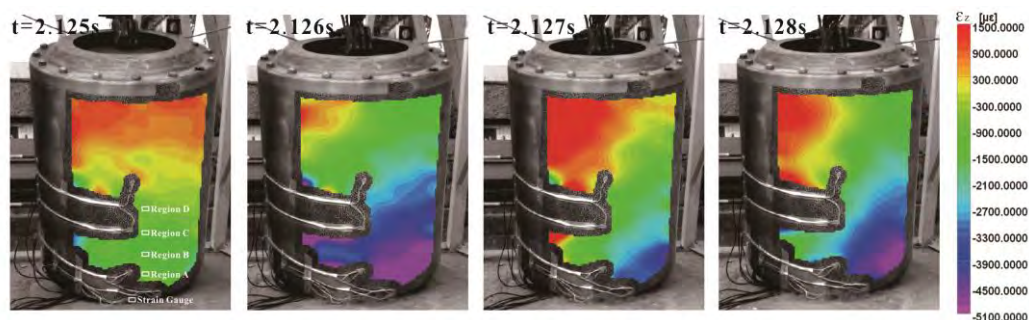


图 4.15 容器撞击地面时的轴向应变场。

相机的内参在实验室提前标定好。左右图像中的对应点通过数字图像相关进行匹配用于标定相机之间的相对外参。在实验中，只有应变需要被测量，因此不需要标定尺度信息。关键计算参数的选择如下：模板为 15×15 像素，步长为 1 个像素，应变窗口为 9×9 个点。图 4.15 为容器撞击地面时用三维数字图像相关方法测量得到的轴向应变场。从图中可以看出，容器的下部受压而上部受拉。同时，对于容器的底部区域，越靠近撞击点压应变越大。图 4.14 中显示了图 4.15 中 A-D 测量的应变-时间曲线。从图中可以看到，在曲线的第一部分，随着时间增加，应变值增大。2.126 秒时应变达到峰值，在峰值后应变值则是随着时间增加而减小。很明显，三维数字图像相关测得的数据与应变片数据趋势是保持一致的。另外，两种方法应变达到峰值的时间是相同的。值得提出的是，计算参数的选择对实验结果有很大的影响，尤其是步长和应变计算窗口。在数字图像相关中，计算参数的选择仍然是一个待解决的问题[128][129][129]。

4.6 小结

本章为了解决实际工程测量中的大视场高精度变形测量问题，提出了一种基于散斑特征匹配的三维数字图像相关标定方法。该方法利用左右相机图像散斑匹配实现相机之间相对外参的高精度标定，不需要额外的硬件辅助。通过四点弯实验验证了该方法的全场应变测量精度，并将该方法的标定参数与平面标定法进行了对比。通过混凝土柱压缩实验验证了该方法对曲面物体测量的可行性，测量结果与应变片保持一致。作为一个应用，使用该方法标定高速三维数字图像相关系统从而实现了球墨铸铁圆柱形容器在跌落过程中的全场应变测量。该方法在巨大视场测量的进一步应用值得期待。另外，使用试样本身对三维数字图像相关系统进行标定将会是一种趋势。

第五章 自标定单镜头实时三维视频引伸计

5.1 引言

在科研和工程领域,确定材料或结构的力学参数是非常重要的。研究者们提出了很多方法来测量力学参数,如单轴拉伸测试[130]、弯曲测试[131]、膨胀测试[132]和高速动态测试[133]。在这些方法中,最常用的方法是使用万能试验机的单轴拉伸或压缩测试,该方法可以测定杨氏模量、泊松比、伸长百分比、屈服强度和破坏强度。为了精确地测量这些力学参数,被测试样表面的应变必须被精确测量。

在材料测试过程中,电阻应变片[134][135]和机械引伸计[136][137]都可以被用于测量试样表面的应变。尽管在很多应用中可以提供很高的测量精度,这些接触式的测量技术会引起很多问题并影响拉伸测量的便利性。当使用应变片时,一般需要将其贴在试样表面且应变片的应变测量的范围在2%以内。对于机械引伸计,重量和附着方法会直接影响到试样的力学响应。同时,应变片和机械引伸计都不能被用于一些极端环境下的测量,如高温和低温环境。

为了克服接触式测量技术的缺点,人们提出了基于数字相机和图像处理技术的非接触式视频引伸计[91][138][139][140][141][142][143][144][145]。目前的视频引伸计可以被分为两类,基于特征的视频引伸计[138][139]和基于灰度的视频引伸计[91][140][141][142][143][144][145]。对于基于灰度的视频引伸计,二维数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)方法一般被用于追踪测点的运动。Zhang等提出了一种基于数字图像相关的双轴视频引伸计并将其用于陶瓷复合格栅板的力学性能测试[140]。Huang等提出了一种自动数字图像相关方法并将其用于螺栓连接夹紧力的实时监控[141]。Wu等提出了一种用于动态位移和应变测试的实时视频引伸计测量方法[91]。Pan等发展了一种先进的视频引伸计用于材料测试中的非接触、实时、高精度应变测量[142]。然而,由于受到离面位移的影响,基于二维数字图像相关的视频引伸计的应变测量精度是不够的。尽管远心镜头已经被证明对离面位移不敏感[146],但是其高成本和有限的测量视场的缺点[146][147]会限制其应用范围。更重要的是,使用远心镜头时,如果存在很大的离面位移,仍然会导致不可忽视的应变误差[146][147]。

为了消除离面位移对二维数字图像相关方法的影响,Pan等采用一个不变形的参考试样来对测得的变形进行矫正,使用普通的二维数字图像相关方法即可实现高精度的应变测量[143]。Bai等提出一种使用大像场镜头和双图像传感器的光学引伸计,在使用矫正板的情况下可以实现2-3个微应变分辨率的应变测量[144]。为了减小离面位移对二维数字图像相关方法的影响,Zhu等提出一种双反射成像方法,通过平均试样前后表面的应变,消除离面刚体运动对应变测量的影响[145]。然而,使用参考试样或者矫正板的方法因为需要在试样上贴一个刚性板,因此在测量中并不是一个实用的选择。双反射成像的方法似乎是一个实用的选择,但是在试样附近使用两个反射镜会使得测量系统更加复杂。

众所周知,三维数字图像相关方法可以同时测量三个方向的位移而不引入面内应变误差[14][146]。然而,三维数字图像相关方法需要两个相机之间的严格同步且需要繁琐的双目系统标定[14],这些问题使得测量非常不方便。最近,单相机三维数字图像相关技术受到了很多的关注。Genovese等提出了一种单相机立体视觉测量系统,在相机和镜头前使用双棱镜

将场景分成两个像，这个两个像可以等效成两个相机从不同方向拍摄的图像[148]。Pankow 等发展了一种单镜头三维数字图像相关系统，使用单个相机和反射镜实现了高速环境下的离面位移测量[149]。Xia 等发展了一种基于衍射的数字图像相关方法，使用单个相机即可实现三维形貌和位移的测量[150]。单镜头三维数字图像相关系统是不需要相机同步的且测量装置更加的紧凑和简单。然而，在目前这些单镜头三维数字图像相关系统[151][152][153]中，仍然需要系统标定或畸变标定，这使得测量非常的不方便。

本文提出了一种自标定单镜头三维视频引伸计用于非接触、无损、高精度应变测量[154]。首先，搭建了一种由一个三角棱镜平面镜和两个平面镜组成的单镜头三维成像系统，用于采集试样表面的立体图像。使用这样的成像装置，相机同步和离面位移影响的问题可以得到解决。同时，提出了一种使用试样参考图像进行系统标定的散斑自标定方法，在该方法中不再需要繁琐的系统标定，使得测量变得更加方便。在散斑自标定方法中，使用二维数字图像相关对左右相机图像中的点进行匹配，从而自动地标定立体系统。此外，采用高效率鲁棒性强的反向组合高斯牛顿算法[79]和一种鲁棒性强的立体匹配策略，实现了高精度实时的立体匹配。

在章节 5.2 中，详细介绍了所提出自标定单镜头三维视频引伸计的原理和方法。在章节 5.3 中，详细介绍了实验过程并给出了实验结果。在章节 5.4 中，讨论了所提出视频引伸计的优点、局限性以及进一步的适用性。章节 5.5 为本章的结论。

5.2 单镜头三维视频引伸计测量装置和原理

5.2.1 单镜头三维视频引伸计测量装置

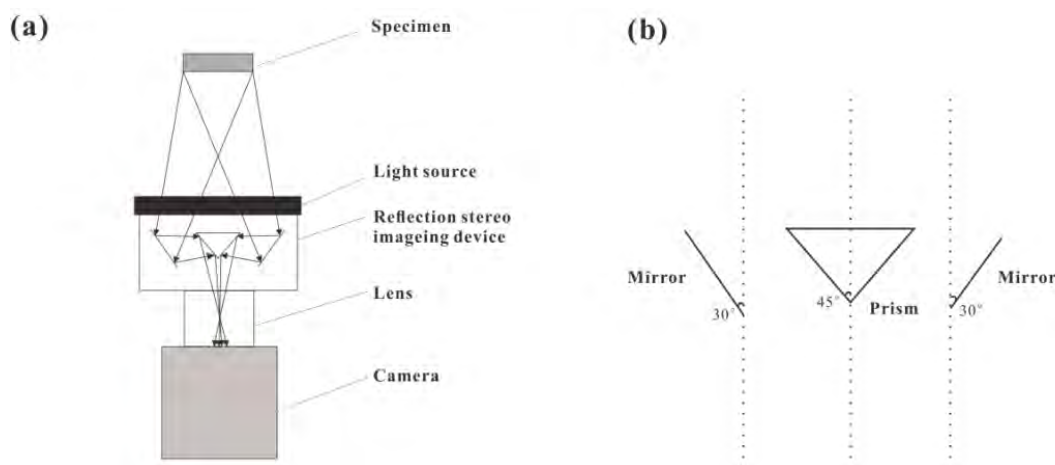


图 5.1(a)单镜头三维视频引伸计示意图；(b)反射式立体成像装置的光路图。

图 5.1(a)为所建立的单镜头三维视频引伸计的示意图，该引伸计包括一个 CMOS 相机、一个短焦镜头、一个反射式立体成像装置和一个蓝光 LED 环形照明。蓝光 LED 环形照明可以用于提高单色光照明。反射式立体成像装置包括一个三角棱镜平面镜和两个平面镜。反射式立体成像装置的光路示意图如图 5.1(b)所示。与文献[149]中的光路相比，三角棱镜平面镜的使用可以使得测量系统更加紧凑。平面镜与竖直方向的夹角为 30 度。三角棱镜上反射面与竖直方向的夹角为 45 度。根据反射式立体成像装置的光路，左右半图像的立体角应该约为 60 度。

图 5.2 为单镜头三维视频引伸计的实际装置图，其工作距离为 55 毫米。一个短焦镜头（12mm 焦距，Edmund Optics, Barrington, NJ）和一个分辨率为 1280×1024 像素的 CMOS 相机（UI-124LE, IDS, Germany）被用于记录试样的图像，相机的采集频率为 25Hz。在反射式立体成像装置中，三角棱镜平面镜和两个平面镜的反射面积为 20×20 毫米，如图 5.2(c) 所示。整个装置的宽度为 70 毫米，相机的高度为 54 毫米，反射式立体成像装置的直径为 75 毫米。本文所设计的单镜头三维视频引伸计的整体尺寸甚至小于普通单反相机的尺寸，如图 5.2 所示。这意味着所提出的单镜头三维视频引伸计使用起来是非常方便的。



图 5.2 单镜头三维视频引伸计的实际装置图。

5.2.2 单镜头三维视频引伸计测量原理

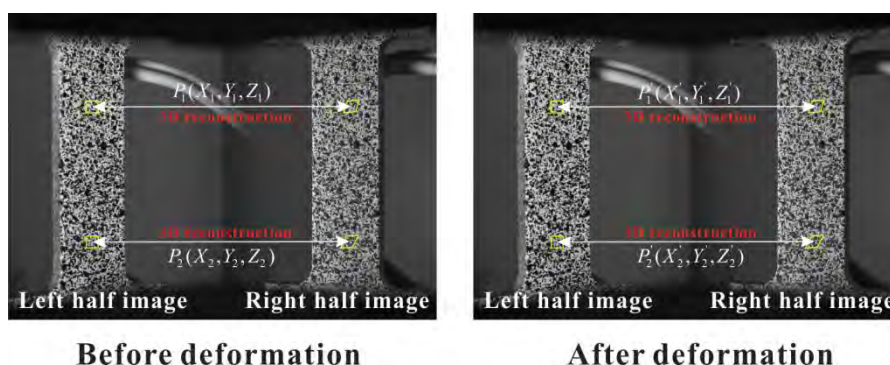


图 5.3 单镜头三维视频引伸计的工作原理。

假设单镜头三维视频引伸计的测点为 P_1 和 P_2 ，如图 5.3 所示。通过计算标距长度的相对伸长率可以确定应变的大小，应变计算的公式如下：

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\overline{P_1'P_2'} - \overline{P_1P_2}}{\overline{P_1P_2}} \quad (5.1)$$

其中 $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 和 $P_2(X_2, Y_2, Z_2)$ 为测点变形前的空间三维坐标， $P_1'(X_1', Y_1', Z_1')$ 和 $P_2'(X_2', Y_2', Z_2')$ 为测点变形后的空间三维坐标， $\overline{P_1P_2}$ 和 $\overline{P_1'P_2'}$ 为变形前后的标距长度，可以通过计算变形前后测量的距离得到。在所提出的单镜头三维视频引伸计中，测点的空间三维坐标可以基于三角测量从左右图像中进行三维重建。

5.2.3 基于散斑的自标定方法

为了对空间点进行三维重构，系统标定是必不可少的一步。为了标定单镜头立体成像系

统,提出了一种用于应变计算的散斑自标定方法。在所提出的标定方法中,使用试样自身对测量系统进行标定,而不是使用传统的标定板。试样参考图像被直接用于系统的标定,因此本章称其为自标定方法。

在采集完参考图像之后,标定可以根据左右半图像的散斑分析结果自动完成。如图 5.4 所示,在左相机半图像中选取了标定区域并和右相机半图像进行匹配。散斑自标定方法的步骤如下:

第一步:参考图像采集和立体匹配。在采集完参考图像后,选取标定区域并对标定区域内的点使用数字图像相关进行匹配。为了实现可靠的立体匹配,自动搜索方案[99]和质量导向算法[155]相结合的匹配方法被推荐使用。在立体匹配中,推荐使用反向组合高斯牛顿算法和二阶形函数。反向组合高斯牛顿算法已经被证明有更好的噪声鲁棒性,二阶形函数对投影变换则有更好的适用性。

第二步:相对外参估计和匹配点的三维重构。根据匹配点的坐标和相机初始内参,左右半图像之间的相对外参可以使用文献[126]中的方法进行求解。相机的内参则可以根据硬件商提供的参数粗略估计出来。使用计算的相对外参和粗略估计的相机内参,就可以对匹配点进行三维重构。相机内参包括主点坐标(C_x 和 C_y),等效焦距(f_x 和 f_y)和镜头的畸变参数。

相机外参则为左右虚拟相机坐标系之间的转动和平动。对于镜头的畸变参数,本文只考虑了一阶径向畸变。

第三步:非线性最小二乘优化。为了获取相机精确的内参和外参,使用约束的非线性最小二乘方法进行求解。根据实际匹配点坐标和三维重构点重投影坐标之间的差异构件目标函数,优化的目标函数为:

$$C_{st} = \sum_{i=1}^N \|m_1^i - \hat{m}_1^i(A, k, M^i)\|^2 + \sum_{i=1}^N \|m_2^i - \hat{m}_2^i(A, k, R, t, M^i)\|^2 \quad (5.2)$$

其中上标 i 代表匹配点的序号, N 是总的匹配点数目, m_1^i 和 m_2^i 为匹配点的坐标, \hat{m}_1^i 和 \hat{m}_2^i 为三维重构点 M^i 在左右半图像上的投影坐标, A 和 k 分别为相机的内参和畸变参数, R 和 T 为左右半图像之间的相对外参。

值得注意的是,在标定过程中并没有标定尺度信息。然而,所提出的单镜头三维视频引伸计是用于应变测量的,因此不需要尺度信息[126]。同时,标定中也没有考虑图像轴之间的偏斜度。对于目前的工业图像传感器,图像轴之间的偏斜是很小的,包括本文使用的 CMOS 图像传感器。

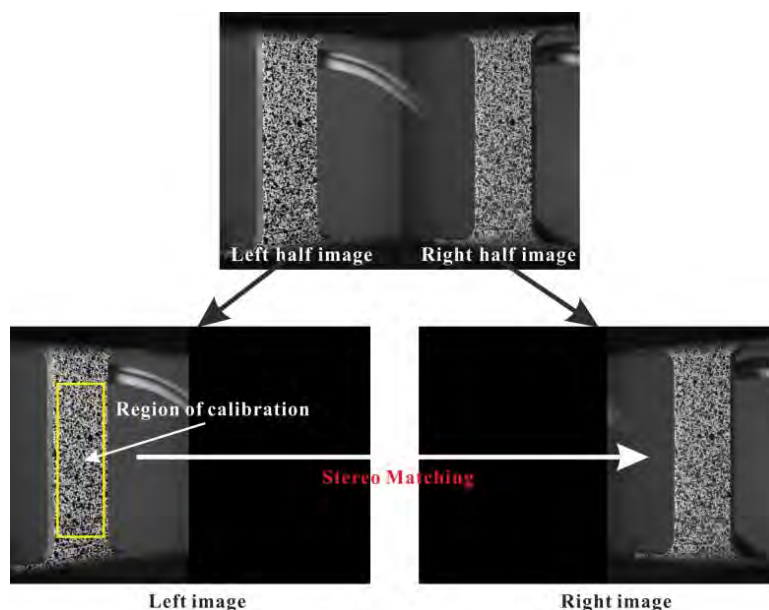


图 5.4 单镜头三维系统的散斑自标定方法。

5.2.4 鲁棒性强的立体匹配策略

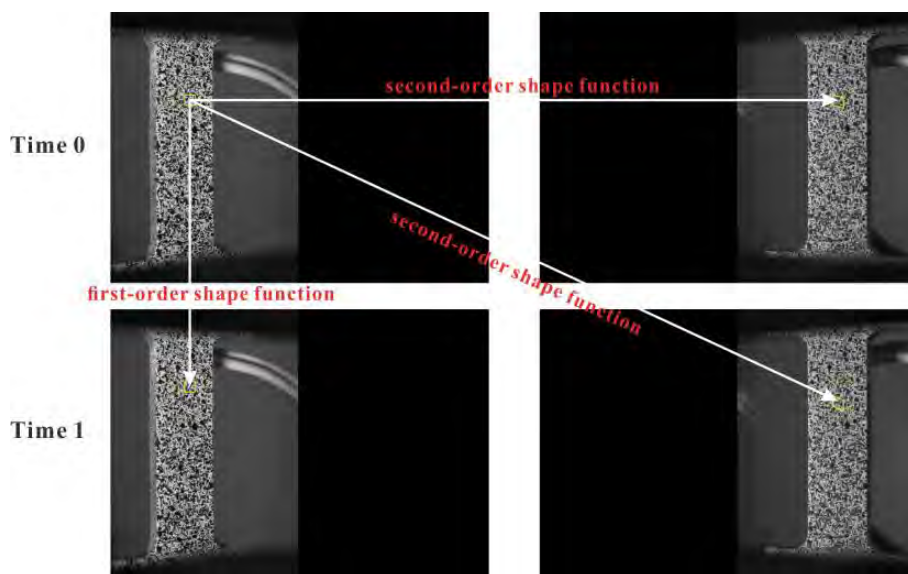


图 5.5 鲁棒性好且累计误差小的立体匹配策略。

图 5.5 显示了本文使用的立体匹配策略。对于参考图像，在左半图像中选取感兴趣点测点并在右半图像中使用二阶形函数搜索其对应点。与一阶形函数相比，二阶形函数可以更好的描述投影变换[69]。对于变形图像，首先使用一阶形函数将左参考图像中的感兴趣点与左变形图像中的点进行匹配。然后，使用二阶形函数将左参考图像中的感兴趣点与右变形图像中的点进行匹配。对于均匀变形，与二阶形函数相比，一阶形函数可以取得更好的精度和效率。原因是因为二阶形函数比一阶形函数具有更大的随机误差[104]。值得提出的是，在这种立体匹配测量中没有增量相关，因此不会导致误差累计，可以取得更好的鲁棒性。

此外，为了实现快速、鲁棒性的亚像素匹配，使用了高效率鲁棒性强的反向组合高斯牛

顿算法。反向组合高斯牛顿算法由Sutton等[14]从计算机视觉领域引入到数字图像相关领域。反向组合高斯牛顿算法有着计算效率[52]和噪声鲁棒性[79]的优势。有关于反向组合高斯牛顿算法一阶形函数和二阶形函数的具体实现方式可以参考文献[58]和文献[69]。值得提出的是，Su等[28]证明了平方和距离相关函数和互相关函数对于数字图像相关计算是不等价的，互相关函数有着更大的插值误差。因此，推荐在反向组合高斯牛顿算法中使用平方和距离相关函数，如零均值归一化最小平方距离相关函数和参数化最小平方距离相关函数。

5.2.5 基于单镜头三维视频引伸计的实时应变测量

图 5.6 为使用单镜头三维视频引伸计进行实时应变测量的流程图。在实验前，首先要安装实验装置并需要调整合适的工作距离让试样上的散斑图案可以清晰成像。然后，采集参考图像，选择标定区域进行系统标定，选择感兴趣点进行应变测量。系统标定可以使用章节 5.2.3 中的方法自动进行。对于感兴趣点，可以使用内存来存储计算过程中的不变量并创建查找表[97]。对于采集的参考图像，还可以完成左右半图像的立体匹配。使用从标定区域得到的标定参数，可以完成感兴趣点的三维重构。

在实验过程中，可以使用并行计算来完成应变实时运算。对于每一个变形阶段，感兴趣点需要分别和左变形半图像和右变形半图像进行匹配。对于每一个计算点，需要创建两个子线程，这样左右半图像可以同时进行模板匹配。同时，推荐使用高主频的电脑以取得高的计算效率。对于感兴趣点的整像素搜索，推荐使用文献[91]中的快速方法。

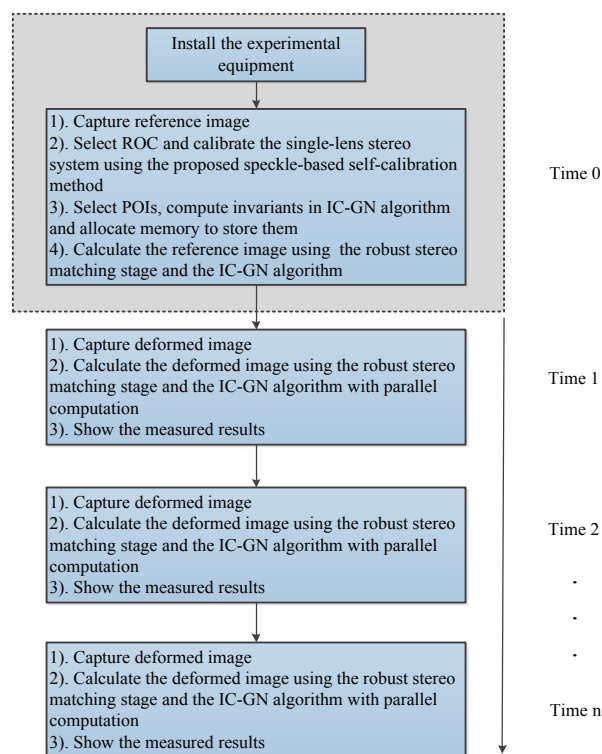


图 5.6 单镜头三维视频引伸计实时应变测量流程图。

5.3 铝合金拉伸实验及测量结果

为了定量评估所提出单镜头三维视频引伸计的可行性和实用性，进行了两个实验。在第

一个实验中，使用了未加载的铝合金试样分析了所提出三维视频引伸计的静态误差。在第二个实验中，使用拉伸试验机（Instron 3380, US）对试样进行加载并把测得的应变与应变片进行比较。所有的算法都用 C++ 实现并在台式机上进行测试[Inter (R) Quad-Core (TM) i7-4700 CPU with a main frequency of 3.4 GHz, 16.0 GB RAM]。

图 5.7(a)为铝合金试样的几何尺寸。样品的化学组成(%)如下：Si 为 0.4-0.7, Fe 为 0.4, Cu 为 0.1, Mn 为 0.4-1.0, Mg 为 4.0-4.9, Cr 为 0.05-0.25, Zn 为 0.25, Ti 为 0.5, 剩余的为 Al。试样的正反面照片如图 5.7(b)和(c)所示。使用传统的喷漆技术在试样的正面喷上随机散斑。事实上，为了确保试样表面散斑的质量，非常推荐使用水转印技术[46]。对于水转印技术，散斑场由电脑设计并通过便捷、可重复、对人体无害的方式转移到试样表面。两个尺寸为 3×4 毫米的应变片被贴在试样的反面，如图 5.7(c)所示。图 5.7(d)为实验装置的现场图。

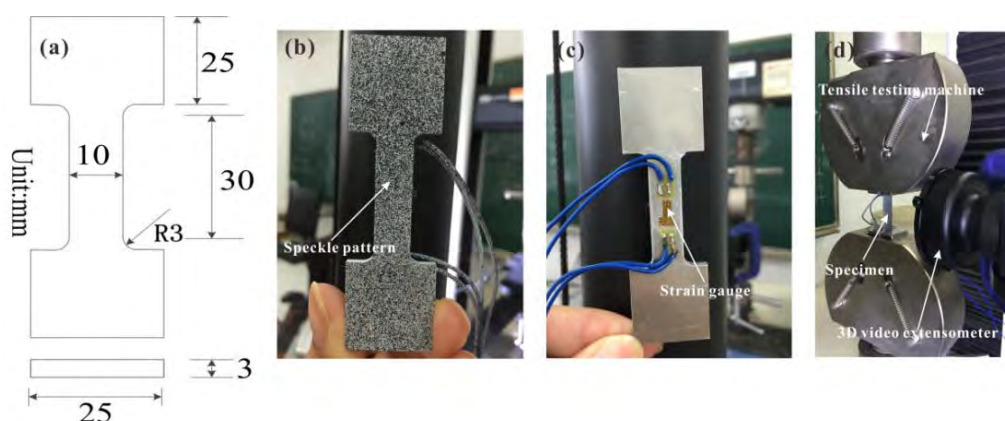


图 5.7 (a)铝合金试样的几何尺寸；(b)试样正面照片；(c)试样反面照片；(d)实验装置现场图。

5.3.1 单镜头三维视频引伸计静态噪声分析

为了分析所提出单镜头三维视频引伸计的静态噪声，以 25Hz 的采集频率对未加载试样采集了 50 张图片。采集的第一幅图作为参考图，剩余的 49 张图则作为变形图。由于试样存于未加载状态，测得的应变可以反映三维视频引伸计的静态噪声。标定区域和感兴趣点的选择分别如图 5.4 和图 5.3 所示。实验中的模板尺寸为 31×31 像素。

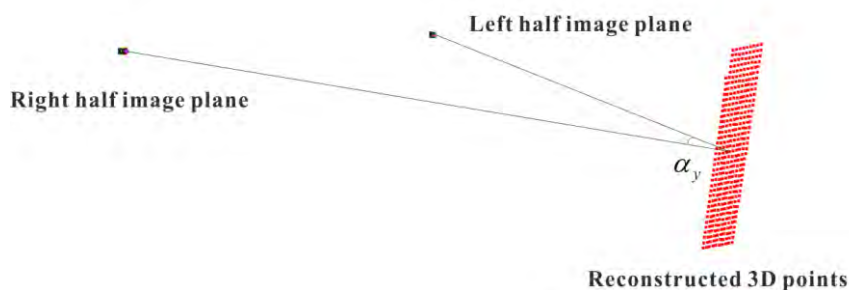


图 5.8 基于非线性最小二乘优化的标定区域点三维重构。

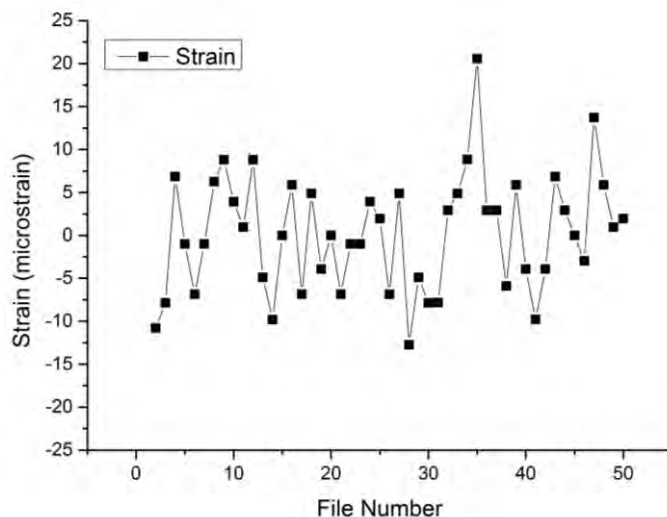


图 5.9 所提出单镜头三维视频引伸计的静态噪声。

表5.1 标定参数初值和使用基于散斑自标定方法的标定值

Calibration parameters	Initial value	Calibrated results after optimization
C_x (pixels)	640	637.06
C_y (pixels)	512	510.27
f_x (mm)	2264.15	2266.29
f_y (mm)	2264.15	2269.67
k_1 (pixels ⁻²)	0	-0.14
α_x (degrees)	0	0.12
α_y (degrees)	0	57.28
α_z (degrees)	0	0.93
T_x (mm)	1	1
T_y (mm)	0	0.00505
T_z (mm)	0	-0.55251

表 5.1 为标定参数的初值和使用所提出散斑自标定方法计算得到的优化值。对于标定区域的模板匹配，模板的大小为 31×31 像素，步长大小为 20 像素，共有 375 个点被用于标定。标定的重投影误差为 0.07 像素，这一结果证明了标定结果的正确性。图 5.8 为使用非线性最小二乘优化后标定区域内点的三维重构结果。所标定出的左右半图像的立体角度为 57.28 度，这一结果与安装的立体角度差不多。从表 5.1 中可以看到，平移向量可以对 T_x 做了归一化处理，标定中的尺度信息仍然是不知道的。然而，对于应变计算来说尺度信息是不需要的[126]。基于标定结果，单镜头三维视频引伸计已经可以用于应变测量。

49 幅变形的计算结果如图 5.9 所示。从图 5.9 中可以看出，所提出单镜头三维视频引伸计的静态误差大多数情况下小于 10 个微应变。最大误差和标准差分别为 20.58 微应变和 6.72 微应变。测量结果成功地证明了所提出视频引伸计的可行性和鲁棒性。这里值得指出的是，使用章节 5.2.5 中的方法，应变是实时计算的。

5.3.2 铝合金单轴拉伸实验

为了进一步评估所提出单镜头三维视频引伸计的性能,对铝合金试样进行加载并将测量结果与应变片进行对比。每一步的荷载为 0.2 kN 且每加载一次采集一幅变形图像。实验中使用的标定参数与章节 5.3.1 中的相同。

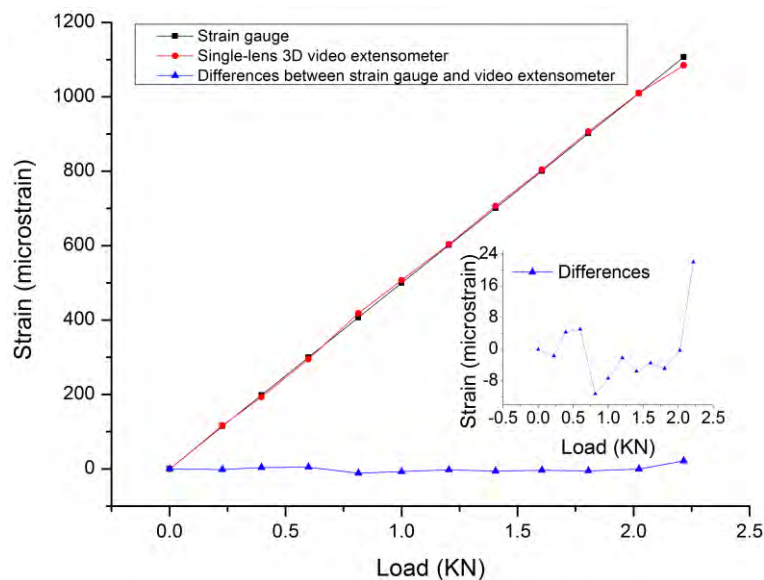


图 5.10 应变片与所提出单镜头三维视频引伸计的结果比较。

应变片和单镜头三维视频引伸计的应变测量结果如图 5.10 所示。从图 5.10 中可以看出,使用单镜头三维视频引伸计的应变测量结果与应变片的结果基本是一致的,两者之间的最大不同仅为 22.01 微应变且标准差为 8.82 微应变。在绝大多数情况下,两种方法之间的差异小于 10 微应变,这一点跟镜头噪声类似。随着荷载的增加,测量误差并没有线性增加,这意味着测量结果没有受到离面位移的影响。在二维视频引伸计中,应变误差会随着荷载增加而增加,如图 5.11 所示,尽管试样已经预加载了。从图 5.11 中可以看出,在焦距范围内,所提出单镜头三维视频引伸计的测量结果是几乎不受离面位移影响的。

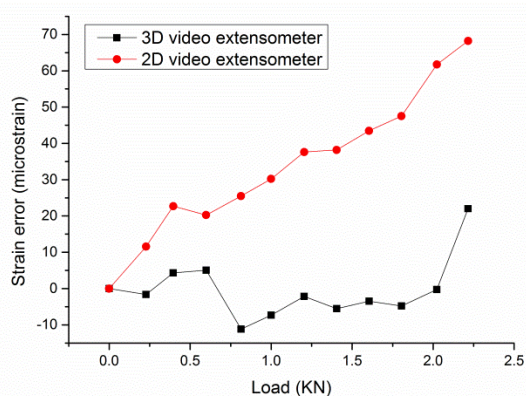


图 5.11 二维视频引伸计与所提出单镜头三维视频引伸计的结果比较。

除图 5.10 中的结果以外,还进行了另外 4 组实验,实验结果与图 5.10 中的结果基本保持一致。在这 5 组实验结果中,单镜头三维视频引伸计的应变测量结果与应变片的结果最大误差仅为 24.21 微应变,标准差为 12.37 微应变。测量结果的正确性进一步证明了所提出基本散斑自标定方法的有效性。基于所提出的单镜头三维视频引伸计,可实现高精度实时应变

测量。

5.3.3 对测量结果的讨论

单镜头三维视频引伸计的最大应变误差在 30 微应变以内，这就意味着如果允许的百分比误差为 10%时就可以精确测量 300 微应变。所提出单镜头三维视频引伸计的应变测量精度主要取决于两个方面，也就是测点的三维重构精度和标距的长度。测点的三维重构精度主要受到立体匹配的精度和相机标定精度的影响。

为了最大化系统精度，本文已经使用了反向组合高斯牛顿算法和高鲁棒性的立体匹配策略。尽管这里没有显示，实验结果显示基于散斑的自标定方法与经典的平面标定法[53]在应变测量精度上几乎没有区别。

5.4 优势、局限性以及未来适用性讨论

5.4.1 单镜头三维视频引伸计的优势

对于一个常用的二维视频引伸计，离面位移造成的应变误差是不可避免且不可接受的。为了消除离面位移对应变测量的影响且不引入繁琐的系统标定，本文提出了一种自标定单镜头三维视频引伸计。所提出引伸计的优点如下：

- 消除了离面位移对应变测量的影响；
- 不需要严格的相机同步；
- 基于试样参考图像的自动系统标定；
- 简单、轻便、紧凑且低成本。

5.4.2 单镜头三维视频引伸计的局限性

尽管所提出三维视频引伸计有上述优势，当前系统也存在一些局限性：

- 因为使用了基于散斑的自标定方法，试样必须占据视场的大部分区域，比如超过 50%的视场区域；
- 由于使用了单镜头立体成像系统，测量的视场会有限制且横向图像分辨率只有原来的一半。

尽管上述的局限性在所提出三维视频引伸计中是不可避免的，这些局限性并不会限制所提出三维视频引伸计的广泛应用前景。

5.4.3 单镜头三维视频引伸计的未来适用性

在章节 5.3 中，已经通过实验验证了所提出自标定单镜头三维视频引伸计的测量精度。应变测量精度还可以通过如下方式进行提高：

- 采用更高分辨率的相机。随着图像分辨率的提高，测点之间的标距会增大，应变测量精度也会随着提高[144]；
- 空域和时域滤波。不只是追踪单个点，而是追踪几十或数百个点，这样点可以取平

均从而降低噪声对测量的影响。多幅图取平均的方法则是一种有效的时域滤波方法。对于更高分辨率的相机或时域滤波,应变的获取速度可能会被降低。对于追踪更多点的空域滤波方法,计算效率会被降低。随着计算机技术和图像传感技术的发展,所提出自标定单镜头三维视频引伸计的适用性在未来会得到进一步发展。

5.6 小结

为了实现非接触、高精度、实时应变测量,本章提出了一种自标定单镜头三维视频引伸计。与传统的二维视频引伸计相比,消除了由离面位移造成的误差。此外,与传统的三维数字图像相关系统相比,在所提出自三维视频引伸计中,严格的同步和繁琐的系统标定都是不需要的。本文详细介绍并讨论了该引伸计的实现方法、优势、局限性和未来适用性。通过两个实验验证了方法的性能和可行性,实验结果与应变片结果吻合地很好。

随着数字图像相关方法计算效率的发展,所提出自标定单镜头三维视频引伸计被期待用于材料和结构的原位、实时、全场变形测量。基于自标定特性,将自标定三维测量系统用于显微变形测量也是非常值得期待的。

第六章 基于相机阵列的高精度数字图像相关应变测量方法

6.1 引言

传统的电测应变片技术测量精度可达 1 微应变,但其只能测量单点应变,难以实现全场应变的测量。随着现代光测力学[1][1]的发展,全场、非接触的应变测量方法在各个领域得到推广和使用,其中数字图像相关方法是目前最活跃的测量方法。数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)方法的位移测量精度可达 0.01 像素,对于 2000×2000 像素的相机,其位移测量精度可达二十万分之一。对于应变测量来说,如果使用视场的 $1/10$ 作为标距,系统噪声可达 100 个微应变。即使采用窗口拟合的方法来求解应变,其系统噪声也可达 50 微应变。对于均匀变形,增加拟合窗口的大小,其计算结果将更逼近真值,但是这种方法对于非均匀变形并不适用。与电测应变技术相比,数字图像相关的应变测量精度仍然是不够的。

为了得到更高精度的应变场,一般可以采取以下三种方法:1) 提高亚像素位移识别精度,近年来从亚像素位移算法的研究可知,想要进一步从算法的角度上来提高亚像素位移识别精度是非常困难的[25][79][157][158];2) 提高相机信噪比,选用更高信噪比的相机可以减少噪声对位移测量的影响,从而得到更高的位移识别精度[67][80];3) 提高相机分辨率,在测量视场一定的条件下,提高相机的分辨率可以增加应变计算的标距,从而提高应变测量精度。但是,提高相机信噪比和相机分辨率都需要硬件上的进步。

要使得数字图像相关测量技术在应变分辨能力上取得突破,依赖于硬件的进步,将是一个漫长的等待。为此,本章提出采用相机阵列并结合图像拼接技术实现高分辨率图像采集,以提高数字图像相关应变测量分辨力,从而达到高精度全场应变的测量。为了实现高精度拼接,提出了一种基于数字散斑场的相机阵列标定方法,该方法不依赖于图像重叠区域,可以最大限度的利用相机分辨率。在计算机视觉领域,相机阵列已被用于超分辨率成像[159]和超高速成像[160],但将相机阵列用于光测力学方法实现高精度变形测量属于首次。

6.2 相机阵列

如图 6.1 所示,为 5×5 相机阵列示意图。相机阵列中共有 25 个相机,每一个相机的分辨率为 2048×2048 像素。镜头采用了 120mm 的 Schneider 镜头,为了实现 60 毫米视场成像,在相机和镜头之间共加了 128 毫米的接圈,工作距离约为 500 毫米。如果相邻相机之间的重叠区域小于 48 像素,则对于该 5×5 相机阵列,将可以获得分辨率约为 10000×10000 像素图像。若相邻相机之间的重叠区域为图像的一半,那么能获得图像分辨率只有 6000×6000 像素。为了最大限度地利用相机分辨率,应该尽量减少相邻相机之间的重叠区域。

使用这样的 5×5 相机阵列,通过亚像素图像拼接算法获得 10000×10000 像素图像,图像的横向和纵向分辨率相对于单个相机提高了 5 倍左右。当测量视场一定时,与 2000×2000 像素图像相比,应变测量的标距将可以提高 5 倍左右,理论上应变测量的精度也将提高 5

倍左右。同时，相机阵列测量方法是在测量视场不变的条件下提高分辨率，因此其不仅适用于均匀变形场测量，同样适用于非均匀变形场测量。

当前，应变测量精度提高的前提是亚像素图像拼接对于数字图像相关运算不会引入新的误差，也即是拼接精度需要达到亚像素级别。这对于图像拼接技术而言，是一个非常大的挑战。

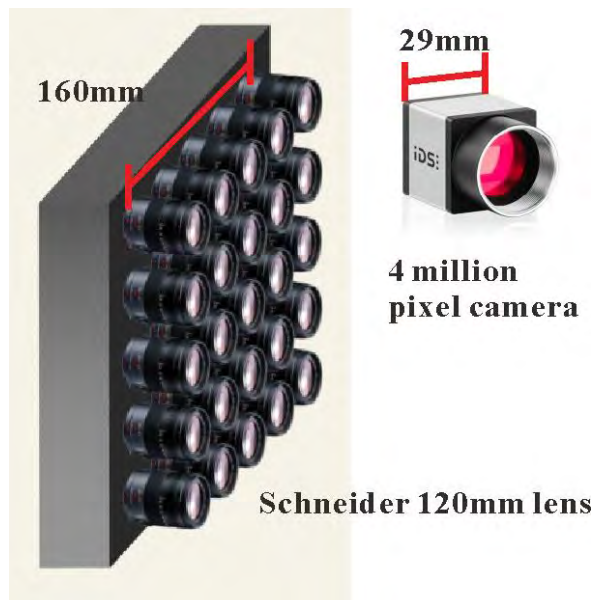


图 6.1 5×5 相机阵列示意图。

如图 6.2 所示，为 5×5 相机阵列的超分辨率成像示意图。图中的虚线为重叠区域，相邻相机图像相互重叠以保证图像拼接的连续性。为了实现全场均匀照明，采用 36 个单色蓝光 LED 光源组成 6×6 照明阵列，如图 6.2 所示。

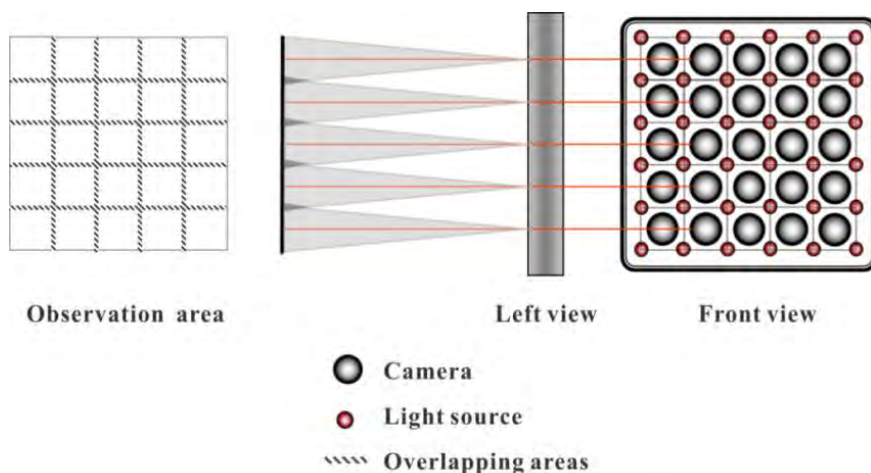


图 6.2 5×5 相机阵列用于超分辨率成像。

为了实现 10000×10000 像素超分辨率图像的采集，重叠区域不能超过 48 像素，所以要求相机安装的时候必须非常精确，可以在粗安装后通过微调实现。为了实现方便的调节，设计了如图 6.3 的图案。对于图 6.3 的图案，每个圆的直径为 60 毫米，其周围有边长为 58 毫米、60 毫米和 62 毫米的正方形，三种大小的正方形用于控制相机的微调。每个相机的视场为 61.44 毫米，也即是 2000 像素对于 60 毫米，相机之间的重叠区域则为 0.72 毫米。

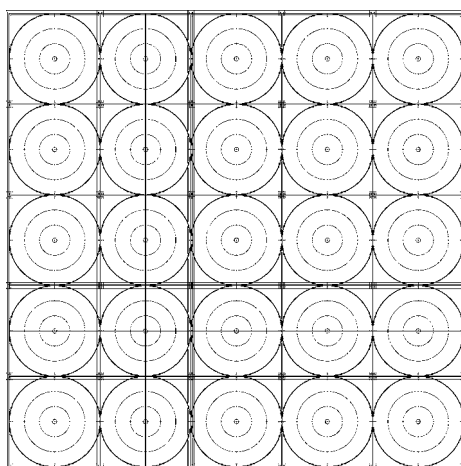


图 6.3 相机阵列硬件装置调节图案设计。

6.3 基于标定的亚像素图像拼接

图像拼接首先提出于摄影测量领域[108]，其主要用于生成大型的卫星图像。同时，图像拼接还可以用于电影摄影中的超广角全景图像拍摄[161]。到 90 年代中期，广角全景图拍摄已经可以在手持式的相机上实现[162]。目前，在智能手机上，已经可以实时的拍摄广角全景图像。

图像拼接主要包括三个步骤：图像预处理、图像配准和图像融合。图像预处理主要包括图像去噪和图像畸变矫正。图像畸变矫正可以有效地降低镜头畸变导致的图像失真对拼接精度的影响。在相机内参标定之后，可以根据标定的畸变参数对图像进行畸变矫正[108]。

6.3.1 图像拼接模型

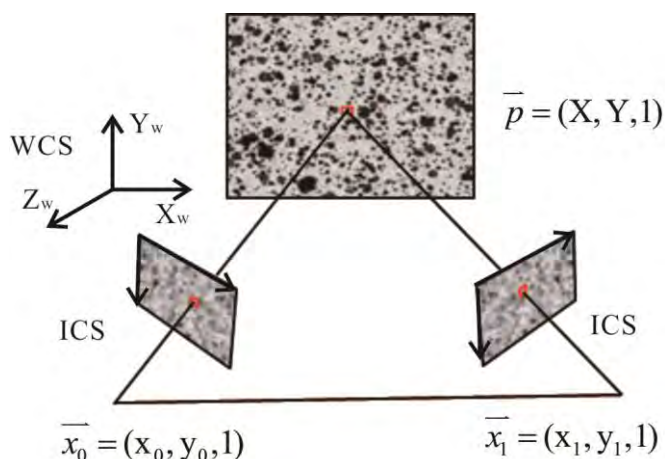


图 6.4 图像变换模型。

图像拼接就是要将相机拍摄的局部图像通过配准与融合获得一幅完整的图像。图像拼接一般通过找到一个空间变换，使得图像序列之间相互重叠部分的坐标点能够对准。为了实现图像拼接，需要预先定义图像之间的变换关系。如图 6.4 所示，世界坐标系中的一点 P 分别投影到左相机和右相机的成像靶面上为点 x_0 和 x_1 。在二维数字图像相关[15]中，被测物表面

是平面，因此可以将世界坐标系定义在被测平面上，即 $Z=0$ 。那么左相机的投影方程为：

$$\alpha_0 \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & f_s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

其中 f_x , f_y , f_s , c_x , c_y 为相机的内参, r 与 t 为左相机相对于世界坐标系的外参, α_0 为比例因子。公式(6.1)可写成

$$\alpha_0 \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} = H_0 \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

$$H_0 = \begin{bmatrix} f_x & f_s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & t_3 \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

对于右相机同样可得

$$\alpha_1 \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = H_1 \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

由公式(6.2)和公式(6.4)可得

$$\alpha \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} = H_0 H_1^{-1} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

其中 $\alpha = \alpha_0 / \alpha_1$, 公式(6.5)表示相机图像坐标系之间的变换关系, 其中变换矩阵 $H_0 H_1^{-1}$ 为一个 3×3 矩阵。公式(6.5)即为图像拼接模型, 在精确求得公式(6.5)中的变换矩阵后, 根据变换矩阵即可完成亚像素图像拼接。为求得公式(6.5), 需要找到左右相机图像之间的对应点, 也即为 (x_0, y_0) 坐标以及对应的 (x_1, y_1) 坐标。需要至少 4 组对应点坐标, 通过最小二乘法求得变换矩阵中的系数。

6.3.2 常用的图像拼接方法

常用的图像拼接方法根据匹配方法的不同可以分为基于特征匹配的图像拼接方法和基于灰度匹配的图像拼接方法。这两种方法都依赖于重叠区域的匹配, 因此对重叠区域有很高的要求。

6.3.2.1 基于特征点匹配的图像拼接

如图 6.5 所示, 为基于特征点匹配图像拼接的示意图。为了找到图像之间的对应点, 可以使用特征点检测算法。目前最常用鲁棒性最好的两种特征点检测算法为尺度不变特征转换 (Scale invariant feature transform) 算子 [163] 和加速稳健特征 (Speeded-up robust features) 算子 [164]。与 SIFT 算子相比, SURF 算子具有更快的计算速度。为了提高匹配的鲁棒性, 通常会使用随机抽样一致 (Random Sample Consensus, RANSAC) 算法。找到图像之间的对应点

之后，使用最小二乘方法计算章节 6.3.1 中的变换模型，从而实现两幅图之间的拼接。



图 6.5 基于特征点匹配的图像拼接。

6.3.2.2 基于灰度模板匹配的图像拼接

如图 6.6 所示，为基于灰度匹配的图像拼接方法。为了找到图像之间的对应点，可以使用基于灰度的模板匹配算法（如数字图像相关方法），该方法更加依赖于图像的灰度特征。对于灰度特征明显的图像，其拼接精度高于基于特征匹配的算法。同样的，找到图像之间的对应点之后，使用最小二乘方法计算章节 6.3.1 中的变换模型，从而实现两幅图之间的拼接。

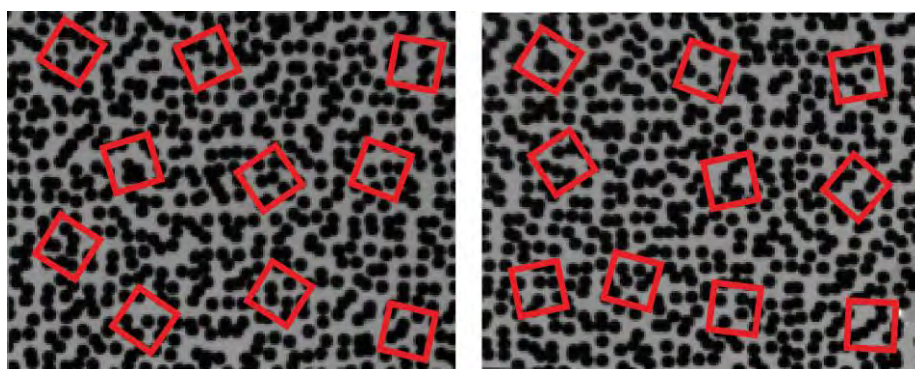


图 6.6 基于灰度匹配的图像拼接。

6.3.3 基于散斑标定的图像拼接方法

为了最大限度的利用图像分辨率，本文提出一种基于散斑标定的图像拼接方法。该方法由两步组成：相机内参标定和散板编码阵列外参标定。在相机内参标定中，使用加工精度为 1 微米的标定板，根据章节 4.2.1 中的方法进行标定，重投影误差可以达到 0.02 像素。在散板编码阵列外参标定中，使用数字散斑技术，在试样表面制作预先设计的数字散斑场，将采集图像与标准图像进行匹配，从而实现全局外参的标定和统一。采用本章提出的标定方法，可以实现重叠区域只有 48 像素的高精度拼接。

6.3.3.1 相机内参标定

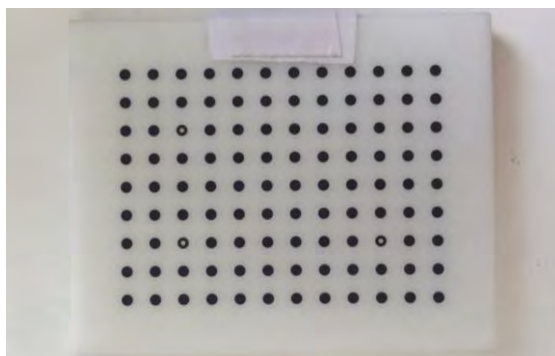


图 6.7 高精度标定板。

图 6.7 为加工的石英玻璃的高精度标定板，其圆点间隔加工精度在 1 微米。使用这样的高精度标定板对每一个相机的内参进行标定并对标定的内参进行保存。因为每一个相机的视场是 60×60 毫米，选用了 12×9 间距为 4 毫米的圆点标定板，如图 6.7 所示。在标定过程中，每个相机采集标定板不同姿态下的 50 组图片。从文献[121]中可知，50 组及以上数量的标定图片可以保证标定的精度和稳定性。

6.3.3.2 散斑编码阵列外参标定

相机阵列中相邻相机之间的重叠区域只有 48 像素，无法使用章节 4.2.2 中的方法进行标定。为了实现阵列外参标定，提出一种基于散斑编码的阵列外参标定方法。如图 6.8 所示，在被测平面制作散斑时，选择使用了数字散斑场的制作方法。数字散斑场是使用电脑预先设计的，因此其尺寸以及每一个散斑子区对应的空间位置都是已知的。那么，当相机看到被测平面的散斑时，使用单幅图求解相机外参的方法就可以计算每一个相机坐标系相对于世界坐标系的相对外参。在公式(6.5)中，变换矩阵可以由相机内参和相机坐标系相对于世界坐标系的相对外参求得。

如图 6.8(a)所示，为了实现数字散斑场的编码和解码，将采集到的散斑图像与预先使用电脑生成的数字散斑图像进行模板匹配，电脑生成的数字散斑图像中的匹配坐标可以直接与世界坐标相对应，而采集到散斑图像的匹配坐标则为图像坐标。如图 6.8(b)所示，对于一个 2×2 相机阵列，因为看到的数字散斑场是统一的，因此每一个相机相对于的世界坐标系也是统一的。

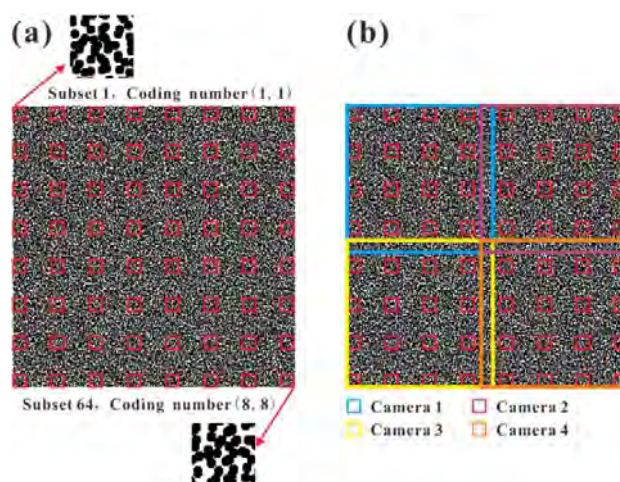


图 6.8 数字散斑编码阵列外参标定方法：(a)散斑编码；(b)阵列外参标定。

6.3.3.3 基于相机内外参的图像拼接

对于相机阵列中的相机，基于标定的内外参数，可以得到其映射矩阵为

$$H_i = \begin{bmatrix} f_x^i & f_s^i & c_x^i \\ 0 & f_y^i & c_y^i \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11}^i & r_{12}^i & t_1^i \\ r_{21}^i & r_{22}^i & t_2^i \\ r_{31}^i & r_{32}^i & t_3^i \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

其中*i*为相机在阵列中的编号，对于5×5相机阵列，则*i*的范围为0到24。将相机0作为参考相机，对于待拼接图像，其图像坐标为(x_0, y_0)，则对阵列中第*i*个相机图像进行灰度取值时则有

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \alpha \begin{bmatrix} H_{ref} H_i^{-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_{ref} \\ y_{ref} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

其中(x_i, y_i)为第*i*个相机图像坐标， $f(x_i, y_i)$ 为该点坐标的灰度值。那么根据公式(6.7)可得

$$f(x_{ref}, y_{ref})^i = f(x_i, y_i) \quad (6.8)$$

其中(x_i, y_i)通常为亚像素坐标，使用双三次B样条插值可得其灰度值。

虽然相机0为参考相机，但是其光轴未必与被测平面垂直。为了消除斜光轴对拼接和测量的影响，需要对拼接图像中的光轴进行矫正。为了实现矫正，对参考相机的映射矩阵做如下改变：

$$H_{ref} = \begin{bmatrix} f_x^0 & f_s^0 & c_x^0 \\ 0 & f_y^0 & c_y^0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & t_1^0 \\ 0 & 1 & t_2^0 \\ 0 & 0 & t_3^0 \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

在图像拼接过程中，相机内参是单独标定的，相机坐标系相对于世界坐标系的相对外参则是通过编码标定板标定的，且每一个相机相对于的世界坐标系也是统一。基于这样的标定方法和拼接方法，不会引起拼接误差的传递，从而可以实现高精度亚像素拼接。

6.3.3.4 图像融合

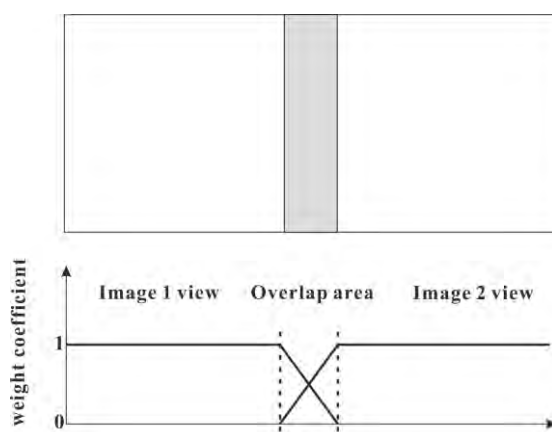


图 6.9 图像线性融合。

对于图像拼接过程中的重叠区域，需要使用图像融合的方法[165]。本文使用了线性融合的方法，采用渐入渐出的加权方式，这种加权方式可以使得相邻两幅图像在灰度及颜色上

都平滑拼接。如图 6.9 所示，重叠区域中灰度的权重与其距离重叠区域的边缘成线性关系。通过加权系数对左右图像的灰度值加权，最终得到重叠区域的灰度值。对于非重叠区域，则无需进行图像融合，可以直接使用插值算法获取图像灰度值。

6.3.3.5 拼接结果

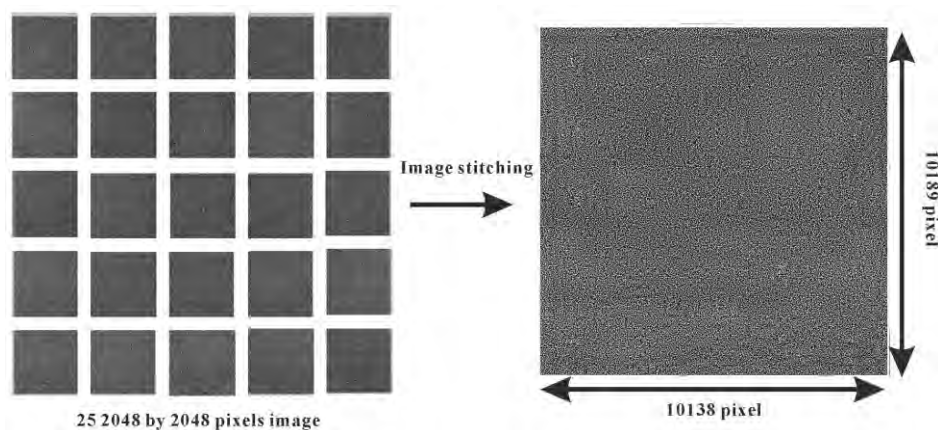


图 6.10 相机阵列亚像素图像拼接。

图 6.10 为 5×5 相机阵列的图像拼接结果，拼接图像的分辨率为 10138×10189 像素。从图 6.10 中可以看出，使用 5×5 相机阵列，已经可以获得一亿像素图像，取得了图像分辨率上的突破。目前一亿像素的相机仍处于禁运状态。但是，由于受到数字散斑场制作精度的影响，其拼接精度只能达到 0.1 像素级别，无法达到数字图像相关方法的 0.01 像素级别。为了实现高精度全场变形测量，将在章节 6.4 中介绍一种位移场的亚像素拼接方法。

6.3.4 亚像素位移场拼接方法

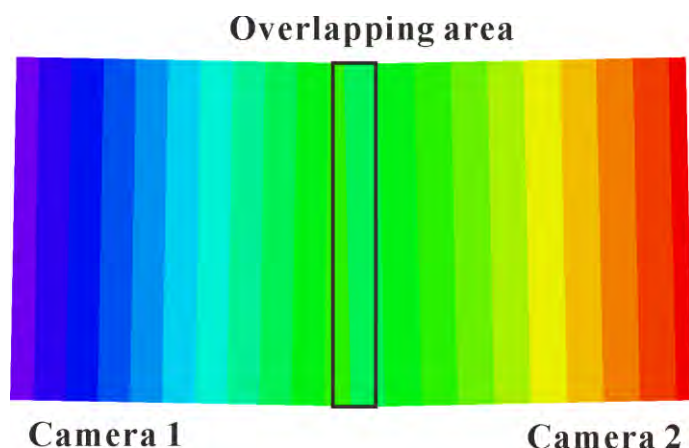


图 6.11 位移场亚像素拼接。

章节 6.3 中介绍的亚像素图像拼接方法已经可以保证图像的连续性，然而由于数字图像相关方法的精度很高（位移精度可达 0.01 像素），图像拼接的连续性仍然难以保证变形测量的连续性。对于基于标定的亚像素拼接方法，其拼接精度在 0.1 像素左右，难以满足 0.01 像素的精度要求。为了实现高精度全场应变测量，基于亚像素图像拼接提出了一种亚像素位移场拼接方法。如图 6.11 所示，。为了实现位移场拼接的连续性，我将图像重叠区域设为 148

像素，此时拼接图像的分辨率为 9600×9600 像素。

如果使用拼接图像进行数字图像相关计算，拼接精度直接会影响位移精度。如公式(6.10)所示，对于图像拼接，因拼接引起的误差直接作用在公式(6.10)的分子上，因此会对应变有非常大的影响。

$$\varepsilon = \Delta L / L \quad (6.10)$$

对于位移场拼接，位移是每个相机图像单独计算的，因此拼接不会对位移产生影响。在计算应变时，拼接造成的误差会作用于公式(6.10)的分母，其对应变造成的影响是很小的。

6.4 高精度全场应变测量

6.4.1 全场高精度应变计算

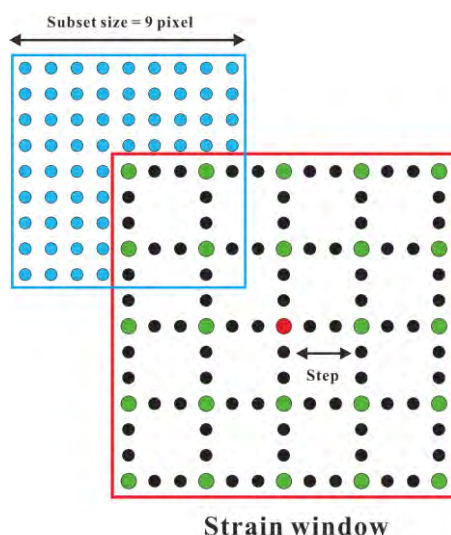


图 6.12 应变逐点最小二乘计算。

对于计算得到的位移场，使用逐点最小二乘[166]的方法计算应变。如图 6.12 所示，选择一个计算应变的窗口来计算中心点的应变值。一般认为窗口内的位移认为是线性的，通过最小二乘的方法进行拟合得到位移和位移梯度。对于非均匀应变场，窗口选择对应变的计算有很大的影响[129]。对于应变计算窗口大小和形状的最优选择，还有待进一步研究。在相机阵列应变计算中，选择的应变窗口大小为 25×25 个计算点。

6.4.2 矩形板静态噪声分析

为了证明相机阵列用于高精度应变测量的可行性，首先做了相机阵列的静态噪声实验。如图 6.13 所示，使用 5×5 相机阵列拍摄一个未加载的矩形板试样，连续拍摄 10 次。试样的尺寸为 500×320 毫米，在实验前，使用水转印技术在试样表面制作了如图 6.13 中的数字散斑，散斑场的面积为 300×300 毫米。25 台相机固定在一个加工的 5×5 阵列支架上，每 5 台相机与一台工作站连接采图，为了实现 5×5 相机阵列的图像采集，共使用了 5 台工作站。实验过程中采用蓝光照明和窄带滤波成像，从而消除环境光变化对测量的影响。



图 6.13 相机阵列矩形板静态噪声分析。

25 台相机通过触发器进行硬同步采集，采集帧频为 1Hz，触发器如图 6.14 所示。触发器通过同步线并联来实现 25 台相机的同步采集，触发方式为数字触发。触发器通过一台电脑控制，通过发送一定频率的方波信号来实现硬同步采集。



图 6.14 硬同步触发采集器。

图 6.15 为相机阵列全场位移静态误差云图，云图中的最大值为 0.0191 像素，最小值为 -0.0163 像素，均值为 0.0003 像素，标准差为 0.003 像素。计算模板大小为 105×105 像素，步长为 20 像素。从图 6.15 中可以看到，相机阵列与单个相机在像素级别上的精度是保持一致的。但是对于单个相机，考虑到形函数中的局部均匀性变形假设，模板一般不能选的太大。而对于相机阵列而言，由于图像分辨率得到了很大的提高，即使选择了很大的计算模板，模板对应的物理尺寸也不大。相机阵列 105×105 像素模板与单个相机 21×21 像素模板在对应的物理尺寸上是相同的。从这一点来看的话，图像分辨率的提高不仅可以增加应变计算的标距离，还可以减小相同像素模板对应物理模板的尺寸。

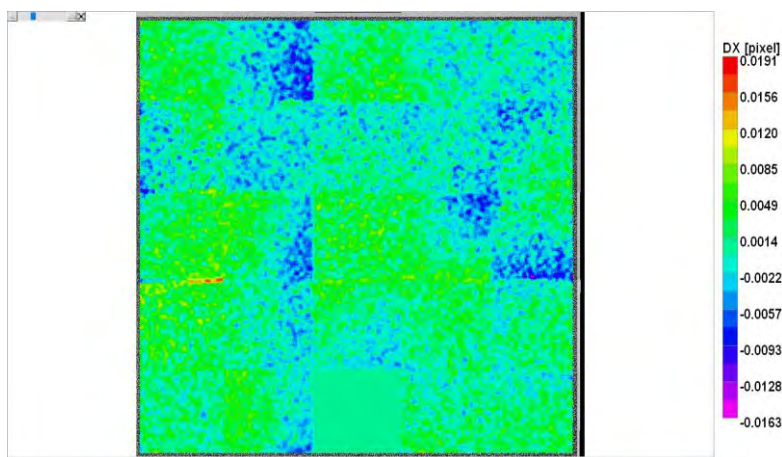


图 6.15 相机阵列全场位移静态位移误差云图。

6.4.3 四点弯荷载下的全场变形测量

为了进一步说明相机阵列用于全场高精度变形测量的可行性和有效性，将 Patterson 等 [54]设计的四点弯试样的尺寸进行了放大，并使用相机阵列来测量梁的部分，如图 6.16 所示。实验前，使用水转印技术在试样表面制作了数字散斑场用于阵列外参标定和变形测量。通过加载装置对四点弯梁进行加载。在梁中间的上部和下部都贴了电阻应变片，用于控制加载梁的大小。实验前先对相机阵列测量系统进行了相机预热，以消除相机自热对测量造成的影响 [167][168]。

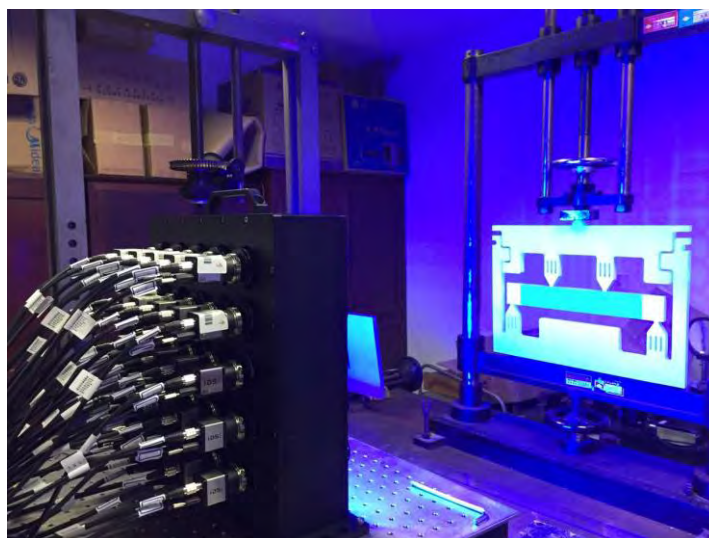


图 6.16 相机阵列四点弯梁高精度变形测量。

图 6.17 为变形前后拼接得到的散斑图像，因为拼接精度在亚像素级别，因此拼接图像是连续的。但是拼接连续的图像并不能满足高精度数字图像相关变形测量的需求。为此，在计算中采用了位移场拼接进而求得应变场的方法。

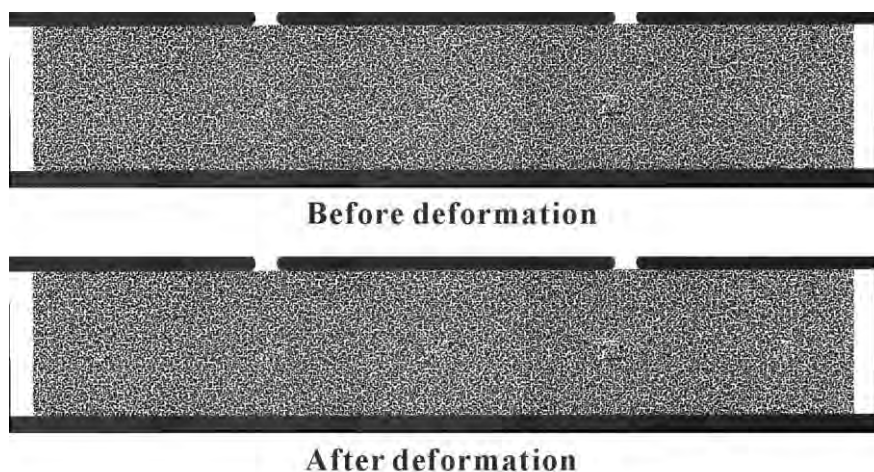


图 6.17 变形前后拼接得到的散斑图。

图 6.18 为计算得到的 ε_{xx} 变形场，通过应变片控制加载使得其最大应变在 200 微应变。图 6.18(a)为计算得到的梁应变场云图，从图中看到其变形趋势与理论上的四点弯梁保持一致，也即梁的上部受压而下部受拉。为了验证相机阵列测量的应变分辨率，取的梁的中部区域的应变数据进行放大显示，如图 6.18(b)。从图 6.18(b)可以看到，对于-200 微应变到 200 微应变，可以将其分为 40 个颜色条，其仍然可以分辨出来，证明了其应变分辨率可以看到 10 微应变。图 6.18(c)为线 1 上的应变值，数据点之间的间隔为 5 微应变，图 6.18(c)进一步说明了系统的应变分辨率。采用相机阵列数字图像相关方法，可以大大的提高应变分辨率，使得全场高精度应变测量成为可能。

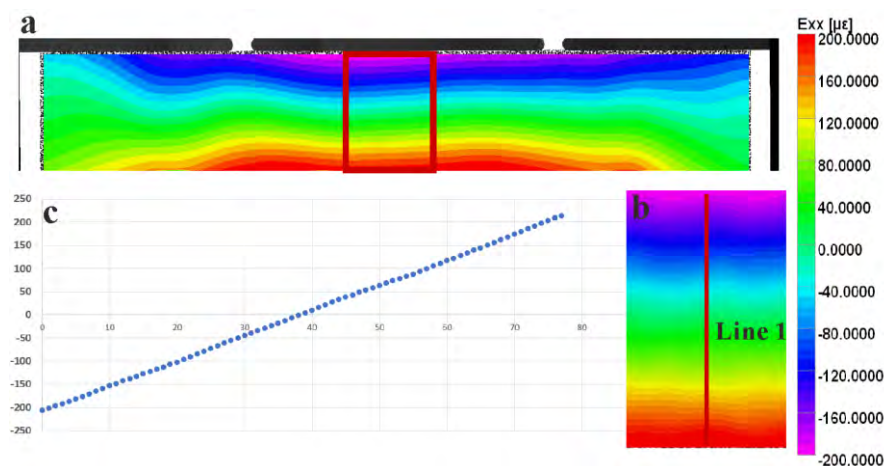


图 6.18 相机阵列四点弯梁实验结果:(a)四点弯全场应变;(b)四点弯纯弯曲段全场应变;(c)线 1 上的应变值。

6.5 小结

本章主要介绍了一种基于相机阵列的高精度全场变形测量方法，实现了亿级像素图像采集并首次实现了 10 微应变的全场变形测量。为了实现亿级像素图像的亚像素拼接，本章提出了一种基于相机标定的图像拼接方法，该方法依赖于标定参数完成图像拼接而不依赖于重

叠区域，可以大大提高图像的利用率。同时，为了实现全场高精度应变测量，还提出了一种位移场亚像素拼接方法，大大降低了拼接误差对应变测量的影响。最后，通过静态噪声分析和四点弯梁实验证明了方法的可行性和有效性。静态位移误差的均值仅为 0.0003 像素，标准差仅为 0.003 像素。四点弯实验中，实现了纯弯曲部分 10 微应变的应变分辨，证明了相机阵列数字图像相关技术的可能性和实用性。相机阵列式的测量方法将实现全场应变测量的数量级突破。

未来，将为相机阵列数字图像相关方法寻找更多的应用。同时，也会将相机阵列作为常规数字图像相关测量系统的校准设备对数字图像相关测量系统进行计量溯源。

第七章 总结与展望

7.1 全文工作总结

数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)方法是目前光测力学领域最为活跃和应用范围最广的变形测量方法,其计算精度、计算效率和适用性的提升对其在科研和工程领域的推广都有着非常积极和有效的作用。为了实现数字图像相关方法的进一步推广,本文以实现高精度、实时数字图像相关变形测量为目标,从数字图像相关计算精度、计算效率、系统标定三个角度出发,取得的主要工作和创新点如下:

1. 针对噪声对数字图像相关测量精度的影响,分析了反向组合高斯牛顿算法在噪声条件下的理论误差公式,首次发现其均值误差中的噪声引入误差项在选择合适的灰度梯度算子时可以被消除。通过理论分析和实验研究,揭示了噪声引入误差消除的机理。从理论、模拟和实验三个角度,将反向组合高斯牛顿算法与传统的牛顿拉普森算法进行了对比,证明了反向组合高斯牛顿算法在计算效率和抗噪声能力上的综合优势。与 Sutton 等提出的数字图像相关理论误差公式进行了对比,给出了全新的数字图像相关理论误差公式,该理论误差公式的均值误差中不包含噪声引入误差。
2. 为了提高数字图像相关计算效率,提出了一种基于种子点扩散的并行计算方法,结合高效率的反向组合高斯牛顿算法与双三次 B 样条插值查找表,首次报道了实时数字图像相关全场变形测量。在所提出的并行算法中,只有种子点需要进行整像素的搜索且传递式的初值估计可以减少迭代次数。将并行方法扩展到三维数字图像相关方法中,在子线程中逐步实现时序匹配、立体匹配和三维重构,实现了 5000 点 10Hz 的三维变形实时测量。最后,将二维实时数字图像相关用于土木准静态实验测量和实验室地震实验加载控制,将三维实时数字图像相关用于人体脉搏实时监测,取得了很好的效果。
3. 通过对数字图像相关方法和摄影测量方法的深入研究,提出了一种将试件上散斑场作为标定物的大视场相机内外参标定方法,将经典的相对定向算法和散斑匹配相结合,实现了大视场条件下三维数字图像相关高精度变形测量。通过四点弯实验和混凝土柱压缩实验证明了所提出标定方法的可行性和有效性,与传统平面标定方法相比,应变误差在 50 微应变以内。最后,成功的将所提出方法用于球墨铸铁圆柱形容器的跌落实验,测得了容器跌落过程中的全场应变信息。
4. 基于散斑自标定方法和反射式的单相机三维成像装置,首次提出了一种自标定单镜头三维视频引伸计用于高精度实时应变测量。该引伸计使用相机和镜头出厂参数作为相机内参初值,利用相对定向算法和散斑特征匹配来计算左右半图像的相对外参,最后使用光束平差法对相机内外参数和匹配点三维坐标进行优化。自标定单镜头三维视频引伸计的提出解决了传统引伸计测量中的离面位移影响、相机同步和繁琐标定三项问题。铝合金拉伸实验证明了所提出引伸计的可行性和有效性,其应变测量误差在 30 微应变以内。
5. 提出了一种基于相机阵列的高精度数字图像相关全场应变测量方法,通过高精度标定的相机阵列内外参数实现了亚像素级别的图像拼接和位移场拼接,首次获得了亿级像素散斑图像和全场 10 微应变的应变测量分辨率。为了实现相机阵列的内外参标定,提出了基于数字散斑场的相机外参标定方法,该方法不需要相机之间存在重

叠区域亦可完成外参标定。该拼接方法不依赖于重叠区域的特征匹配，可以最大限度的提高图像分辨率的使用率。在静态噪声实验中，获得了分辨率为 10138×10189 像素的散斑图像，位移静态噪声标准差为 0.003 像素数。在四点弯实验中，测得了四点弯试样全场变形，应变测量分辨率为 10 微应变。

除了以上的研究工作外，基于 QT 和 VS2008，我还做了大量的软件和系统开发工作，如图 7.1 为博士期间开发的三款软件。在 2013 版 PMLAB 3D-DIC 商业测量系统中，我独立负责了相机标定、图像采集、标记点追踪三个模板的软件开发工作。2014 年，我还承担了多尺度二维数字图像相关测量系统[169]的开发工作，独立开发了软件并搭建了硬件，软件主要包括图像采集、三维移动台自动控制、数字图像相关运算、数据显示与后处理四个部分。2017 年，我又承担了振动台全方位多目视觉变形测量系统中的软件开发工作，将摄像测量与双目视觉相结合，解决了多相机数字图像相关测量统一的问题。这些软件和系统开发工作对于数字图像相关方法[170]的应用和推广有非常积极的推进作用。

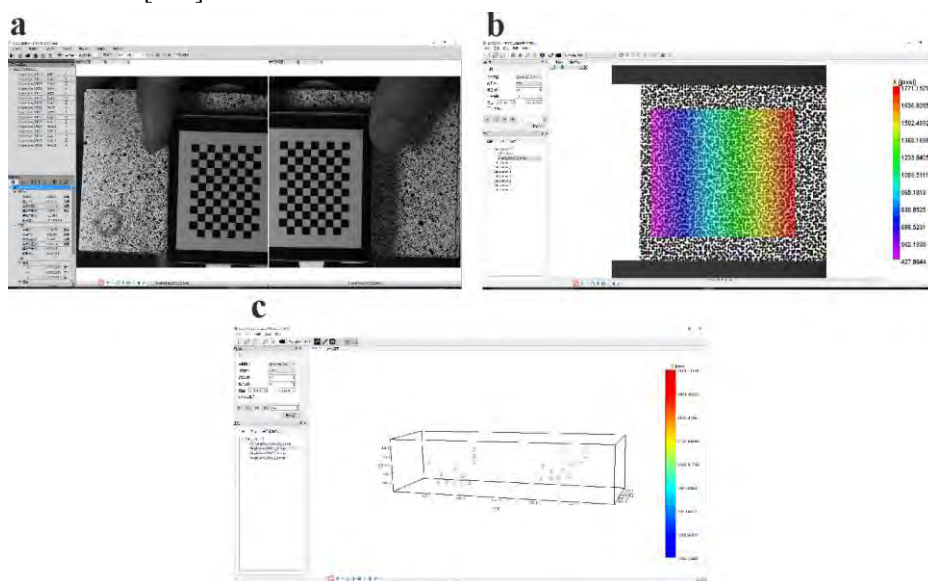


图 7.1 博士期间开发的软件(a)PMLAB 3D-DIC 软件(b)多尺度 2D-DIC 测量软件(c)振动台全方位多目视觉变形测量软件。

7.2 未来工作展望

随着科学技术的不断发展，对实验测量方法要求的不断提高，现代光测力学测试技术一定会有更大的发展。本文围绕高精度、实时数字图像相关变形测量做了一些工作并给出了一些测量问题的解决方案，但还有以下一些问题有待进一步研究：

1. 计算效率更高的实时数字图像相关方法。本文提出的实时数字图像相关方法的计算效率有待于进一步加强。近期，基于 GPU 并行技术，已经报道了 100 万点每秒的计算效率[95]。未来，将致力于实现芯片级别的数字图像相关运算，争取做到将实时数字图像相关在工程领域进行普及。
2. 相机网络测量中的相机位姿矫正问题。本文提出的相机位姿标定方法，解决了大视场标定问题。但在实际测量中，仍然有很多标定问题需要解决，如相机网络测量中的相机位姿矫正问题[171]。
3. 基于相机阵列的高精度三维全场应变测量方法。本文提出的相机阵列测量方案[172]只能用于平面物体的高精度应变测量，在实际测量中，离面位移往往是不可避免的，

因此三维测量方式更加具有实用性。未来将努力将阵列式的超分辨率测量推广到三维测量领域。

4. 想要实现数字图像相关方法在工业领域的推广，其测量标准的建立是非常重要的。在此之前，首先需要对数字图像相关方法在实际测量中的误差[173][174][175][176]进行全面分析。

我们坚信，随着计算机技术、图像传感技术的发展，基于数字图像的变形测量方法将在工业和实际工程应用领域发挥更大的作用。

致谢

在东南大学完成本科和硕博学业的十年里，我所从事的学习和研究工作，都是在导师的指导和帮助下进行的。首先感谢导师何小元教授多年的指导和教诲，是他把我带到了光测实验力学领域，并开启了我对这个领域的兴趣。何老师知识渊博，科研与实践并重。我有幸在何老师的指导下从事数字图像相关方法的研究，并接受何老师悉心的指导和鼓励，受益良多。何老师教导我们学以致用思想，我将受用终生。在生活中，何老师家人一般的关怀和引导，让我倍感微暖。在此，谨向恩师表达诚挚的敬意和衷心的感谢！

感谢课题组的杨福俊教授在科研及生活中热情的帮助和指导。感谢师兄代祥俊老师不断地鼓励和帮助。感谢课题组的胡邹恒、董帅、戴云彤、刘聪、耿书东、戴维斯、朱飞鹏、白鹏翔、戴美玲、苏志龙、朱程鹏、钱帅宇、葛天媛等成员，大家营造的温馨课题组氛围给我留下了美好的回忆。

感谢中国科学技术大学的张青川教授以及张青川教授课题组的程腾、高越、苏勇、徐小海、蔡玉龙、薛远。感谢南京中迅微传感技术有限公司的张勇和芮桂华工程师。PMLAB DIC-3D 这款软件让我们有缘能在一起工作，我会永远记得与大家并肩奋斗的岁月。

感谢新加坡科技与设计大学的陈陆捷老师。在新加坡的学习和生活过程中，陈老师全身心投入在工作中的激情给我们年轻人树立了很好的榜样。

感谢多伦多大学的夏开文教授，在多伦多大学的一年学习生活中，您不仅教会了我很多地震方面的知识，也教会了我很多人生的道理。感谢四川大学的高明忠教授，您的幽默风趣和鼓励给了我很大的动力。感谢国防科学技术大学的陈荣教授，您始终处于科研一线的实干精神让我至今受益匪浅。感谢多伦多大学的姚伟师兄、史一锐师弟和 Tony 师弟，感谢你们在工作和生活上的帮助。

感谢燕山大学的钱立和教授，在交付“多尺度二维数字图像相关测量系统”时的关心和照顾，您提出的很多测量问题让我至今受益匪浅。

感谢本科班主任洪俊老师一直的帮助和支持。感谢付广龙、何顶顶老师在实验方面提供的帮助。

感谢我的爱人陈振宁女士对我的理解、支持和帮助，感谢儿子小石头给我带来的欢乐和动力，感谢父母和家人给予的关爱和支持。

参考文献

- [1] 伍小平. 近 40 年光力学进展的回顾[J]. 实验力学. 2010. 25(5): 491-508.
- [2] 于起峰, 尚洋. 摄像测量学原理与应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [3] Li X, Xie H, Kang Y, et al. A brief review and prospect of experimental solid mechanics in China[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2010, 23(6): 498-548.
- [4] Kreis T. Digital holographic interference-phase measurement using the Fourier-transform method[J]. *JOSA A*, 1986, 3(6): 847-855.
- [5] 周灿林, 亢一澜. 数字全息干涉法用于变形测量[J]. 光子学报. 2004. 33(2): 171-173.
- [6] 戴福隆, 亚敏, 谢惠民, 吕坚. 云纹干涉与钻孔法测量残余应力的实验方法与系统[J]. 实验力学. 2003. 18(3): 313-318.
- [7] Liu Z, Fang D, Xie H, et al. Study of effect of 90 domain switching on ferroelectric ceramics fracture using the moire interferometry[J]. *Acta Materialia*, 2007, 55(11): 3911-3922.
- [8] Yang L, Xie X, Zhu L, et al. Review of electronic speckle pattern interferometry (ESPI) for three dimensional displacement measurement[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 27(1): 1-13.
- [9] Li X, Tao G, Yang Y. Continual deformation analysis with scanning phase method and time sequence phase method in temporal speckle pattern interferometry[J]. *Optics & Laser Technology*, 2001, 33(1): 53-59.
- [10] Hung YY. Shearography: a new optical method for strain measurement and nondestructive testing[J]. *Optical Engineering*, 1982, 21(3): 213391.
- [11] 洪友仁, 何浩培, 何小元. 剪切散斑: 一种光学测量技术及其应用[J]. 实验力学. 2006. 21(6): 667-688.
- [12] 衡伟, 何小元. 从栅线投影中自动提取物体表面三维形状信息的计算机处理方法[J]. 实验力学, 1993, 8(3): 248-253.
- [13] Zhang S. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques[J]. *Optics and lasers in engineering*, 2010, 48(2): 149-158.
- [14] Sutton M A, Orteu J J, Schreier H. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications[M]. *Spring Science & Business Media*, 2009.
- [15] Pan B, Qian K, Xie H, et al. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review[J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(6): 062001.

- [16] Hild F, Roux S. Digital image correlation: from displacement measurement to identification of elastic properties-a review[J]. *Strain*, 2006, 42(2): 69-80.
- [17] 金观昌, 孟利波, 陈俊达, 等. 数字散斑相关技术进展及应用[J]. *实验力学*, 2006, 21 (6): 689-702.
- [18] 高建新. 变形测量的数字图像相关分析法[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 1997,25 (1): 98-103.
- [19] 王琛影, 何小元. 相关识别中的曲面拟合法[J]. *实验力学*, 2000, 15 (3): 280-285.
- [20] 汪敏, 胡小方, 伍小平. 物体内部三维位移场分析的数字图像相关法[J]. *物理学报*, 2006, 55 (10): 5135-5139.
- [21] Peter W H, Ranson W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis[J]. *Optical Engineering*, 1982, 12(3): 427-431.
- [22] Yamaguichi I. A laser-speckle strain gauge[J]. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1981, 14:1270-1273.
- [23] Sutton M A, McNeill S R, Jang J, et al. Effects of subpixel image restoration on digital correlation error estimates[J]. *Optical Engineering*, 1988, 27(10): 271070.
- [24] Zhou P, Goodson K E. Subpixel displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation (DISC)[J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(8): 1613-1620.
- [25] Pan B, Xie H, Xu B, et al. Performance of sub-pixel registration algorithms in digital image correlation[J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17(6): 1615.
- [26] Lecompte D, Smits A, Bossuyt S, et al. Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, 44(11): 1132-1145.
- [27] Pan B, Lu Z, Xie H. Mean intensity gradient: an effective global parameter for quality assessment of the speckle patterns used in digital image correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(4): 469-477.
- [28] Su Y, Zhang Q, Xu X, et al. Quality assessment of speckle patterns for DIC by consideration of both systematic errors and random errors[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 86: 132-142.
- [29] Pan B, Xie H, Wang Z, et al. Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns[J]. *Optics express*, 2008, 16(10): 7037-7048.
- [30] Huang J, Pan X, Peng X, et al. Digital image correlation with self-adaptive Gaussian windows[J]. *Experimental Mechanics*, 2013, 53(3): 505-512.
- [31] Yuan Y, Huang J, Fang J, et al. A self-adaptive sampling digital image correlation algorithm for accurate displacement measurement[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 65: 57-63.

- [32] Bornert M, Brémand F, Doumalin P, et al. Assessment of digital image correlation measurement errors: methodology and results[J]. *Experimental mechanics*, 2009, 49(3): 353-370.
- [33] Smith B W, Li X, Tong W. Error assessment for strain mapping by digital image correlation[J]. *Experimental Techniques*, 1998, 22(4): 19-21.
- [34] Huang J, Pan X, Peng X, et al. High-efficiency cell-substrate displacement acquisition via digital image correlation method using basis functions[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(11): 1058-1066.
- [35] Pan B, Li K. A fast digital image correlation method for deformation measurement[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(7): 841-847.
- [36] Tong W. Formulation of Lucas-Kanade digital image correlation algorithms for non-contact deformation measurements: a review[J]. *Strain*, 2013, 49(4): 313-334.
- [37] Luo P F, Chao Y J, Sutton M A, et al. Accurate measurement of three-dimensional deformations in deformable and rigid bodies using computer vision[J]. *Experimental mechanics*, 1993, 33(2): 123-132.
- [38] Sutton M A, Ke X, Lessner S M, et al. Strain field measurements on mouse carotid arteries using microscopic three - dimensional digital image correlation[J]. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 2008, 84(1): 178-190.
- [39] Hu Z, Luo H, Du Y, et al. Fluorescent stereo microscopy for 3D surface profilometry and deformation mapping[J]. *Optics express*, 2013, 21(10): 11808-11818.
- [40] Chen X, Xu N, Yang L, et al. High temperature displacement and strain measurement using a monochromatic light illuminated stereo digital image correlation system[J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(12): 125603.
- [41] Zhang D S, Arola D D. Applications of digital image correlation to biological tissues[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2004, 9(4): 691-700.
- [42] Malesa M, Malowany K, Tomczak U, et al. Application of 3D digital image correlation in maintenance and process control in industry[J]. *Computers in Industry*, 2013, 64(9): 1301-1315.
- [43] Dufour J E, Beaubier B, Hild F, et al. CAD-based displacement measurements with stereo-DIC[J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 55(9): 1657-1668.
- [44] Lionello G, Cristofolini L. A practical approach to optimizing the preparation of speckle patterns for digital-image correlation[J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(10): 107001.

- [45] Chen Z, Shao X, Xu X, et al. Optimized digital speckle patterns for digital image correlation by consideration of both accuracy and efficiency[J]. *Applied optics*, 2018, 57(4): 884-893.
- [46] Chen Z, Quan C, Zhu F, et al. A method to transfer speckle patterns for digital image correlation[J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(9): 095201.
- [47] Mazzoleni P, Zappa E, Matta F, et al. Thermo-mechanical toner transfer for high-quality digital image correlation speckle patterns[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 75: 72-80.
- [48] Stoilov G, Kavardzhikov V, Pashkouleva D. A comparative study of random patterns for digital image correlation[J]. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2012, 42(2): 55-66.
- [49] Tong W. An evaluation of digital image correlation criteria for strain mapping applications[J]. *Strain*, 2005, 41(4): 167-175.
- [50] Pan B, Xie H, Wang Z. Equivalence of digital image correlation criteria for pattern matching[J]. *Applied optics*, 2010, 49(28): 5501-5509.
- [51] Bruck H A, McNeill S R, Sutton M A, et al. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction[J]. *Experimental mechanics*, 1989, 29(3): 261-267.
- [52] Baker S, Matthews I. Lucas-kanade 20 years on: A unifying framework[J]. *International journal of computer vision*, 2004, 56(3): 221-255.
- [53] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [54] Sebastian C, Patterson E A. Calibration of a digital image correlation system[J]. *Experimental Techniques*, 2015, 39(1): 21-29.
- [55] Pan B, Wang B, Lubineau G, et al. Comparison of subset-based local and finite element-based global digital image correlation[J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 55(5): 887-901.
- [56] Wang Z, Hoang T M, Nguyen D A, et al. High-speed digital-image correlation method: comment[J]. *Optics letters*, 2010, 35(17): 2891-2891.
- [57] Gao G, Huang S, Xia K, et al. Application of digital image correlation (DIC) in dynamic notched semi-circular bend (NSCB) tests[J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 55(1): 95-104.
- [58] Pan B, Li K, Tong W. Fast, robust and accurate digital image correlation calculation without redundant computations[J]. *Experimental Mechanics*, 2013, 53(7): 1277-1289.

- [59] Li N, Sutton M A, Li X, et al. Full-field thermal deformation measurements in a scanning electron microscope by 2D digital image correlation[J]. *Experimental Mechanics*, 2008, 48(5): 635-646.
- [60] Grant B M B, Stone H J, Withers P J, et al. High-temperature strain field measurement using digital image correlation[J]. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2009, 44(4): 263-271.
- [61] Pan B, Wu D, Wang Z, et al. High-temperature digital image correlation method for full-field deformation measurement at 1200 C[J]. *Measurement science and technology*, 2010, 22(1): 015701.
- [62] Fang X, Jia J, Feng X. Three-point bending test at extremely high temperature enhanced by real-time observation and measurement[J]. *Measurement*, 2015, 59: 171-176.
- [63] Wang Z Y, Li H Q, Tong J W, et al. Dual magnification digital image correlation based strain measurement in CFRP Laminates with open hole[J]. *Composites Science and Technology*, 2008, 68(9): 1975-1980.
- [64] Nunes L C S. Simple approach for 2D-DIC with dual field of view[J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(9): 095205.
- [65] Chen F, Chen X, Xie X, et al. Full-field 3D measurement using multi-camera digital image correlation system[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(9): 1044-1052.
- [66] Gradl P R. Digital Image Correlation Techniques Applied to Large Scale Rocket Engine Testing[C]//52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. 2016: 4977.
- [67] Wang Y Q, Sutton M A, Bruck H A, et al. Quantitative error assessment in pattern matching: effects of intensity pattern noise, interpolation, strain and image contrast on motion measurements[J]. *Strain*, 2009, 45(2): 160-178.
- [68] Pan B. Reliability-guided digital image correlation for image deformation measurement[J]. *Applied optics*, 2009, 48(8): 1535-1542.
- [69] Gao Y, Cheng T, Su Y, et al. High-efficiency and high-accuracy digital image correlation for three-dimensional measurement[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 65: 73-80.
- [70] Longuet-Higgins H C. A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections[J]. *Nature*, 1981, 293(5828): 133.
- [71] Pankow M, Justusson B, Waas A M. Three-dimensional digital image correlation technique using single high-speed camera for measuring large out-of-plane displacements at high framing rates[J]. *Applied optics*, 2010, 49(17): 3418-3427.

- [72] Baker S, Matthews I. Equivalence and efficiency of image alignment algorithms[C]//Computer Vision and Pattern Recognition, 2001. CVPR 2001. Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on. IEEE, 2001, 1: I-I.
- [73] Lucas B D, Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision[J]. 1981.
- [74] Pan B. An evaluation of convergence criteria for digital image correlation using inverse compositional Gauss–Newton algorithm[J]. Strain, 2014, 50(1): 48-56.
- [75] Bai R, Jiang H, Lei Z, et al. A novel 2nd-order shape function based digital image correlation method for large deformation measurements[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 90: 48-58.
- [76] Jiang Z, Kemaq Q, Miao H, et al. Path-independent digital image correlation with high accuracy, speed and robustness[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 65: 93-102.
- [77] Xu J, Moussawi A, Gras R, et al. Using image gradients to improve robustness of digital image correlation to non-uniform illumination: effects of weighting and normalization choices[J]. Experimental Mechanics, 2015, 55(5): 963-979.
- [78] Simončič S, Podržaj P. An improved digital image correlation calculation in the case of substantial lighting variation[J]. Experimental Mechanics, 2017, 57(5): 743-753.
- [79] Shao X, Dai X, He X. Noise robustness and parallel computation of the inverse compositional Gauss–Newton algorithm in digital image correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 71: 9-19.
- [80] Wang Z Y, Li H Q, Tong J W, et al. Statistical analysis of the effect of intensity pattern noise on the displacement measurement precision of digital image correlation using self-correlated images[J]. Experimental Mechanics, 2007, 47(5): 701-707.
- [81] Tong W. Subpixel image registration with reduced bias[J]. Optics letters, 2011, 36(5): 763-765.
- [82] Barron J L, Fleet D J, Beauchemin S S. Performance of optical flow techniques[J]. International journal of computer vision, 1994, 12(1): 43-77.
- [83] Chen W, Jiang Z, Tang L, et al. Equal noise resistance of two mainstream iterative sub-pixel registration algorithms in digital image correlation[J]. Experimental Mechanics, 2017, 57(6): 979-996.
- [84] Schreier H W, Braasch J R, Sutton M A. Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation[J]. Optical engineering, 2000, 39(11): 2915-2922.
- [85] Bay B K, Smith T S, Fyhrie D P, et al. Digital volume correlation: three-dimensional strain mapping using X-ray tomography[J]. Experimental mechanics, 1999, 39(3): 217-226.

- [86] Wang T, Jiang Z, Kema Q, et al. GPU accelerated digital volume correlation[J]. *Experimental Mechanics*, 2016, 56(2): 297-309.
- [87] Su Y, Zhang Q, Gao Z, et al. Fourier-based interpolation bias prediction in digital image correlation[J]. *Optics express*, 2015, 23(15): 19242-19260.
- [88] Su Y, Zhang Q, Xu X, et al. Interpolation bias for the inverse compositional Gauss–Newton algorithm in digital image correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 100: 267-278.
- [89] Pan B, Li K. A fast digital image correlation method for deformation measurement[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(7): 841-847.
- [90] Zhou Y, Chen Y Q. Propagation function for accurate initialization and efficiency enhancement of digital image correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(12): 1789-1797.
- [91] Wu R, Kong C, Li K, et al. Real-time digital image correlation for dynamic strain measurement[J]. *Experimental Mechanics*, 2016, 56(5): 833-843.
- [92] Xue Y, Cheng T, Xu X, et al. High-accuracy and real-time 3D positioning, tracking system for medical imaging applications based on 3D digital image correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 88: 82-90.
- [93] Pan B, Tian L. Superfast robust digital image correlation analysis with parallel computing[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(3): 034106.
- [94] Zhang L, Wang T, Jiang Z, et al. High accuracy digital image correlation powered by GPU-based parallel computing[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 69: 7-12.
- [95] Huang J W, Zhang L Q, Jiang Z Y, et al. Heterogeneous parallel computing accelerated iterative subpixel digital image correlation[J]. *Science China Technological Sciences*, 2018: 1-12.
- [96] 邵新星, 戴云彤, 何小元, 等. 实时数字图像相关用于土木准静态实验测量[J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1012003.
- [97] Shao X, Dai X, Chen Z, et al. Real-time 3D digital image correlation method and its application in human pulse monitoring[J]. *Applied optics*, 2016, 55(4): 696-704.
- [98] Luu L, Wang Z, Vo M, et al. Accuracy enhancement of digital image correlation with B-spline interpolation[J]. *Optics letters*, 2011, 36(16): 3070-3072.
- [99] Pan B, Wang Y, Tian L. Automated initial guess in digital image correlation aided by Fourier–Mellin transform[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(1): 014103.
- [100] Zhou Y, Pan B, Chen Y Q. Large deformation measurement using digital image correlation: a fully automated approach[J]. *Applied optics*, 2012, 51(31): 7674-7683.

- [101] Wang Z, Kieu H, Nguyen H, et al. Digital image correlation in experimental mechanics and image registration in computer vision: similarities, differences and complements[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 65: 18-27.
- [102] Pan B, Xie H, Guo Z, et al. Full-field strain measurement using a two-dimensional Savitzky-Golay digital differentiator in digital image correlation[J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(3): 033601.
- [103] Zhu H, Wu G, Shi J, et al. Digital image correlation measurement of the bond-slip relationship between fiber-reinforced polymer sheets and concrete substrate[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2014, 33(17): 1590-1603.
- [104] Wang B, Pan B. Random errors in digital image correlation due to matched or overmatched shape functions[J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 55(9): 1717-1727.
- [105] Jing LT. The Objective Detection and Description of the Types of Pulse Based on the Chinese Traditional Medical Science [J]. *Chinese Journal of Medical Device*, 2005, 25: 318-323.
- [106] Hu C S, Chung Y F, Yeh C C, et al. Temporal and spatial properties of arterial pulsation measurement using pressure sensor array[J]. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2012, 2012: 1-7.
- [107] Wu J H, Chang R S, Jiang J A. A novel pulse measurement system by using laser triangulation and a CMOS image sensor[J]. *Sensors*, 2007, 7(12): 3366-3385.
- [108] Szeliski R. Image alignment and stitching: A tutorial[J]. *Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision*, 2006, 2(1): 1-104.
- [109] Shao X, Chen Z, Dai X, et al. An efficient approach for stereo matching of planar objects in stereo-digital image correlation[J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(8): 085004.
- [110] Hu Z, Xie H, Lu J, et al. Study of the performance of different subpixel image correlation methods in 3D digital image correlation[J]. *Applied optics*, 2010, 49(21): 4044-4051.
- [111] LeBlanc B, Niezrecki C, Avitabile P, et al. Damage detection and full surface characterization of a wind turbine blade using three-dimensional digital image correlation[J]. *Structural Health Monitoring*, 2013, 12(5-6): 430-439.
- [112] Wu R, Chen Y, Pan Y, et al. Determination of three-dimensional movement for rotary blades using digital image correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 65: 38-45.
- [113] Chen X, Yang L, Xu N, et al. Cluster approach based multi-camera digital image correlation: Methodology and its application in large area high temperature measurement[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 57: 318-326.

- [114] Dong S, Yu S, Huang Z, et al. Target-based calibration method for multifields of view measurement using multiple stereo digital image correlation systems[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(12): 124102.
- [115] Ghorbani R, Matta F, Sutton M A. Full-field deformation measurement and crack mapping on confined masonry walls using digital image correlation[J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 55(1): 227-243.
- [116] An Y, Bell T, Li B, et al. Method for large-range structured light system calibration[J]. *Applied optics*, 2016, 55(33): 9563-9572.
- [117] Debevec P E, Taylor C J, Malik J. Modeling and rendering architecture from photographs: A hybrid geometry-and image-based approach[C]//*Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. ACM, 1996: 11-20.
- [118] Nistér D. An efficient solution to the five-point relative pose problem[J]. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2004, 26(6): 756-770.
- [119] Dong S, Shao X, Kang X, et al. Extrinsic calibration of a non-overlapping camera network based on close-range photogrammetry[J]. *Applied optics*, 2016, 55(23): 6363-6370.
- [120] Tsai R. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 1987, 3(4): 323-344.
- [121] Reu P L. A study of the influence of calibration uncertainty on the global uncertainty for digital image correlation using a Monte Carlo approach[J]. *Experimental Mechanics*, 2013, 53(9): 1661-1680.
- [122] Ravn O, Andersen N A, Sørensen A T. Auto-calibration in automation systems using vision[M]//*Experimental robotics III*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1994: 206-218.
- [123] Triggs B, McLauchlan P F, Hartley R I, et al. Bundle adjustment—a modern synthesis[C]//*International workshop on vision algorithms*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1999: 298-372.
- [124] Moré J J. The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory[M]//*Numerical analysis*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1978: 105-116.
- [125] Vo M N, Wang Z, Luu L, et al. Advanced geometric camera calibration for machine vision[J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(11): 110503.
- [126] Shao X, Dai X, Chen Z, et al. Calibration of stereo-digital image correlation for deformation measurement of large engineering components[J]. *Measurement Science and Technology*, 2016, 27(12): 125010.

- [127] Schreier H W, Sutton M A. Systematic errors in digital image correlation due to undermatched subset shape functions[J]. *Experimental Mechanics*, 2002, 42(3): 303-310.
- [128] Xu X, Su Y, Cai Y, et al. Effects of various shape functions and subset size in local deformation measurements using DIC[J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 55(8): 1575-1590.
- [129] Xu X, Su Y, Zhang Q. Theoretical estimation of systematic errors in local deformation measurements using digital image correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 88: 265-279.
- [130] Reinhardt H W, Cornelissen H A W, Hordijk D A. Tensile tests and failure analysis of concrete[J]. *Journal of structural engineering*, 1986, 112(11): 2462-2477.
- [131] Namazu T, Isono Y, Tanaka T. Evaluation of size effect on mechanical properties of single crystal silicon by nanoscale bending test using AFM[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2000, 9(4): 450-459.
- [132] Edwards R L, Coles G, Sharpe W N. Comparison of tensile and bulge tests for thin-film silicon nitride[J]. *Experimental Mechanics*, 2004, 44(1): 49-54.
- [133] Gao G, Huang S, Xia K, et al. Application of digital image correlation (DIC) in dynamic notched semi-circular bend (NSCB) tests[J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 55(1): 95-104.
- [134] Gustafson H, Siegmund G, Crompton P. Comparison of strain rosettes and digital image correlation for measuring vertebral body strain[J]. *Journal of biomechanical engineering*, 2016, 138(5): 054501.
- [135] Biswal S, Ramaswamy A. Measurement of existing prestressing force in concrete structures through an embedded vibrating beam strain gauge[J]. *Measurement*, 2016, 83: 10-19.
- [136] Lim K H, Chew C M, Chen P C Y, et al. New extensometer to measure in vivo uniaxial mechanical properties of human skin[J]. *Journal of biomechanics*, 2008, 41(5): 931-936.
- [137] Boyd S, Shrive N, Wohl G, et al. Measurement of cancellous bone strain during mechanical tests using a new extensometer device[J]. *Medical Engineering and Physics*, 2001, 23(6): 411-416.
- [138] Völkl R, Fischer B. Mechanical testing of ultra-high temperature alloys[J]. *Experimental Mechanics*, 2004, 44(2): 121-127.
- [139] Coimbra D, Greenwood R, Kendall K. Tensile testing of ceramic fibres by video extensometry[J]. *Journal of materials science*, 2000, 35(13): 3341-3345.

- [140] Zhang D, Arola D, Charalambides P G, et al. On the mechanical behavior of carbon-carbon optic grids determined using a bi-axial optical extensometer[J]. *Journal of materials science*, 2004, 39(14): 4495-4505.
- [141] Huang Y H, Liu L, Yeung T W, et al. Real-time monitoring of clamping force of a bolted joint by use of automatic digital image correlation[J]. *Optics & Laser Technology*, 2009, 41(4): 408-414.
- [142] Pan B, Tian L. Advanced video extensometer for non-contact, real-time, high-accuracy strain measurement[J]. *Optics express*, 2016, 24(17): 19082-19093.
- [143] Pan B, Yu L, Wu D. High-accuracy 2D digital image correlation measurements using low-cost imaging lenses: implementation of a generalized compensation method[J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 25(2): 025001.
- [144] Bai P, Zhu F, He X. Optical extensometer and elimination of the effect of out-of-plane motions[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 65: 28-37.
- [145] Zhu F, Bai P, Shi H, et al. Enhancement of strain measurement accuracy using optical extensometer by application of dual-reflector imaging[J]. *Measurement Science and Technology*, 2016, 27(6): 065007.
- [146] Sutton M A, Yan J H, Tiwari V, et al. The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, 46(10): 746-757.
- [147] Pan B, Yu L, Wu D. High-accuracy 2D digital image correlation measurements with bilateral telecentric lenses: error analysis and experimental verification[J]. *Experimental Mechanics*, 2013, 53(9): 1719-1733.
- [148] Genovese K, Casaletto L, Rayas J A, et al. Stereo-digital image correlation (DIC) measurements with a single camera using a biprism[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(3): 278-285.
- [149] Pankow M, Justusson B, Waas A M. Three-dimensional digital image correlation technique using single high-speed camera for measuring large out-of-plane displacements at high framing rates[J]. *Applied optics*, 2010, 49(17): 3418-3427.
- [150] Xia S, Gdoutou A, Ravichandran G. Diffraction assisted image correlation: a novel method for measuring three-dimensional deformation using two-dimensional digital image correlation[J]. *Experimental Mechanics*, 2013, 53(5): 755-765.
- [151] Pan Z, Xia S, Gdoutou A, et al. Diffraction-assisted image correlation for three-dimensional surface profiling[J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 55(1): 155-165.

- [152] Wu L F, Zhu J G, Xie H M, et al. An accurate method for shape retrieval and displacement measurement using bi-prism-based single lens 3D digital image correlation[J]. *Experimental Mechanics*, 2016, 56(9): 1611-1624.
- [153] Pan B, Yu L, Yang Y, et al. Full-field transient 3D deformation measurement of 3D braided composite panels during ballistic impact using single-camera high-speed stereo-digital image correlation[J]. *Composite Structures*, 2016, 157: 25-32.
- [154] Shao X, Eisa M M, Chen Z, et al. Self-calibration single-lens 3D video extensometer for high-accuracy and real-time strain measurement[J]. *Optics express*, 2016, 24(26): 30124-30138.
- [155] Chen L, Treece G M, Lindop J E, et al. A quality-guided displacement tracking algorithm for ultrasonic elasticity imaging[J]. *Medical image analysis*, 2009, 13(2): 286-296.
- [156] Wang Y Q, Sutton M A, Ke X D, et al. On error assessment in stereo-based deformation measurements[J]. *Experimental Mechanics*, 2011, 51(4): 405-422.
- [157] Long X, Fu S, Qi Z, et al. Digital image correlation using stochastic parallel-gradient-descent algorithm[J]. *Experimental Mechanics*, 2013, 53(4): 571-578.
- [158] Yuan Y, Huang J, Peng X, et al. Accurate displacement measurement via a self-adaptive digital image correlation method based on a weighted ZNSSD criterion[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 52: 75-85.
- [159] Carles G, Downing J, Harvey A R. Super-resolution imaging using a camera array[J]. *Optics letters*, 2014, 39(7): 1889-1892.
- [160] Wilburn B, Joshi N, Vaish V, et al. High-speed videography using a dense camera array[C]//*Computer Vision and Pattern Recognition, 2004. CVPR 2004. Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on. IEEE, 2004, 2: II-II.*
- [161] Meehan J. *Panoramic photography*[M]. Amphoto Books, 1990.
- [162] Chen S E. Quicktime VR: An image-based approach to virtual environment navigation[C]//*Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques. ACM, 1995: 29-38.*
- [163] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. *International journal of computer vision*, 2004, 60(2): 91-110.
- [164] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, et al. Speeded-up robust features (SURF)[J]. *Computer vision and image understanding*, 2008, 110(3): 346-359.
- [165] Pohl C, Van Genderen J L. Review article multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications[J]. *International journal of remote sensing*, 1998, 19(5): 823-854.

- [166] Pan B, Asundi A, Xie H, et al. Digital image correlation using iterative least squares and pointwise least squares for displacement field and strain field measurements[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(7-8): 865-874.
- [167] Ma S, Pang J, Ma Q. The systematic error in digital image correlation induced by self-heating of a digital camera[J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(2): 025403.
- [168] Ma Q, Ma S. Experimental investigation of the systematic error on photomechanic methods induced by camera self-heating[J]. *Optics express*, 2013, 21(6): 7686-7698.
- [169] 邵新星, 何小元, 张瑾琳. 多尺度二维数字图像相关测量系统及其应用[J]. *东南大学学报 (自然科学版)*, 2017, 47(2): 242-246.
- [170] 邵新星, 陈振宁, 戴云彤, 等. 数字图像相关方法若干关键问题研究进展[J]. *实验力学*, 2017, 32(3): 305-325.
- [171] 尚洋, 于起峰, 关棒磊, 等. 大型结构变形监测摄像测量研究进展[J]. *实验力学*, 2017 (5): 593-600.
- [172] 邵新星, 陈振宁, 代祥俊, 等. 相机阵列测量二维应变场的高精度分析方法[J]. *中国科学: 技术科学*, 2015, 45(5): 483-490.
- [173] 马沁巍, 顾昊, 马少鹏. 成像光路布置对数字相机热致测量误差影响规律的研究[J]. *实验力学*, 2016, 31(2): 217-223.
- [174] 苏勇, 张青川. 数字图像相关的噪声导致系统误差及散斑质量评价标准[J]. *实验力学*, 2017 (5): 699-717.
- [175] 王博, 俞立平, 潘兵. 数字图像相关方法中匹配及过匹配形函数的误差分析[J]. *实验力学*, 2016, 31(3): 291-298.
- [176] 张明, 缪泓, 熊宸, 等. 高温变形测量中热流场造成畸变的修正方法[J]. *实验力学*, 2017 (5): 718-724.

攻读博士学位期间的研究成果

发表论文

1. Shao X, Mohammed M, Chen Z et al. Self-calibration single-lens 3D video extensometer for high-accuracy and real-time strain measurement [J]. Optics Express, 2016, 24: 30124-30138. (SCI 收录)
2. Shao X, Dai X, Chen Z, et al. Calibration of stereo-digital image correlation for deformation measurement of large engineering components [J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27: 125010. (SCI 收录)
3. Shao X, Dai X, Chen Z, et al. Real-time 3D digital image correlation method and its application in human pulse monitoring [J]. Applied Optics, 2016, 55(4): 696-704. (SCI 收录)
4. Shao X, Dai X and He X. Noise robustness and parallel computation of the inverse compositional Gauss-Newton algorithm in digital image correlation [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 71: 9-19. (SCI 收录)
5. Shao X, Chen Z, Dai X, He X. An efficient approach for stereo matching of planar objects in stereo-digital image correlation [J]. Measurement Science and Technology 2017, 28: 085004. (SCI 收录)
6. Shao X, Zhu F, Su Z, Dai X, Chen Z, He X. Experimental investigation of strain errors in stereo-digital image correlation due to camera calibration [J]. Optical Engineering 2018, 57: 034102. (SCI 收录)
7. Chen Z[#], Shao X[#], He X. Optimized digital speckle patterns for DIC by consideration of both accuracy and efficiency [J]. Applied Optics 2018, 57: 884-893. (SCI 收录)
8. Chen Z, Shao X, He X, Wu J. Non-invasive, full-field and 3D body sensor for surface deformation monitoring of human body in vivo [J]. Journal of Biomedical Optics, 2017, 22: 095001. (SCI 收录)
9. Zhong F, Shao X, Quan C. 3D digital image correlation using a single 3CCD color camera and dichroic filter [J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29: 045401. (SCI 收录)
10. Mohammed M, Shao X, He X. Portable device for local three-dimensional deformation measurement using a single camera [J]. Science China Technological Sciences, 2018, 61, 51-60. (SCI 收录)
11. Dong S, Shao X, Kang X, et al. Extrinsic calibration of a non-overlapping camera network based on close-range photogrammetry [J]. Applied Optics, 2016, 55(23): 6363-6370. (SCI 收录)
12. Dai X, Shao X, Yang F, et al. Determination of thickness uniformity of a transparent film based on in-plane ESPI and radial basis function [J]. Optics communications, 2016, 369: 18-27. (SCI 收录)

13. Dai X, Shao X, Geng Z, et al. Vibration measurement based on electronic speckle pattern interferometry and radial basis function [J]. Optics communications, 2015, 355: 33-43. (SCI 收录)
14. Dai X, Shao X, Yang F, et al. Non-destructive strain determination based on phase measurement and radial basis function [J]. Optics communications, 2015, 338: 348-358. (SCI 收录)
15. Dai X, Shao X, Yang F. Shape measurement by modified phase-shift lateral shearing interferometry and radial basis function [J]. Applied optics, 2017, 56: 5954-5960. (SCI 收录)
16. Dai X, Shao X, Ma C et al. Experimental and numerical investigation on vibration of honeycomb plates based on radial basis function [J]. Experimental techniques 2018, 42: 79-92. (SCI 收录)
17. Dai X, Yun H, Shao X, Wang Y, Zhang D, Yang F, He X. Thermal residual stress evaluation based on phase-shift lateral shearing interferometry [J]. Optics and Lasers in Engineering 2018, 105: 182-187. (SCI 收录)
18. Chen Z, Bobby N, Kevin Y, Shao X, He X, Cynthia G, Anil K. Whole-field macro- and micro-deformation characteristic of unbound water loss in dentin hard tissue [J]. Journal of Biophotonics (2018). (SCI 收录)
19. Dai X, Yang F, Chen Z, Shao X and He X. Strain field estimation based on digital image correlation and radial basis function [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 71: 9-19. (SCI 收录)
20. Dai X, Yuan T, Jiang H, Shao X, Dai M, Yun H, Yang F and He X. Multi-frequency lateral shear interferometer system for simultaneous measurement of thickness and three-dimensional shape [J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(3): 031201. (SCI 收录)
21. Dong S, Yu S, Huang Z, Song S, Shao X, Kang X and He X. Target-based calibration method for multi-field of views measurement using multiple stereo digital image correlation systems [J]. Optical Engineering, 2017, 56: 124102. (SCI 收录)
22. Liu C, Wang C, Xu Y, Li X, Luo C, Dai M, Shao X and He X. Short-working-distance optical imaging system and method for surface detection of underwater structures [J]. Science China Technological Sciences (Accepted) (SCI 收录)
23. 邵新星, 戴云彤, 何小元, 王海涛, 吴刚. 实时数字图像相关用于土木准静态实验测量[J]. 光学学报, 2015,35: 1012003 (EI 收录)
24. 邵新星, 何小元, 张瑾琳. 多尺度二维数字图像相关测量系统及其应用[J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2017,47(2): 242-246 (EI 收录)
25. 邵新星, 陈振宁, 代祥俊, 刘聪, 何小元. 相机阵列测量二维应变场的高精度分析方法[J]. 中国科学·技术科学, 2015,45: 483-490.
26. 邵新星, 陈振宁, 何小元 等. 数字图像相关方法若干关键问题研究进展[J]. 实验力学, 2017, 32: 305-325.
27. 陈振宁, 邵新星, 何小元. 水转印数字散斑场用于颈动脉全场变形测量[J]. 光学学报, 2017, 37: 0312004. (EI 收录)
28. 摩卡, 邵新星, 何小元. 自标定数字图像相关技术用于土木构件大面积全场变形测量[J]. 东南大学学报 (自然科学版) 2018, 48(2): 337-341. (EI 收录)

29. 汪文勇, 高明忠, 张朝鹏, 邵新星, 刘强, 陈海亮. 基于 DIC 技术的预裂煤岩体裂隙演化特性研究[J]. 煤炭科学技术, 46(3): 73-79.
30. 刘聪, 戴云彤, 刘晓鹏, 朱程鹏, 邵新星, 何小元. 二维多相机全场数字图像相关变形测量方法[J]. 光学学报, 2016, 36: 1212002. (EI 收录)
31. Shao X, He X. An image stitching method for high-resolution digital image correlation, International Conference on Computational and Experimental Engineering and Science. (ICCES 2014, Korea)
32. Shao X, He X. Super-resolution digital image correlation using camera array and image stitching, International Conference on Computational and Experimental Engineering and Science. (ICCES 2015, USA)
33. Shao X, He X. Improving precision, accuracy and efficiency of digital image correlation, 17th International Conference on Experimental Mechanics. (ICEM 17, 2016, Greece)
34. Shao X, He X. Statistical error analysis of the inverse composition Gauss-Newton algorithm in digital image correlation, 1th Digital Image Correlation Conference. (iDICS, 2016, USA)
35. Shao X, He X. Photogrammetry-based calibration of stereo-digital image correlation for shape and deformation measurement, 1th Digital Image Correlation Conference. (iDICS, 2016, USA)
36. Shao X, He X. Experimental verification of strain errors in stereo-digital image correlation due to camera calibration, International Conference on Structural Fatigue & Fracture Theory & Experimental Technology. (FFTE 2018)
37. Shao X, Chen R, Yao W, Xia K, He X. Experimental validation of image-based deformation measurement in dynamic laboratory earthquakes, 18th U.S. National Congress for Theoretical and Applied Mechanics. (USNC/TAM 2018)
38. 邵新星, 何小元. 三维实时数字图像相关用于材料力学教学. 中国力学大会 (2017)
39. 邵新星, 何小元. 亚像素图像合成. 中国力学大会 (2015)
40. 邵新星, 何小元. 多尺度二维数字图像相关测量系统及其应用. 中国力学大会 (2015)
41. 邵新星, 何小元. 实时数字图像相关用于土木准静态实验测量. 中国实验力学大会 (2015)
42. 邵新星, 胡邹恒, 何小元. 单相机三维形貌重建技术用于体积测量的研究. 中国力学大会 (2013)
43. 邵新星, 何小元. 一种用于三维数字图像相关的相机外参标定方法, 发明专利. (已公开)
44. 何小元, 刘聪, 戴美玲, 邵新星. 一种用于浑浊介质中结构表面检测的阵列相机观测方法, 发明专利. (已公开)

科研项目

1. 国家自然科学基金科学仪器基础研究专款项目“采用相机阵列的高分辨全场应变测量方法研究与测量系统研制”, 11327201, 2014.01-2017.12.
2. 国家自然科学基金重点基金项目“数字图像相关测量中若干关键问题研究”, 11532005, 2016.01-2020.12.

3. 国家自然科学基金面上项目“用于任意曲表面变形分析的便携式原位三维变形测量系统研制”，11272089，2013.01-2016.12.
4. 国家科技支撑计划课题“突发灾害后桥梁水下结构快速检测装备研制”，2014BAK11B04，2014.01-2016.12.
5. 国家自然科学基金青年基金项目“薄壁空心球及其组合结构的压缩力学性能试验研究”，11602056，2017.01-2019.12.

获得荣誉

1. 三好研究生
2. 吕志涛院士奖励金
3. 国家奖学金（2015）
4. 国家奖学金（2017）
5. 东南大学优秀博士学位论文基金资助（2015）
6. 东南大学优秀博士论文培育基金资助（2017）
7. 东南大学优秀博士学位论文及创新人才培养基金项目资助