

北京林业大学

全日制专业学位研究生学位论文 开题报告

学 号 : 7170196

姓 名 : 王志奇

学 位 类 型 : 专业硕士

专 业 领 域 : 机械工程

研 究 方 向 : 工程测试技术

学 院 : 工学院

导 师 : 赵健

职 称 : 讲师

填表日期: 2018 年 10 月 24 日

填 表 说 明

1. 本开题系除 MFA 艺术硕士之外的全日制专业学位研究生个人开题报告，研究生须在校内外导师指导下，指导研究生填写。具体要求见《北京林业大学全日制专业学位研究生论文开题的有关规定》（请从“研究生院主页—研究生培养—培养制度”处查阅）和所在专业学位类型/领域研究生培养方案（请从“研究生院主页—研究生培养—培养方案”处查阅）。

2. 开题报告文献综述部分文献引用格式须符合《北京林业大学研究生学位论文格式的统一要求》的相关规定。

3. 开题工作最晚于研究生入学后第三学期 10 底之前完成，具体时间各专业学位类别/领域可根据本专业学位类别/领域特点和实际情况进行安排。

4. 打印要求：开题报告经本人修改提交、校内导师审核通过后，用 A4 纸打印，签字完毕后交各学院研究生办公室存档一份。

一、基本信息

开 题 者 基 本 信 息	学号	7170196	姓名	王志奇	性别	男	出生年月	1994 年 9 月
	入学时最后学历	本科		入学时最后学位	学士学位		入学时最后毕业年月	2016 年 7 月
	入学时最后毕业院校	北京林业大学				入学时最后毕业专业	机械设计制造及其自动化	
	入学时最后毕业论文题目	油用牡丹籽实脱荚机的优化分析与设计						
	入学时最后毕业论文主要内容	<p>(限 400 字):</p> <p>以一种已研制的油用牡丹脱荚装置为基础, 在熟悉其力学性能的前提下, 首先探究油用牡丹籽实含水率对脱荚装置的脱荚率及碎仁率的影响, 力求得到最适合于脱荚作业的油用牡丹籽实含水率; 其次使用 XH5871 电荷信号测试分析系统试验探究振动筛的振动对脱荚装置本身的影响, 以及使用 ANSYS Workbench 求出该装置的固有频率。综合上述两方面信息, 对装置进行振动特性分析, 并以此为基础提出减振措施。</p>						
选 题 基 本 信 息	论文名称	面向大尺寸构件的数字图像相关测量系统与试验研究						
	主题词	数字图像相关 测量误差 大尺寸构件 图像拼接						
	研究题目	A	属于: A.导师课题一部分 B.委培单位的课题 C.其他					
	研究类型	B	A.基础研究 B.应用研究 C.综合研究 D.其他研究					
	选题来源	I	A.973、863 项目 B.国家社科规划、基金项目 C.教育部人文、社会科学研究项目 D.国家自然科学基金项目 E.中央、国家各部门项目 F.省(自治区、直辖市)项目 G.国际合作研究项目 H.与港、澳、台合作研究项目 I.企、事业单位委托项目 J.外资项目 K.国防项目 L.学校自选项目 M.非立项 N.其他					

	经费	2.5 万元
	选题 中文 摘要	<p>（限 300 字）</p> <p>基于数字图像相关技术，提出一种适用于在陈列馆室内照度低且发生变化的环境下，对大尺寸宋代古船的保护状况进行变形监测的方法，设计出一种易于使用的、有效的变形监测系统。该系统用于检测古船保护过程中潜在的危险情况，为改善保护环境、加固古船结构提供科学依据。为实现利用数字图像相关技术对大尺寸的古船变形进行监测，保证其测量的精度。根据工程实际情况，本课题的研究内容主要有提出应对照度低且发生变化导致 DIC 计算精度降低的解决方案、探求上述解决方案与数字图像相关插值偏差的关系、将图像拼接技术和数字图像相关技术结合实现大尺寸构件的全自动变形监测。</p>

二、报告正文

(一) 立题依据

1. 选题的理论意义

1.1 古船变形监测的重要意义

埋藏于海底的结构完整的木质沉船载有重要的历史、考古、社会和科学信息^[1]，具有较高的科学价值及社会价值。因此，对于其进行完善保护是十分必要的。1974 年被打捞于泉州湾后渚港海底的宋代海船，是国内发掘的第一艘体量大、年代较早的远洋贸易木帆船，至今已达 40 余年。作为国内乃至亚洲大型海洋出水木质文物保护的先例，泉州宋船采取先安装复原再缓慢自然阴干脱水的特有保护方式，成功地保存了船体^[2]。为实现妥善保存，现该古船被存放于泉州湾古船陈列馆中。

在海洋水底环境下，古船木材材质受埋藏环境的生物、物理和化学作用，发生了不同程度的侵蚀变化^[3,4]。这些侵蚀引起古船木材纤维素的缺失，进而破坏古船木材致密结构，在船体形成裂缝和孔洞，使其机械强度显著降低，抵抗外界环境影响的能力减弱^[5-8]。

在古船保护过程中，面临的主要挑战为博物馆中相对湿度随季节的变化。古船木材的相对湿度力求与环境相对湿度平衡。在相对湿度较高的环境中，木材中的孔洞将会充满水；如果相对湿度下降，则会出现水分解吸。水分解吸会对古船木材施加不可抵抗的毛细管力，进而导致木材严重收缩。不受控制的水分解吸过程可导致古船木材发生皱缩、翘曲、开裂、盐分沉淀和腐蚀产物的生成^[9]。更严重的是，诸如皱缩、翘曲的过程可能会引发古船出现更严重的局部变形。

因此，在古船保护过程中，使用一种易于使用的、有效的变形监测系统对古船保护状况进行监测是非常必要的。这种系统可以在早期检测到潜在的危险情况，为改善保护环境、加固古船结构提供强有力的科学依据。

1.2 DIC 技术的优势

数字图像相关 (digital image correlation, DIC) 技术最初由美国南卡罗来纳州大学的 Peters 和日本的 Yamaguchi 于上世纪 80 年代初分别独立提出^[10,11], 是一种用于全场形貌、位移和变形测量的基于图像的非接触式光学方法。DIC 技术首先使用数字成像设备 (光学成像, 电子成像及扫描探针成像设备等等) 获取被测对象在不同状态下的数字图像, 然后使用基于相关性的匹配和数值微分方法进行图像分析, 以定量计算被测对象的全场位移和全场应变。DIC 技术具有如下优点: 简单实用, 对试验环境要求低, 适用性广, 非接触 (在应用过程中对试件不造成损伤), 可实现全场测量^[12,13]。

1.3 将 DIC 技术应用于古船变形监测的难点

鉴于上述优势, 本课题尝试基于 DIC 技术, 研发出一款变形监测系统, 用于对古船保护状况进行监测。但由于古船保护环境以及古船本身的特殊性, 将 DIC 技术直接应用于古船变形监测尚存在一些难点: (1) 为了实现精确的 DIC 测量, 被测对象表面应具有高对比度、随机性、各向同性和稳定性的散斑图案^[14]。最常用的方法是使用黑色与白色的哑光漆在被测对象表面喷涂散斑, 以此来保证 DIC 计算结果具有较高的精度。但古船作为木质古文物, 是受保护对象。在其表面喷涂散斑是对古船的污染, 试验过后不易清除, 所以在应用 DIC 进行监测时, 只能对古船表面天然纹理进行图像采集与分析。但是古船木材天然纹理的随机性和对比度各异, 不能保证 DIC 监测具有一致的测量精度。而作为一款测量系统, 在任何条件下保证测量精度一致是十分必要的; (2) 《博物馆照明设计规范 (GB/T 23863-2009)》中指出, 竹木制品属于对光敏感的展品, 在展陈期间陈列室展品照度不允许大于 150lx。而在泉州湾古船陈列馆内部使用数字式照度计进行测量时发现, 陈列馆照度仅为 80~100lx。在实验室中进行常规 DIC 试验时, 照度一般为 300~400lx。照度较低会引起对古船表面天然纹理所采得图像对比度显著下降, 进而导致 DIC 计算精度大幅下降甚至无法使用。同时, 博物馆对自然光没有完全隔绝, 阳光会从陈列馆上方的小窗射入。随着时间的推移, 天气的变化, 阳光在每天不同时刻射入馆内的强度和方向会发生变化, 在古船表面同一区域天然纹理的对比度会随之改变, 这样也不能保证 DIC 监测系统时时刻刻保持一致的精度; (3) 泉州湾宋代古船尺寸较大。出土时, 船体自艏部以上结构及桅、舵、碇等已不复存在, 残存船体水下部分, 残长 24.20 米, 残宽 9.15 米^[15]。与古船的残长、残宽相比, DIC 技术中常用的工业镜头视场非常小。暂且不谈使用一个工业镜头监测整个船体, 即使是用一

个工业镜头监测船体的某一构件都是十分困难的。如使用 DIC 技术对大尺寸的古船进行监测，则必须解决上述难题。

2. 国内外研究述评

2.1 DIC 误差研究现状

作为一款测量系统，其在各种环境条件下，在不同的时刻应该具有一致的测量精度，即具有一致的计算误差。对于 DIC 的计算误差，人们通常采用亚像素的平移实验，比较数字图像相关计算结果与实际加载平移量的偏差，估计数字图像相关方法的计算精度。数字图像相关的系统误差包括插值误差引起的插值偏差、插值噪声耦合引起的噪声引入偏差和形函数欠匹配引起的系统误差。

2.1.1 插值偏差

上世纪八九十年代，Sutton 和 Choi 分别在数字图像相关亚像素实验中观测到周期性的系统误差^[16,17]。Choi 发现：误差曲线周期为 1 像素，形状类似于正弦曲线，最大可达百分之六个像素。

其后，Schreier 表明这种周期性系统误差的产生原因在于插值：相关计算为了达到亚像素的测量精度，需要对图像亚像素位置进行灰度插值，由于插值不可能完全重构图像的原始信息，会引起相关计算中亚像素位置测量的周期性系统误差，称为插值偏差（interpolation bias）^[18]。为了解释插值偏差的正弦形状，Schreier 在论文中提出了插值滤波器相位误差（phase error）的概念。考虑函数 f ，在平移 δ 后，平移函数为 f' ，在频域

$$\hat{f}' = \exp(-i\delta\pi\tilde{k})\hat{f},$$

其中 $\tilde{k} = 2/\lambda$ 是归一化波数（normalized wave number）。故而理想的传递函数

$$\hat{h}_{ideal} = \exp(-i\delta\pi\tilde{k}),$$

理想的传递函数不改变幅度，而仅改变相位。实际的传递函数 $\hat{h}(\tilde{k}, \delta)$ 较之于理想传递函数的相移为

$$\Delta\phi = \arctan \frac{\text{Im } \hat{h}(\tilde{k}, \delta)}{\text{Re } \hat{h}(\tilde{k}, \delta)} - \delta\pi\tilde{k},$$

对应的位移误差

$$\Delta_p = \lambda\Delta\phi/2\pi = \Delta\phi/\pi\tilde{k}。$$

在 Schreier 的论文中，他自己已经明确指出插值偏差对位移的依赖关系很难预测，因为插值滤波器的相位误差是与频率相关的，而现实中的散斑图是由各个频率的信号组合而成的，故而该理论框架在实际采用中困难重重。

为了弥补上述不足，Wang 从空域对插值偏差进行了分析^[19]。定义参考图为 $I(X_{ij})$ ，平移 u_0 单位得到的变形图为 $T(X_{ij})$ ，参考图中 (x_i, y_i) 平移后的位置为 $(\xi_{ij})_0 = (x_i + u_0, y_i)$ ，Wang 证明了插值偏差

$$u_{ib} = - \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{h(X_{ij}) \cdot \nabla T_x((\xi_{ij})_0)\}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [\nabla T_x((\xi_{ij})_0)]^2}$$

其中 ∇T_x 表示变形图 x 方向的灰度梯度， $h(X_{ij}) = T((\xi_{ij})_0) - I(X_{ij})$ 表征了插值结果与真实结果的差距。他通过最小平方距离（sum of squared differences, SSD）准则，通过图像采样点的值估计了线性和三次多项式插值时图像平移的插值偏差。然而，Wang 的理论不适用于精度较高的 B 样条插值和 OMOMS 插值。

虽然插值偏差的定量分析遇到一些困难，研究者们仍努力通过各种手段减小插值偏差。首先是提升插值算法，高阶的插值方法虽然通常具有更高的精度，但是计算时间更长，所以更好的手段是优化插值基函数，从而在引入很少额外计算量的情况下提高精度^[20]。改良 B 样条插值算法可以在保证计算时间与 B 样条基本相同的情况下引入更小的插值偏差^[21]。另一方面，潘兵提出对原始散斑图事先采用高斯滤波器 (Gaussian filter) 进行预处理，周轶昊进一步推荐采用巴特沃斯滤波器 (Butterworth filter)^[22, 23]。低通滤波可以有效降低插值偏差，但是有文献报道图像细节的丢失会降低相关计算结果的空间分辨率^[24]。在图像处理领域，Rohde 提出采用相关函数的积分形式代替求和形式，并通过随机积分方法近似相关函数的积分，取得了良好的效果，然而该成果并未被引入数字图像相关领域^[25]。

类似的问题不仅出现在数字图像相关中，在图像处理、计算机视觉、卫星遥感测量等领域对图像进行亚像素匹配的过程中，也发现了插值偏差的存在^[25-27]。

2015 年，苏勇通过傅里叶分析手段给出了数字图像相关插值偏差的正弦近似公式^[28]。

$$u_e \approx C \sin 2\pi u_0$$

$$C = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\int_{-1/2}^{1/2} \left[(v-1)\hat{\phi}(v-1) - (v+1)\hat{\phi}(v+1) + \hat{\phi}(v)\hat{\phi}(v+1) + \hat{\phi}(v)\hat{\phi}(v-1) \right] \cdot |\hat{f}(v)|^2 dv}{\int_{-1/2}^{1/2} v^2 \hat{\phi}(v) |\hat{f}(v)|^2 dv}$$

式中，插值偏差振幅 C 是仅由参考函数 $\hat{f}(v)$ 和插值算法 $\hat{\phi}(v)$ 决定的常数。插值偏差的正弦近似公式解释了插值偏差随平移量呈正弦变化的现象，直观给出了插值偏差振幅与参考函数和插值算法的直接依赖关系， $|\hat{f}(v)|^2$ 给出了参考函数的功率谱，因子 $(v-1)\hat{\phi}(v-1)-(v+1)\hat{\phi}(v+1)+\hat{\phi}(v)\hat{\phi}(v+1)+\hat{\phi}(v)\hat{\phi}(v-1)$ 单纯由插值算法本身决定，表征了特定频率的插值偏差响应，被称为插值偏差核 $E_{ib}(v)$ 。

2.1.2 噪声引入偏差

在数字图像相关技术中，图像噪声也会引入系统误差，这一点最早由 Wang 在 2010 年进行报道^[19]。Wang 发现，在使用 SSD 准则的情况下，图像的随机噪声会与插值算法耦合引入系统误差，称为噪声引入偏差（noise-induced bias）。Wang 对线性和三次插值情况下的噪声引入偏差进行了理论分析。遗憾的是，Wang 建立的理论框架推导方式复杂难懂，而且不适用于当前普遍使用的 B-样条插值和性能优异的 O-MOMS 插值算法。

2015 年，苏勇给出了噪声引入偏差的一般形式^[29]。邵新星等人提出了全新的 DIC 理论误差公式，该公式的主要特点为消除了噪声引入误差项^[30]。噪声引入误差可以消除的原因在于反向组合高斯-牛顿算法的使用。反向组合高斯-牛顿算法是由美国卡耐基梅隆大学的 Baker 和 Matthews 提出，其目的是为了消除 Lucas-Kanade 算法（即数字图像相关中的 Newton-Raphson 迭代算法）的冗余计算，即 Hessian 矩阵的重复计算^[31,32]。Baker 和 Matthews 在提出反向组合高斯-牛顿算法时，已经对该算法的各项性能以及与其他算法的比较做出了较为详尽的分析。对于噪声的影响，其结论是：Lucas-Kanade 算法对参考图噪声下具有更加稳健的性能，而反向组合高斯-牛顿算法对变形图噪声具有更加稳健的性能。总的来说，Lucas-Kanade 算法比反向组合高斯-牛顿算法具有更好的抗噪声能力。邵新星等人对 Baker 和 Matthews 的结论进行修正，推导出 DIC 误差公式

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

其中第一项为插值偏差，第二项是噪声引入偏差。同时他指出噪声引入偏差的原因在于 $E(\xi_1(x_i)^2) = \sigma_1^2$ ，在反向组合高斯-牛顿算法中，使用不包含 $f(x_i)$ 的灰度梯度算子（如光流中的 Barron 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偏差^[33]。

2.1.3 形函数欠匹配引起的系统误差

在计算过程中, DIC 算法需采用一种合适的形函数近似目标图像子区的真实变形。许多文献中都采用了能表征均匀变形的一阶形函数^[34,35]。然而, 考虑试件中可能出现复杂的非均匀变形, 有文献建议采用可近似非均匀变形的二阶形函数^[36,37]。在实际测量中, 选取一种能够准确地描述变形子区内部真实变形的形函数无疑会获得最精准的位移结果。然而, 由于变形后图像子区内部的变形通常是待求的未知量, 且对于不同图像子区往往是不同的, 因而预先选定的形函数不可避免地会出现欠匹配或者过匹配问题, 产生计算误差。为研究形函数欠匹配对位移测量结果的影响, 研究人员先后给出了欠匹配零阶形函数引入的系统误差的理论公式, 并验证了在 3D-DIC 的左右视图匹配过程中以及在非均匀变形的情况下使用二阶形函数能够获得更高的精度^[38,39]。

2015 年, 王博发现过匹配形函数不会增加系统误差, 但会引入额外的随机误差, 且这种随机误差会远小于欠匹配形函数引起的系统误差^[40]。鉴于子区变形情况通常未知, 基于上述发现, 在进行 DIC 试验时建议: 除非已知试样为零阶或一阶变形, 否则应采用二阶形函数。这样可以有效抑制形函数欠匹配引起的系统误差。

2.1.4 总结

数字图像相关的系统误差中, 噪声引入偏差可通过引入反向组合高斯-牛顿算法予以消除。在 DIC 计算过程中, 若选用二阶形函数则可有效消除由形函数欠匹配引起的系统误差。暂时无法消除的插值偏差, 已经有学者推导出基于最小平方距离准则的正弦近似公式, 明确了插值偏差振幅与图像(即参考函数)的功率谱和插值偏差核的关系。

2.2 大尺寸构件 DIC 测量研究现状

在工程实际应用中, 很多情况下被测对象尺寸都较大, 如土木工程中的梁、柱等。在使用 DIC 技术对柱进行应变分析时, 若只考虑图像高度方向的尺寸, 则宽度方向的有效分辨率将会降低; 若只考虑图像宽度方向的尺寸, 则高度方向尺寸会超出相机的视场范围, 不能有效地进行全场测量。2013 年, Chen 提出一种三维多相机 DIC 方法, 但该方法有以下局限性^[41]: (1) 任意相邻相机之间一般至少需要标定三次, 标定过程较为繁琐且标定精度要求较高; (2) 相邻相机之间至少要有一半的重叠区域, 需要相机数量较多; (3) 标定过程将多个相机统一到一个世界坐标系下, 标定完成后若相机之间的相对位置发生变形, 则计算结果会出现折痕。

2016 年, 刘聪提出了一种借助于逐步优化的单应矩阵求解方法, 实现了图像配准,

将其与数字图像相关方法结合,可针对细长平面试件进行变形测量^[42]。该方法基于图像拼接方法,基本原理如下: SURF 点检测主要分为特征点检测和特征点描述两个步骤^[43]。特征点检测首先要计算不同尺度下的图像 Hessian 矩阵,将矩阵行列式定义为响应值,再将每一点的响应值与该点周围 8 个及该点上下两层尺度各 9 个共 26 个响应值进行比较,若为极大值则该点为该尺度下的特征点,通过三维二次函数拟合得到特征点的亚像素位置; SURF 算法主要采用积分图像及盒状滤波器来提高运算效率。特征点描述通过计算特征点周围的 Harr 小波响应来分配特征点方向及 64 维特征数据。得到两幅图像特征点位置之后,可以根据最近邻距离比次近邻距离的方法对特征点进行粗匹配^[44]。粗匹配过程中一般使用 k 维 (K-D) 树及最优节点优先 (BBF) 算法来提高搜索效率,再使用随机抽样一致性 (RANSAC) 方法对特征点进行提纯^[45, 46],进而使用图像融合技术实现拼接。

3. 参考文献

- [1] Fors Y, Jalilvand F, Risberg E D, et al. Sulfur and iron analyses of marine archaeological wood in shipwrecks from the Baltic Sea and Scandinavian waters[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2012, 39(7):2521-2532.
- [2] 费利华. 泉州湾宋代海船保存现状的调查研究[J]. *中国文物科学研究*, 2014(3):74-79.
- [3] 李国清. 出水海洋古沉船的保护[J]. *中国文化遗产*, 2013(4):68-69.
- [4] Eriksen A M, Gregory D, Shashoua Y. Selective attack of waterlogged archaeological wood by the shipworm, *Teredo navalis*, and its implications for in-situ, preservation[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2015, 55:9-15.
- [5] Cavallaro G, Lazzara G, Milioto S, et al. Thermal and dynamic mechanical properties of beeswax-halloysite nanocomposites for consolidating waterlogged archaeological woods[J]. *Polymer Degradation & Stability*, 2015, 120:220-225.
- [6] Bjurhager I, Halonen H, Lindfors E L, et al. State of degradation in archeological oak from the 17th century Vasa ship: substantial strength loss correlates with reduction in (holo)cellulose molecular weight.[J]. *Biomacromolecules*, 2012, 13(8):2521.
- [7] Elshahawi SI, Trindade-Silva AE, Hanora A, et al. Boronated tartrolon antibiotic produced by symbiotic cellulose-degrading bacteria in shipworm gills[J]. *PNAS*, 2013, 110(4):E295-E304.

- [8] Tahira A, Howard W, Pennington E R, et al. Mechanical strength studies on degraded waterlogged wood treated with sugars[J]. *Studies in Conservation*, 2016, 62(4):1-6.
- [9] Gregory D, Jensen P, Strætkvern K. Conservation and in situ preservation of wooden shipwrecks from marine environments[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2012, 13(3):S139-S148.
- [10] Peters W H, Ranson W F. Digital Imaging Techniques In Experimental Stress Analysis[J]. *Optical Engineering*, 1982, 21(3):427-431.
- [11] Yamaguchi I. A laser-speckle strain gauge[J]. *Journal of Physics E Scientific Instruments*, 2000, 14(11):1270.
- [12] Pan, Bing, Qian, Kemao, Xie, Huimin, et al. TOPICAL REVIEW:, Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review[J]. *Measurement Science & Technology*, 2009, 20(6):152-154.
- [13] Bing P, Hui-Min X, Bo-Qin X, et al. Performance of sub-pixel registration algorithms in digital image correlation[J]. *Measurement Science & Technology*, 2006, 17(6):1615.
- [14] Dong Y L, Pan B. A Review of Speckle Pattern Fabrication and Assessment for Digital Image Correlation[J]. *Experimental Mechanics*, 2017, 57(3):1-21.
- [15] 费利华, 李国清. 泉州湾宋代海船保护 40 年回顾、现状与分析[J]. *文物保护与考古科学*, 2015, 27(4):95-100.
- [16] 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):870-877.
- [17] S. Choi, S. P. Shah. Measurement of deformations on concrete subjected to compression using image correlation[J]. *Experimental Mechanics*, 1997, 37(3):307-313.
- [18] 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):2915-2921.
- [19] 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*, 2010, 45(2):160-178.
- [20] Schreier H, Orteu J J, Sutton M A. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*[M]. Springer US, 2009.
- [21] Long L, Wang Z, Vo M, et al. Accuracy enhancement of digital image correlation with B-spline interpolation[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16):3070-2.

- [22] Pan B. Bias error reduction of digital image correlation using Gaussian pre-filtering[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2013, 51(10):1161-1167.
- [23] Zhou Y, Sun C, Song Y, et al. Image pre-filtering for measurement error reduction in digital image correlation[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2015, 65(1):46-56.
- [24] Baldi A, Bertolino F. Experimental Analysis of the Errors due to Polynomial Interpolation in Digital Image Correlation[J]. Strain, 2015, 51(3):248-263.
- [25] Rohde GK, Aldroubi A, Healy DM Jr. Interpolation artifacts in sub-pixel image registration.[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, 18(2):333-345.
- [26] Shimizu M, Okutomi M. Sub-Pixel Estimation Error Cancellation on Area-Based Matching[J]. International Journal of Computer Vision, 2005, 63(3):207-224.
- [27] Inglada J, Muron V, Pichard D, et al. Analysis of Artifacts in Subpixel Remote Sensing Image Registration[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2006, 45(1):254-264.
- [28] Su Y, Zhang Q, Gao Z, et al. Fourier-based interpolation bias prediction in digital image correlation.[J]. Optics Express, 2015, 23(15):19242-60.
- [29] Su Y, Zhang Q, Xu X, et al. Noise-induced bias for convolution-based interpolation in digital image correlation[J]. Optics Express, 2016, 24(2):1175-1195.
- [30] Shao X, Dai X, He X. Noise robustness and parallel computation of the inverse compositional Gauss–Newton algorithm in digital image correlation[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2015, 71:9-19.
- [31] Baker S, Matthews I. Equivalence and Efficiency of Image Alignment Algorithms[J]. Proc. IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision & Pattern Recognition, 2001, 1:I-1090 - I-1097 vol.1.
- [32] Baker, Simon, Matthews, Iain. Lucas-Kanade 20 Years On: A Unifying Framework[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 56(3):221-255.
- [33] J. L. Barron, D. J. Fleet, S. S. Beauchemin. Performance of optical flow techniques[J]. International Journal of Computer Vision, 1994, 12(1):43-77.
- [34] Pan B, Li K. A fast digital image correlation method for deformation measurement[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2011, 49(7):841-847.
- [35] 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.

- [36] Lu H, Cary P D. Deformation measurements by digital image correlation: Implementation of a second-order displacement gradient[J]. *Experimental Mechanics*, 2000, 40(4):393-400.
- [37] Gao Y, Cheng T, Su Y, et al. High-efficiency and high-accuracy digital image correlation for three-dimensional measurement[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2015, 65:73-80.
- [38] Hubert W. Schreier, Michael A. Sutton. Systematic errors in digital image correlation due to undermatched subset shape functions[J]. *Experimental Mechanics*, 2002, 42(3):303-310.
- [39] Yu L, Pan B. The errors in digital image correlation due to overmatched shape functions[J]. *Measurement Science & Technology*, 2015, 26(4):45202-45210(9).
- [40] Wang B, Pan B. Random Errors in Digital Image Correlation Due to Matched or Overmatched Shape Functions[J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 55(9):1-11.
- [41] Chen F, Chen X, Xie X, et al. Full-field 3D measurement using multi-camera digital image correlation system[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2013, 51(9):1044-1052.
- [42] 刘聪, 戴云彤, 戴美玲, 等. 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(12):97-105.
- [43] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, et al. Speeded-Up Robust Features (SURF)[J]. *Computer Vision & Image Understanding*, 2008, 110(3):346-359.
- [44] Lowe D G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2):91-110.
- [45] Bentley, Jon Louis. Multidimensional binary search trees used for associative searching[J]. *Communications of the Acm*, 1975, 18(9):509-517.
- [46] Beis J S, Lowe D G. Shape indexing using approximate nearest-neighbour search in high-dimensional spaces[C]// *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Puerto Rico*. 1997:1000-1006.
- [47] B Pan, K Li, W Tong. Fast, Robust and Accurate Digital Image Correlation Calculation Without Redundant Computations[J]. *Experimental Mechanics*, 2013, 53(7):1277-1289.
- [48] 戴云彤, 郑永峰, 管东芝, 等. 多相机数字图像相关在变形灌浆套简单向拉伸试验中的应用[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2017, 47(1):159-163.
- [49] 陈振宁, 刘聪, 戴云彤, 等. BFRP 混凝土圆柱破坏全周监测与可靠性研究[J]. *工程力学*, 2015(12):147-153.

[50] Blaber J, Adair B, Antoniou A. Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software[J]. Experimental Mechanics, 2015, 55(6):1105-1122.

（二）研究方案

1. 研究目标、研究内容及拟解决的关键问题

1.1 研究目标

基于数字图像相关技术，提出一种适用于在陈列馆室内照度低且发生变化的环境下，对大尺寸宋代古船的保护状况进行变形监测的方法，设计出一种易于使用的、有效的变形监测系统。该系统用于检测古船保护过程中潜在的危险情况，为改善保护环境、加固古船结构提供科学依据。

1.2 研究内容

为实现利用数字图像相关技术对大尺寸的古船变形进行监测，保证其测量的精度。根据工程实际情况，本课题的研究内容主要有提出应对照度低且发生变化导致的 DIC 计算精度降低的解决方案、探求上述解决方案与数字图像相关插值偏差的关系、将图像拼接技术和数字图像相关技术结合实现大尺寸构件的全自动变形监测。

1.2.1 天然纹理对比度低的解决方案

基于数字图像相关的古船变形监测系统是一套对古船表面位移、应变进行监测的装置，可自动采集古船全景图像，并将所得图像自动导入到 DIC 软件中进行计算，可求得全场位移云图与应变云图，借此可对古船的保护状况进行监测。

为解决博物馆环境照度低引起的古船天然纹理对比度降低的问题，在图像采集阶段采用延长相机曝光时间的方法。该方法可实现在环境照度相对较低的情况下，采集到天然纹理对比度较高的古船表面纹理图像，用于保证 DIC 计算的高精度。

1.2.2 曝光时间选取对 DIC 测量精度的影响

延长曝光时间可以有效提高照度低的环境下试件表面纹理的对比度，但曝光时间的取值仍然无法确定。由苏勇推导出的基于最小平方距离（SSD）的 DIC 插值偏差的正弦近似公式可知，插值偏差振幅与插值偏差核和图像功率谱相关。其中，插值偏差核源于插值算法，使用同一种算法的话，插值偏差核是不变的，即我们得到了插值偏

差振幅与图像功率谱的一一对应关系。改变曝光时间,即可改变图像功率谱,进而影响插值偏差的振幅大小。只要保证插值偏差振幅大小一致,则我们可反推与之对应的曝光时间值。在不同情况下调整该值,则可保证 DIC 变形监测系统在对各种照度条件下采集到的古船表面不同位置的图像进行计算时精度能够保持一致。

但是, Pan 指出,零均值归一化最小平方距离(zero-mean normalized sum of square difference, ZNSSD)准则具有更高的鲁棒性^[47]。鉴于图像采集时环境照度会发生变化,因此本研究在进行 DIC 计算时采用 ZNSSD 相关准则。而基于 ZNSSD 准则的插值偏差公式尚不明确,故对其进行推导,探寻插值偏差与曝光时间的对应关系,确保 DIC 计算精度保持一致,为搭建面向大尺寸构件的全自动 DIC 变形监测系统打好基础。

1.2.3 面向大尺寸构件的全自动 DIC 监测系统的搭建

在对大尺寸构件进行图像采集时,往往由于工业镜头视场有限,无法在各个方向上采集到完整的空间分辨率不受损的图像。因此我们考虑将图像拼接技术与数字图像相关技术相结合,既保证了大尺寸构件图像的完整采集,又保证了空间分辨率不受损失,实现对大尺寸构件的变形监测。在刘聪工作的基本思路上,我们考虑到数字图像相关技术内在包含了图像配准的功能。因此我们在图像拼接过程中选用了基于 DIC 的图像配准方法,将其与基于小波分解的图像融合算法相结合,实现大尺寸构件全景图像的生成。

在图像拼接与数字图像相关方法结合的相关研究中,很多学者都采用了购置多个相机,搭建相机矩阵的方法^[48,49]。这种方法可以实现功能,但是耗资较高。为实现使用一台工业相机采集多个位置的图像,我们将相机固定在由外设部件互连(peripheral component interconnect, PCI)控制卡控制的单轴滑台上。由滑台带动相机运动,实现使用单个相机采集试件多个位置的图像,进而使用提出的图像拼接方法,实现全景图像的生成。将多个周期所得的全景图像导入 DIC 软件,则可计算出大尺寸构件的位移场与变形场云图,即对大尺寸构件的变形情况进行了监测。

上述过程均优化为全自动运行,这样可为用户在应用过程中带来很大方便。

1.2.4 拟解决的关键问题

1) 基于 ZNSSD 相关准则的插值偏差公式推导

在苏勇工作的基础上,完成对基于 ZNSSD 相关准则的插值偏差公式的推导。此工作顺利程度直接决定搭建出的系统是否能够用于对博物馆环境中的古船变形进行高精度监测。

2) 监测系统全自动运行的实现

本系统中，由 PCI 控制的滑台运动和相机的图像自动采集均由基于 C 语言的二次开发实现。而 DIC 软件目前没有全自动计算版本，故选用佐治亚理工学院推出的二维 DIC 软件 Ncorr (Matlab 版)^[50]，将其人机交互功能移除，方可实现 DIC 全自动计算。而 C 与 Matlab 混合编程也是一项技术挑战。

1.3 拟采用的研究方法、技术路线和说明、实验方案及可行性分析

1.3.1 研究方法

1) 文献研究法

对 DIC 系统误差及面向大尺寸构件的 DIC 计算方法的文献进行了较为全面的查阅、总结，为实际问题解决方案的提出奠定了基础。

2) 实验法

系统搭建完毕后，通过对细长形的橡胶梁进行平移实验和三点弯曲实验，验证搭建出的变形监测系统的有效性。

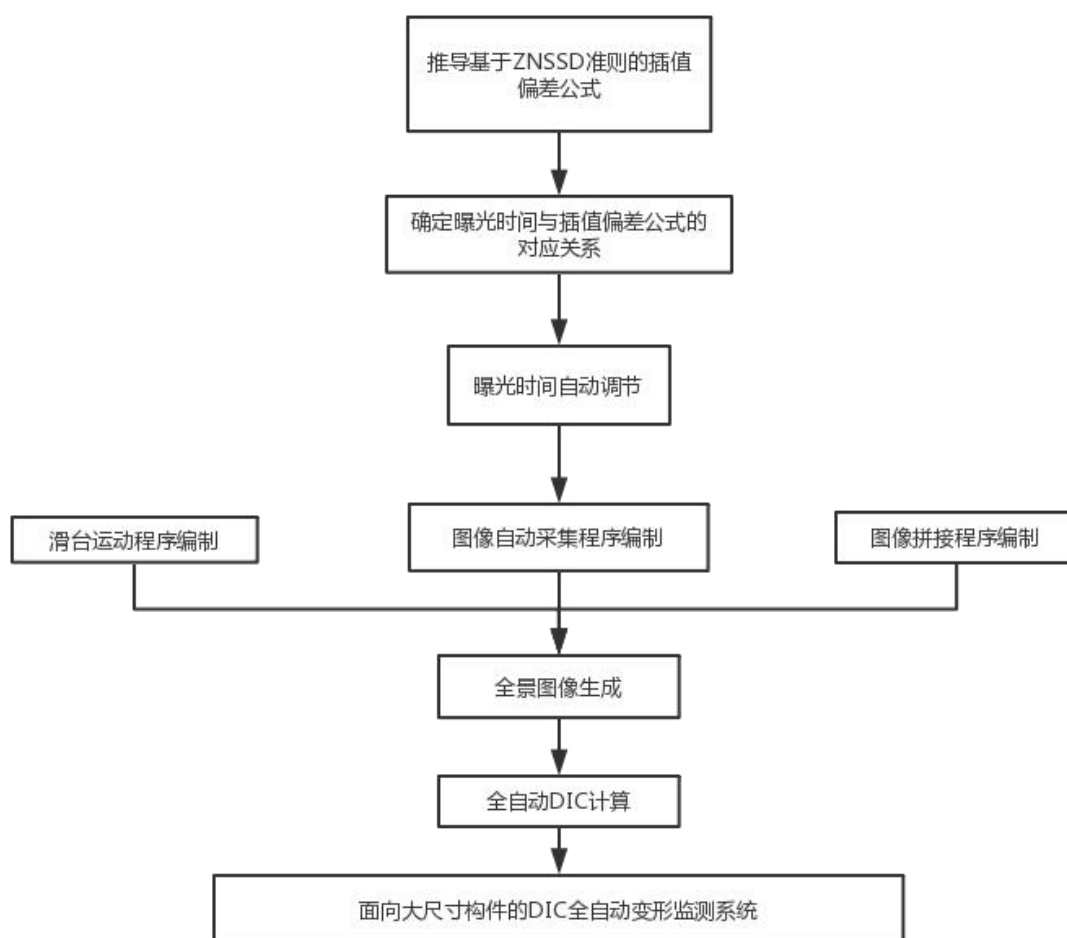
3) 模拟法

在系统搭建过程中，使用数字散斑设计得到的图像进行模拟拼接，验证图像全自动拼接部分的有效性。

4) 数学方法

通过数学方法推导 DIC 基于 ZNSSD 准则的插值偏差公式，构建其与曝光时间的对应关系。

1.3.2 技术路线和说明



1.3.3 实验方案

使用搭建好的系统对橡胶梁的平移运动和三点弯曲实验进行监测，验证搭建完毕的系统的可用性。

1.3.4 可行性分析

延长曝光时间可有效提升古船表面天然纹理对比度，通过插值偏差与曝光时间的对应关系可以有效控制 DIC 计算的系统误差。通过将图像拼接技术与数字图像相关技术相结合的方法，可以实现对大尺寸构件的变形监测。综上，本报告所提方案可行。

1.4 本研究的特色与创新之处

本课题提出了一种基于数字图像相关技术和图像拼接技术的，用于照度低且发生变化的环境条件下的针对大尺寸构件的全自动变形监测系统。该系统涉及到大尺寸构件

不同位置图像的自动采集、基于 DIC 的全自动图像拼接、通过调节曝光时间的方法确保时时处处 DIC 计算精度一致。整个系统的核心功能在于计算古船表面变形，为改善保护环境、为船身做必要加固提供科学依据。该系统在大尺寸构件位移、应变全自动测量方面具有良好的应用前景。

1.5 研究计划及预期研究结果

研究计划：

2018 年 4 月至 2018 年 6 月：进行课题相关资料的搜集分析，查阅资料，了解相关理论，奠定理论基础。

2018 年 7 月至 2018 年 8 月：进行基于 ZNSSD 的插值偏差正弦近似公式推导，并探究其与曝光时间的关系。

2018 年 9 月至 2018 年 11 月：搭建出面向大尺寸构件的数字图像相关测量系统。

2018 年 12 月：进行试验，验证测量系统的可用性及效果。

2019 年 1 月至 2018 年 3 月：进一步测试优化，总结课题研究工作，撰写硕士论文。

2019 年 4 月至 2018 年 6 月：修改完善硕士论文，准备答辩。

预期研究结果：

1. 寻求曝光时间与基于 ZNSSD 相关系数的插值偏差近似公式的关系，并发表学术论文一篇。

2. 搭建出面向大尺寸构件的数字图像相关测量系统，并申报专利。

3. 完成一篇学位论文。

（三）研究基础

1. 已参加过的相关研究工作和已取得的研究工作进展

本人分别使用 3D-DIC 系统和 2D-DIC 系统（工业相机搭配远心镜头、二维 DIC 开源软件 Ncorr）对天然多孔材料丝瓜瓢的抗压性能进行分析。通过 3D-DIC 所得的宏观结果体现了丝瓜瓢具有较高的抗压性能；但由于 2D-DIC 系统中使用的相机高度不可调节，细观图像屡屡离开视场，导致无法顺利求解。

2. 已具备的条件，尚缺少的条件和拟解决的途径

2.1 已具备的条件和尚缺少的条件

已具备的条件：工业相机、工业镜头、相机软件开发工具包（software development kit, SDK），借助上述工具可实现图像自动采集；由 PCI 控制的单轴滑台、滑台开发手册，借助上述工具和材料可实现滑台运动控制程序开发；由佐治亚理工学院推出的二维 DIC 开源软件 Ncorr（Matlab 版本），对此软件进行一定修改可实现全自动 DIC 计算。

尚缺少的条件：学校里没有暗室实验室，在需要控制环境光照度的试验中很容易受到外界光线影响。

2.2 拟解决的途径

使用颜色较暗、有一定厚度的窗帘遮挡自然光，关闭实验室的所有光源，营造“人造暗室”环境。

3. 研究经费预算和经费落实情况

研究经费 2.5 万元，已全部落实。

三、导师对开题报告的评价

导师评价意见：

签字：

年 月 日

四、开题报告小组成员

组成	姓名	职称	工作单位	本人签字
组长				
成员				

六、开题报告小组评议意见（请划√）

(1) 论文选题有无理论和实践意义	<input type="checkbox"/> 选题具有很强的理论意义和实用价值 <input type="checkbox"/> 选题具有较强的理论意义和实用价值 <input type="checkbox"/> 选题缺乏理论意义和实用价值
(2) 文献阅读是否全面反映与研究课题相关的现状和发展趋势	<input type="checkbox"/> 文献综述全面阐述该研究方向的现状和发展动态 <input type="checkbox"/> 文献综述基本跟踪该研究方向的现状和发展动态 <input type="checkbox"/> 综述一般，未达到上述标准
(3) 研究方案是否可行	<input type="checkbox"/> 可行 <input type="checkbox"/> 基本可行 <input type="checkbox"/> 不可行
(4) 有何特色和创新点	<input type="checkbox"/> 具有很强的创新性 <input type="checkbox"/> 具有一定的创新性 <input type="checkbox"/> 创新性不明显
(5) 研究生的研究基础、实验和经费条件是否适合本选题的研究	<input type="checkbox"/> 适合 <input type="checkbox"/> 基本适合 <input type="checkbox"/> 不适合
开题报告小组评议结果： <input type="checkbox"/> 通过 <input type="checkbox"/> 不通过 <div style="text-align: right;"> 组长签字：_____ 年 月 日 </div>	

七、专业学位类型/领域审查意见

专业学位类型/领域对开题报告的意见： <div style="text-align: right;"> 负责人签字：_____ 年 月 日 </div>

八、学院审查意见

学院对开题报告的意见： <div style="text-align: right;"> 主管（副）院长签字：_____ 年 月 日 </div>
