

# 基于数字图像相关法的单目三维视觉应变仪

李长太<sup>1</sup>, 潘兵<sup>2</sup>, 杨新<sup>1</sup>, 毕胜昔<sup>1</sup>, 宋岩<sup>1</sup>

(1.深圳市海塞姆科技有限公司, 深圳 518055; 2.北京航空航天大学固体力学所, 北京 100191)

**摘要:** 针对材料力学性能测试中变形测量存在的问题, 提出并开发完成了一种基于数字图像相关技术的单目三维数字图像相关技术及与之匹配的一系列算法。在此技术基础上, 研制了一款可测量三维全场变形的单目三维视觉应变仪。研究了单目三维光路系统, 单目三维数字图像相关算法, 深度学习融合数字图像相关算法, 边界测量, 全自动化测量, 耐高温光路设计及表面处理, 三维位移、应变计算等关键技术。分别从应变、位移测量两个方面对该仪器进行了精度验证, 应变测量精度优于 0.05%, 位移精度优于 10 微米。与双目三维数字图像相关系统相比, 使用者无需标定系统, 满足更多应用场景, 操作简单, 使用成本更低。

**关键词:** 单目三维; 三维变形测量; 数字图像相关; 深度学习; 自动识别

中图分类号: TH741

文献标识码: A

## Single-Camera Three-Dimensional Visual Strain Gauge

### Based on Digital Image Correlation Method

Li Changtai<sup>1</sup>, Pan Bing<sup>2</sup>, Yang Xin<sup>1</sup>, Bi Shengxi<sup>1</sup>, Song Yan<sup>1</sup>

(1. Shenzhen Haytham Technology Co., Ltd, Shenzhen 518055, China; 2. Institute of Solid Mechanics, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of deformation measurement in mechanical properties testing of materials, a single-camera three-dimensional (3D) digital image correlation (DIC) technology based on DIC technology and a series of matching algorithms are proposed and developed. Based on this technique, a single-camera 3D visual strain gauge which can measure 3D full-field deformation is developed. The key technologies of single-camera 3D optical path system, single-camera 3D DIC algorithm, deep learning fusion DIC algorithm, boundary measurement, fully automated measurement, high temperature optical path design and surface treatment, 3D displacement and strain calculation are studied. The accuracy of the instrument is verified from two aspects of strain measurement and displacement measurement, the strain measurement

accuracy is better than 0.05%, and the displacement accuracy is better than 10 microns. Compared with the Stereo 3D DIC system, the user does not need to calibrate the system, fit more demand in application, the operation is simple and the use cost is lower.

**Keywords:** single-camera 3D-DIC; 3D deformation measurement; digital image correlation; deep learning; automatic identification

## 引言

力学性能测量是现代工业生产和科研的基础工作,是各行各业工程技术发展的背后重要支撑。从工业到日常生活,材料力学性能测试无处不在,贯穿于我们生活中衣食住行方方面面。无论是汽车电子、土木建筑、航空航天、轨道交通、生物医疗、还是家用电器,这些产品都需要经过严格的性能测试,以确保其质量安全可靠。比如汽车制造商会对车身材料进行强度、刚度和耐久性测试,以确保车辆在碰撞和日常使用中能够承受各种力的作用。建筑材料也同样需要经过各种测试,以确保建筑物在自然灾害和长时间使用中的稳定性和安全性。随着国家工业的大力发展,各行业从材料到零部件及产品的力学性能测试需求爆发式增长,尤其力学性能中的变形检测已非常普及,如何准确并高效地测量变形越来越重要。变形检测可应用于各种材料和结构测试中,一方面用于保证产品质量合格,另一方面用于验证材料和结构设计的合理性。传统的力学性能测量方法有两种技术路线:一种是传统机械式测量方法,一种是非接触式测量。

## 1 现有力学性能测量方法应用现状及存在的问题

### 1.1 传统机械式测量

传统机械式测量方法主要有引伸计、应变仪、位移传感器、加速度计等,这类接触式传感器在力学性能测量应用中得到了广泛的运用,是主要的测量手段。它们均需要接触被测物才能够测量,测量数据不够全面,仅能实现一维或单点的数据测量,实验前需要花费大量人力物力及时间进行传感器的布置和固定,容易受测试环境和条件的限制,导致在很多应用场景中无法使用。比如:高温测量场景、高速测量场景、三维测量、大变形测量、微小试样测量、线型材料、薄膜材料测量等,接触式的方法均无法提供合适解决方案。同时,随着使用方对测量数据的全面性、测量效率及自动化程度要求越来越高,传统机械式的测量方法越来越无法满足客户的测量需求。

### 1.2 非接触式测量

数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)<sup>[1-3]</sup>技术是一种非接触式现代光学测量实验技术。它的基本原理就是通过跟踪(或匹配)物体表面变形前后两幅图像中同一像素点的位置来获得该像素点的位移向量,从而得到试件表面的全场位移。典型的 DIC 测量系统一般由 CCD 相机、照明光源、图像采集卡及计算机组成。首先,需要使试件的成像表面具有可以反映变形信息的随机散斑图案,然后在实验过程中采集试件受力过程的变形图像存入计算机,最后利用 DIC 软件对序列图像进行分析并得到试件表面的位移信息。由于使用 DIC 技术的测量设备具有光路简单、环境适应性好、测量范围广以及自动化程度高等诸多优点已经被广泛应用于各大行业的力学性能试验中。

DIC 设备可以实现非接触、三维全场的的数据测量,满足了很多接触式方法无法完成的应用需求及提供了丰富的测量数据。现有的 DIC 产品主要有单目二维与双目三维两种测量方式,即采用单个相机可以完成二维数据的测量,使用两个相机组成一定的夹角可实现三维数据测量。单目二维产品使用简单,无需标定,但只适合平面内的变形测量,如被测物有面外的位移将带入测量误差且抗环境干扰性较差。目前市场上的 DIC 设备主要是以美国 CSI、德国卡尔蔡司 GOM 为代表的进口产品为主,采用的均是双目三维 DIC 技术,占据了大部分的市场份额。但在国内销售价格昂贵、产品结构复杂、操作难度大,对使用者要求高,需要有长时间的使用经验。在当前中美贸易战的背景下,从美国和欧洲进口的 DIC 产品对部分国有单位、高校研究所及一些民营企业均是禁售的。基于以上多种原因,该类设备的应用推广也受到了限制,无法大量应用于各种测量场景。

国内也有采用 DIC 测量原理开发的产品<sup>[4-7]</sup>,测量时需要在试样表面布置全场散斑,也可实现二维、三维应变测量。但其制作散斑效率低,无法进行实时测量和反馈,双目三维 DIC 设备标定容易失效需要反复进行系统标定,对使用者有一定门槛,且采用双相机的测量方式使得设备价格仍然较高,从技术上和价格上均无法大量普及使用。

## 2 研究目标与思路

### 2.1 研究目标

基于前文阐述的行业需求及痛点,海塞姆公司与北京航空航天大学的潘兵教授展开深度合作,开发了单目三维 DIC 技术<sup>[8-9]</sup>,并在此技术基础上研发了单目三维视觉应变仪。该设备特点是单目三维非接触测量可以实现更广泛场景的应用及满足自动化测量。在应用范围、测量数据全面性及操作便捷性等方面颠覆了传统测量方法。同时,也大大降低了用户的使用成本,这样就可以实现大规模批量化普及,替代传统测量方法,为各工业领域的生产和科研

工作做出贡献。

主要技术参数和功能为：（1）单目三维非接触式全场测量，即可通过单个相机实现三维变形和应变测量（2）螺纹钢识别和测量，即可实现对螺纹钢材料的变形测量（3）边界测量，即可实现对材料边界的变形测量（4）深度学习融合 DIC 计算功能，实现自动识别和计算功能（5）全自动化测量功能（6）耐高温光路设计和表面处理方式（7）不受应变范围限制：可测量应变范围 0.005%—2000%（8）不受试样形状限制：板状、棒状、片状、线状、薄膜（9）不受温度限制：可测量温度范围-200℃—2300℃（10）标准化测量，使用无需标定（11）满足 JJG762-2007 0.5 级精度要求。

## 2.1 研究思路

目前市场上现有的 DIC 测量设备若要完成三维测量，则需要采用双目的方式，且每次使用之前均需要对测量系统进行标定。由于采用双相机的结构设计，使得测量系统容易发生标定失效的情况，而重新标定又是一个耗时耗力的过程，用户使用体验较差。同时，如前文所述，双目的方式也会使应用场景受限及增加用户使用成本，尤其是在高速测量的应用中，高速相机价格昂贵。DIC 设备的应用痛点给我们指引了工作的方向和研究思路。我们开始思考如果使用单个相机的方式，问题不就迎刃而解了。而在传统概念中，单个相机意味着是二维测量，这让我们清楚地知道，若要实现单目三维测量，则需要从整体的光路设计及软件算法开发上均打破传统思维。与此同时，产品的开发也需要以用户的应用需求为导向，真正解决实际遇到的测量痛点，比如螺纹钢无标识的测量。所以本项目的主要工作是开发简单易用的标准化单目三维测量系统，且根据用户的不同应用需求再进行深度算法优化，解决传统 DIC 无法测量的应用场景；同时，达到数据测量精确稳定，设备操作使用简单，用户无需反复标定。

## 3 主要研究内容及应用

### 3.1 仪器的功能原理设计

通过全球首创的基于合光棱镜的单目三维光路系统<sup>[10-15]</sup>，可实现单相机三维图像的采集。系统主要由 1 台电脑、1 个数字相机、1 个定焦镜头、组合式反射镜(包含 1 个反射棱镜和 2 块平面反射镜)、1 个带通滤波片组成。如图 1 所示为光路示意图。

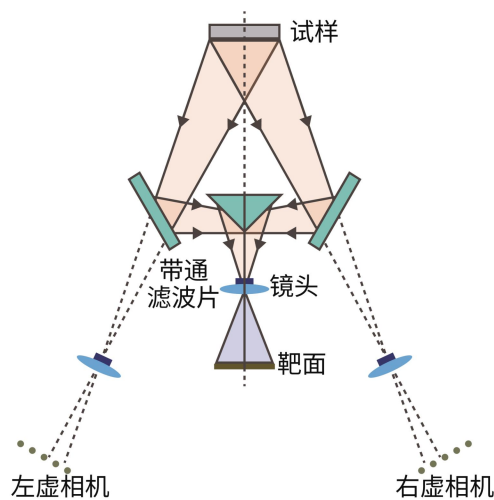
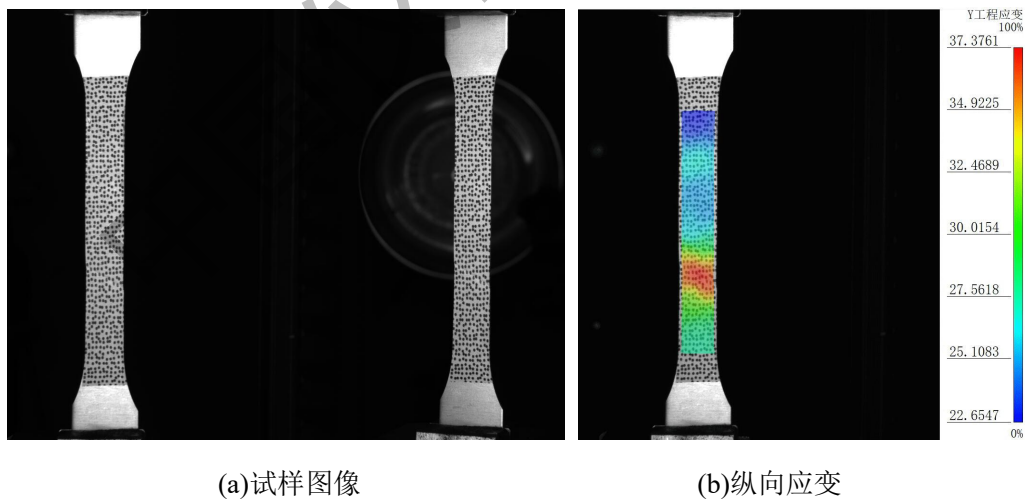


图1 单目三维光路图

图2 (a) 所示为单目三维视觉应变仪在拉伸试验中采集的试样图片。深度学习模块会对采集到的试样变形图像进行语义分割<sup>[6]</sup>，从全图中分辨出要测量的试样部分，再通过深度学习模型，基于神经网络学习多个特征，联系起来实现图像分析功能。在训练过程中，从图像中提取信息来确定模式和联系，利用大量的已经拍摄的图像进行图像特征区域的标识和训练，再利用已知数据学习特征，处理未知数据进行预测，最后结合一系列的单目三维 DIC 算法<sup>[7]</sup>，实现单目三维的全场应变和变形测量分析，如图2 (b) 所示。



(a)试样图像

(b)纵向应变

图2 软件采集的试样图像及计算得到的纵向应变

表1 为系列单目三维 DIC 算法及对应的功能。

表1 单目三维 DIC 算法及功能

算法	功能
----	----

单目三维 DIC 计算算法	实现单目三维 DIC 计算
单目三维 DIC 标定算法	实现单目三维 DIC 标定
IC-GN 收敛条件算法	匹配单目三维 DIC 算法，提升测量精度
无冗余计算 DIC 算法	匹配单目三维 DIC 算法，提升效率和特征识别范围
零均值归一化最小平方距离相关函数算法	匹配单目三维 DIC 算法，在相关函数计算中提升效率
局部多项式拟合算法	匹配单目三维 DIC 算法，局部应变计算速度提高 100 倍

### 3.2 深度学习结合 DIC 算法的自动识别算法

通过将深度学习<sup>[18-19]</sup>和 DIC 算法融合，提升测量的速度和准确性。主要通过深度学习的小尺寸识别方向对被测物的标记（标记点，散斑，螺纹等）快速识别，自动标记，如图 3 所示为计算软件自动识别试样上的标记点，减少了人为手工标记带来的误差和标记时间。

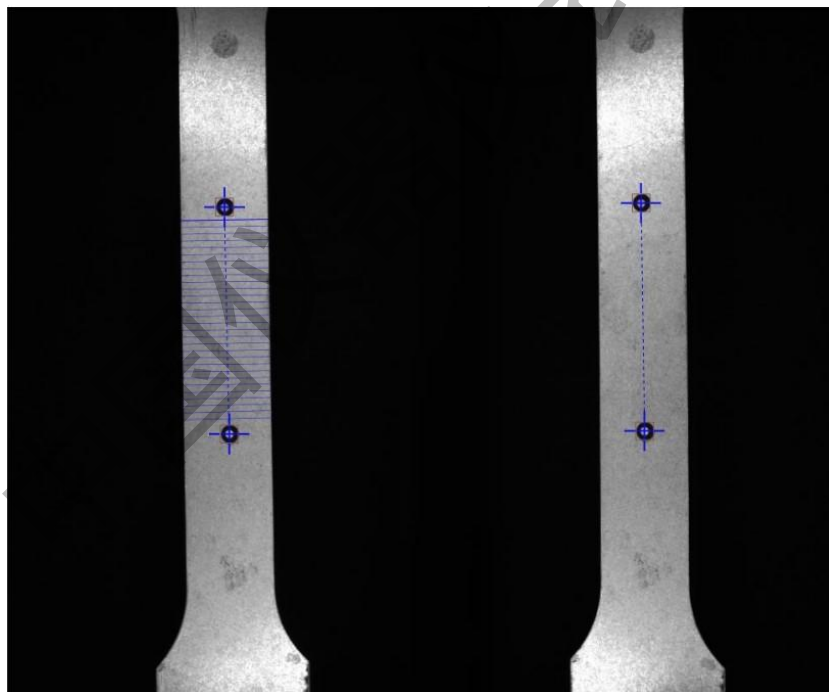
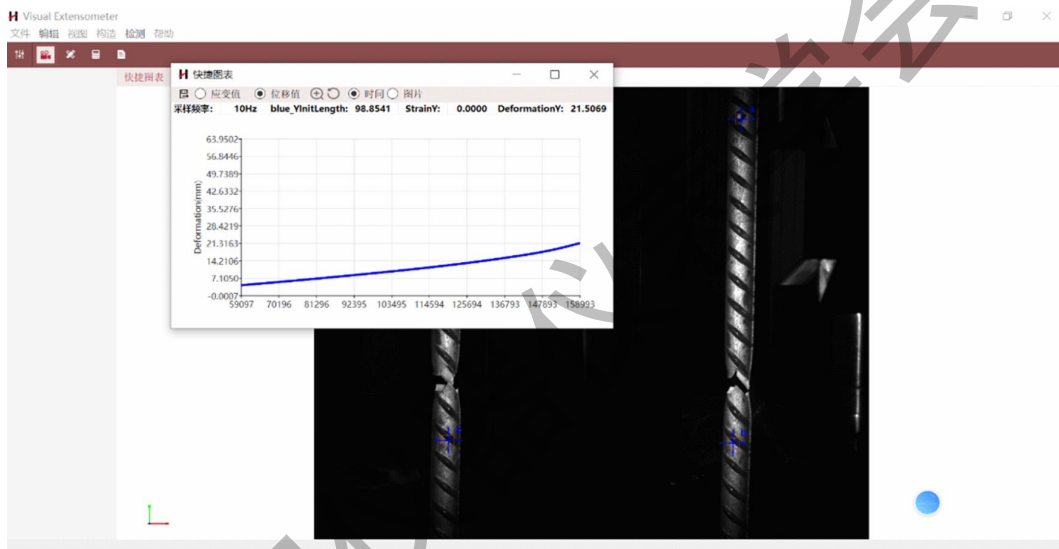


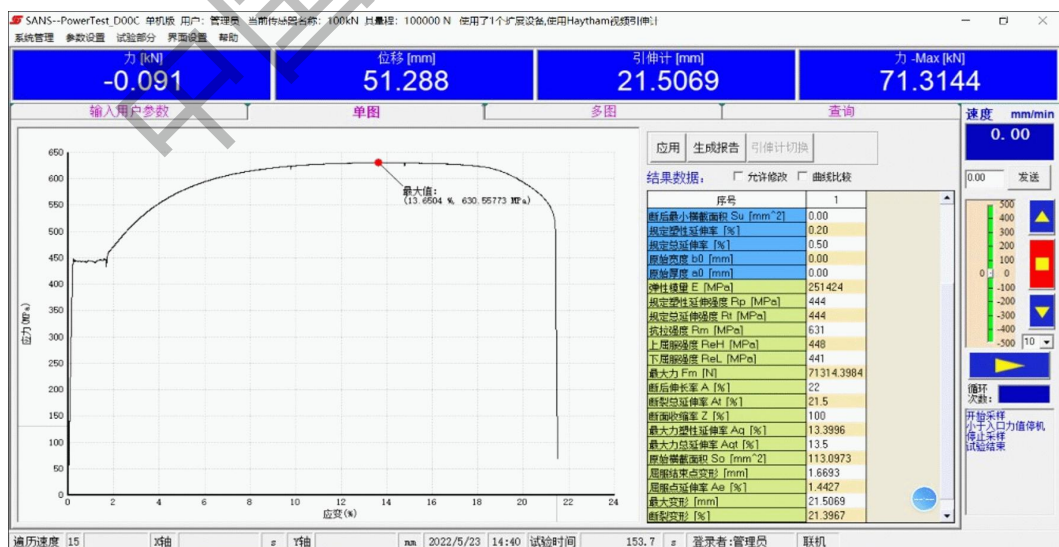
图 3 自动识别标记点

小目标检测<sup>[20-22]</sup>长期以来是计算机视觉中的一个难点和研究热点。在深度学习的驱动下，小目标检测已取得了重大突破，并成功应用于国防安全、智能交通和工业自动化等领域。为进一步提升对小目标检测的能力，本技术从数据增强<sup>[23]</sup>、多尺度学习<sup>[22,24]</sup>、上下文学习<sup>[25-27]</sup>、生成对抗学习<sup>[28]</sup>以及无锚机制<sup>[24,29]</sup>等方面来提升小目标检测性能。

此自动识别算法已经在螺纹钢拉伸试验中成功应用。螺纹钢或者圆形钢材作为一种特殊的测试材料，其表面会附着锈迹及氧化皮，在拉伸过程中会出现掉皮现象，任何附在表面的标记都会脱落。因此，贴标记点或者制作散斑方式在这种场景下将不再适用。根据螺纹钢的这种特殊性质，必须提取一种鲁棒并且计算高效的特征，这种特征对尺度，形变，光照较鲁棒，且能适应氧化皮脱落前后特征匹配。我们采用此自动识别算法，根据螺纹钢材料表面自身的纹理，颜色，梯度信息等进行鲁棒高效的匹配或跟踪。图 4（a）是视觉应变仪测量的螺纹钢拉伸变形曲线，从图中可看出螺纹钢表面无任何额外表面处理，完全依靠螺纹钢本身的纹理进行识别和跟踪。视觉应变仪测得的应变数据实时传输到试验机软件，即可计算获得应力-应变曲线，如图 4（b）。



(a) 螺纹钢变形曲线



(b) 螺纹钢应力-应变曲线

图 4 钢筋变形曲线及试验机应力-应变曲线

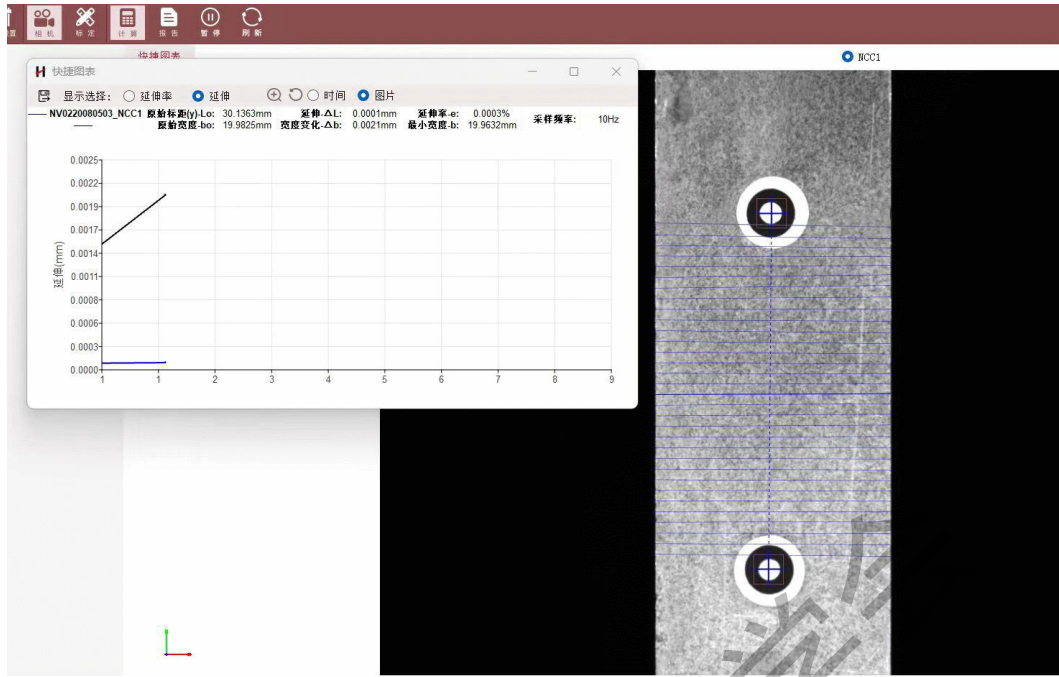
### 3.3 边界测量功能

边界指的是图像中目标物体与背景相连区域的边界,是用于区分目标物体与背景的重要特征。边界本质上属于特殊的图像边缘特征,它包含在边缘特征中,但又不等同于图像边缘。边界测量广泛应用于各类工业检测项目中,它能直观地反映目标物体的轮廓和拓扑信息结构。在很多工业场景中,通过观察目标物与背景的边界,能够直观地分析目标物部分区域的变化情况以及变化趋势。目标物部分区域的形变大小也能在一定程度上通过边界测量检测。特别在对抗压材料、耐久材料的质量检测中,边界测量这一先进的数字图像处理技术在很大程度上避免了传统检测技术的不便缺陷,提高了检测效率。基于边界的概念与其基础特征,图像中边界的检测可以结合边缘检测技术以及各种基础图像处理技术实现。

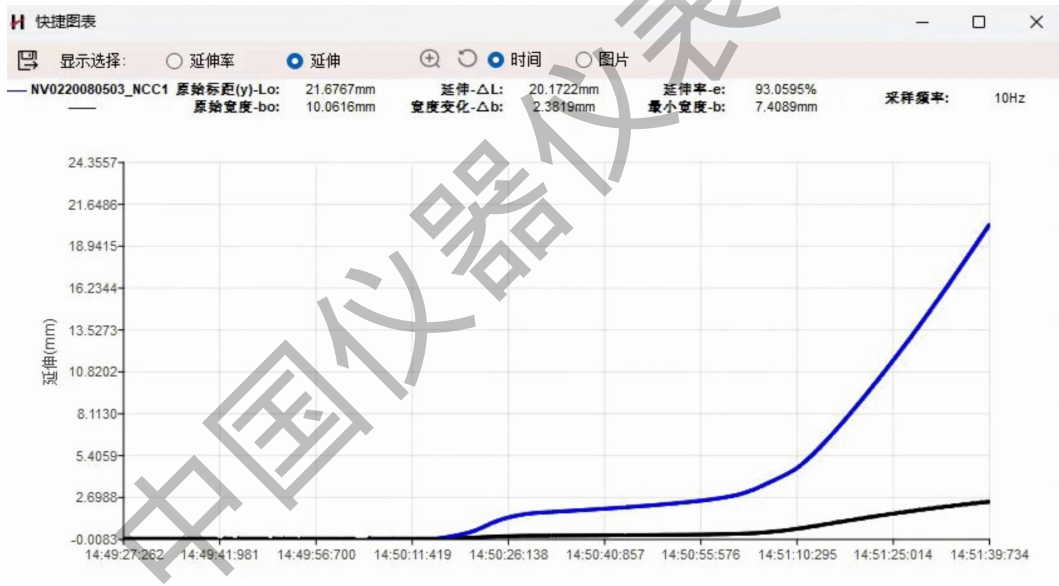
本文所实现边界测量功能的应用场景大多是针对工业检测中对材料进行纵向拉伸造成的横向变形检测。材料被拉伸时,在其正面架设单目三维视觉应变仪采集拉伸过程中的试样图像,实时对每一帧图像进行处理分析进而反馈材料在拉伸过程中的横向变形。在这种情况下,即使整个试样能全部被拍摄到图像中,我们也只考虑材料的左右边界,不考虑上下边界。图像中材料的左右边界是我们关注的重点,其产生的变化能直观的反映出材料在受纵向拉力时的边界变形情况。我们可以根据材料左右的边界信息分析材料的横向宽度以及横向宽度的变化,这包括材料在被拉伸过程中的平均横向宽度、最小横向宽度等,从而进一步判断材料在何处断裂。考虑到这是一个实时检测过程,这就要求视觉应变仪软件的处理算法要足够快速。不断发展的图像处理和用于采集图像的工业相机性能的提升为这种非接触式机器视觉测量技术的实现提供了可行方案,但保证其稳定性与高精度仍然是极具挑战的工作。

图 5 (a) 所示为软件自动识别试样上下两个标记点并构造原始标距,然后软件在原始标距中自动等间距划分 32 根横线;同时,横线两端可自动识别到试样的边缘并在拉伸过程中持续跟踪,最后软件将自动测量 32 根横线宽度并取其平均值作为试样宽度和宽度变化,见图 5 (b)。





(a) 视觉应变仪软件自动划分等间距测量横线



(b) 拉伸试样延伸量及宽度变化

图 5 拉伸试验中试样延伸量及宽度测量

### 3.4 全自动化测量算法

随着工业 4.0 时代的到来，制造业已经开始步入智能化、数字化时代。各大原材料厂商质量检测环节中的材料拉伸试验检验量大、产品规格集中、检测项目相对简单且检测周期紧，所以这类企业均有向自动化检测快速发展的强烈需求，依靠全自动化检测系统一天可轻松完成 1000 件以上拉伸试样的自动检测。

本文研发的全自动化测量系统由核心控制模块、机械手控制模块、标记线预制激光模块、

单目三维视觉应变仪结合拉力试验机完成。通过低网络延迟架构进行实时的通信，保证各个模块之间的协调工作，最终实现全自动化的力学实验过程。我司研发的单目三维视觉应变仪的全自动引伸计模块可搭配全自动拉伸试验机实现材料拉伸过程中试样的自动识别、自动计算、自动传输，进而自动测量材料力学性能参数。

机械臂的主要工作是测试过程中的装样动作，该装样动作分两个部分：试样的抓取和试样标记线的制作。机械臂得到核心控制模块命令后，首先在材料样架上抓取试样，然后调整抓取试样的姿态将其放入激光刻线装置，最后通知核心控制模块任务完成。机械手控制模块中的机械臂抓持器需要以精准的位置和姿态移动到给定点，这就要求机械臂具有一定数量的自由度。机械臂的自由度是设计的关键参数，其数目应该与所要满足的任务匹配。为了使安装的自平衡机器人上的机械臂能够完成复杂的任务，将其自由度数据定为6个，抓持器就可以达到空间中的任意位姿，并且不会出现冗余的问题。在确定自由度后，就可以合理的布置各个关节分配这些自由度。

标记线预制激光模块是一款精准高端的智能激光切割设备，运用激光技术在聚酯、金属材料、纸等软包装材料上切割、划线、打孔、层切。其加工方法是利用激光器产生的光束聚焦在设计好的实线、虚线、波浪线上均匀的切割出一条深仅若干微米的细线。由于激光在聚焦上的优点,从而对材料的微处理更具优势,切割、打标、划线、打孔深度均可控。即使在不高脉冲能量水平下,也能得到较高的能量密度,有效地进行材料加工。核心控制模块根据上一阶段任务反馈，发送命令到激光划线装置，进行激光划线，试样上会形成等距的10mm刻度线,如图6所示。

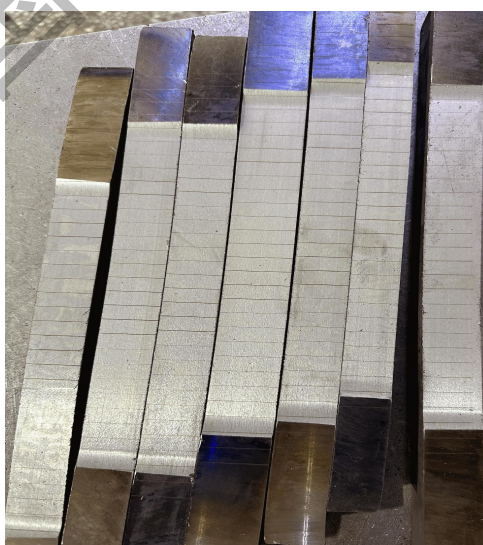
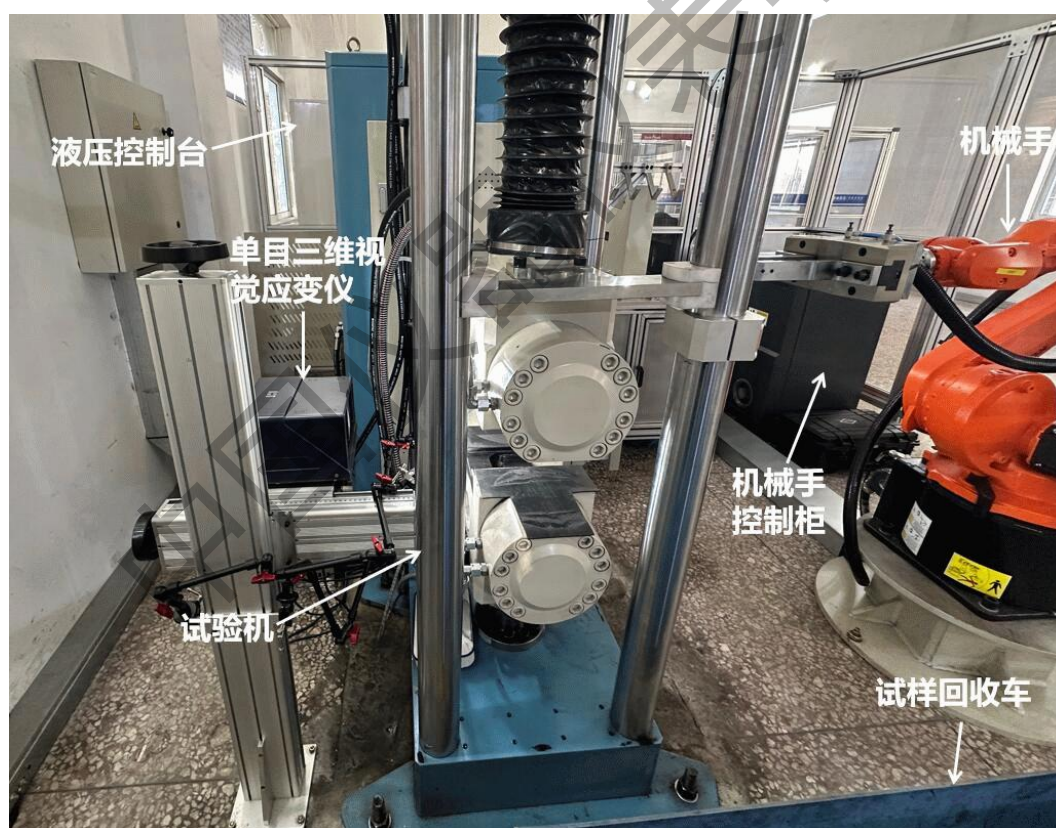


图6 激光划线效果图

激光划线之后通知核心模块此流程已经完成。核心模块控制机械臂将已经划线的试样装

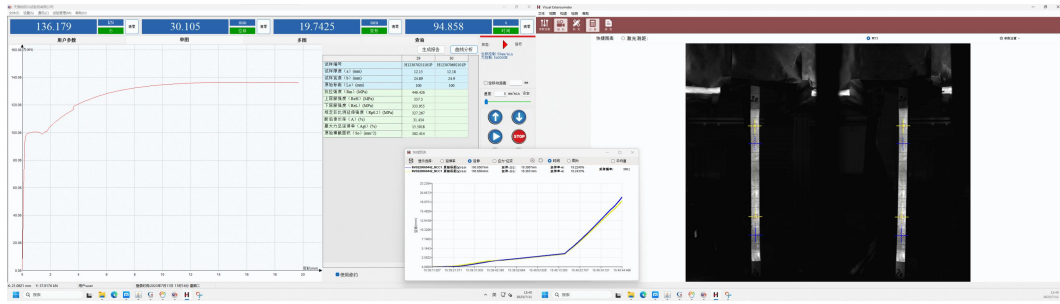
到拉力试验机，试验机夹具自动夹紧试样后进行预加载动作，并准备开始拉伸，同时通知视觉应变仪开始测量。深度学习模块会根据采集到的图像对图像进行语义分割，从全图中分辨出要测量的试样部分。再通过深度学习模型：1) 基于神经网络，学习多个特征，联系起来实现图像分析功能；2) 训练过程中，从图像中提取信息，确定模式和联系，利用大量的已经拍摄的图像进行图像特征区域的标识和训练；3) 利用已知数据学习特征，处理未知数据进行预测。对激光划的标记线进行大量的训练和学习识别和补偿出所有的激光线，针对激光线形成等距的原始标距。视觉应变仪自动判断多段固定原始标距，开始拉伸测量并且把拉伸过程的延伸率数据实时传输给拉力试验机，计算得到用户需要的力学性能参数。

图 7 (a) 是在国内某大型钢铁企业安装的厚板自动化拉伸试验系统。完成一次拉伸试验，分析软件将自动计算材料力学性能参数，见图 7 (b)。该套系统已经客户现场运行 7 个月，满足了自动化测试需求、零故障、效果良好。实现自动化智能化后，是的试验室装备水平大幅度提升，减少了人为操作影响，提高了检测精度和劳动生产率。



(a) 全自动拉伸试验装置



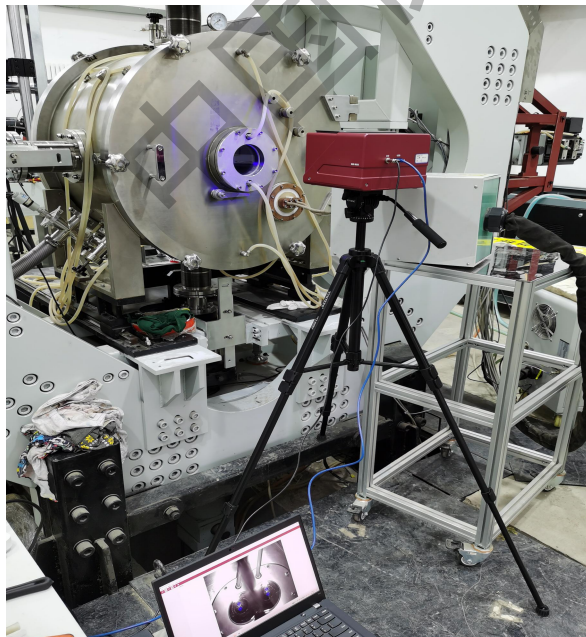


(b) 软件自动计算应变及绘制应力-应变曲线和计算力学性能参数

图 7 全自动拉伸试验装置及软件自动计算材料力学性能参数

### 3.5 耐高温的光路设计和试样表面处理

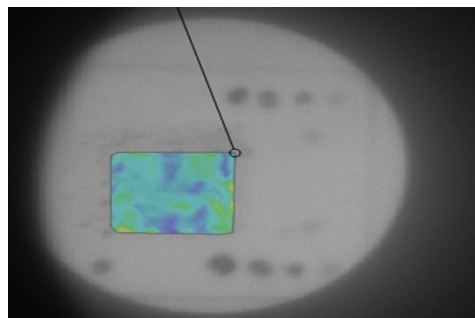
针对高温的应用场景，传统接触式测量方法无法实现 1300 度以上高温条件下力学性能的测量,所以通常采用非接触的测量方法<sup>[30]</sup>,但受高温炉的观察窗口大小的限制，双目三维 DIC 设备无法完成测量。当试验温度超过 1300℃时，试样表面会产生强烈的自发光，从而影响相机对试样表面散斑图案的采集。本文的单目三维视觉应变仪采用高亮度单色光照明（蓝光/紫外照明）和带通滤波成像（蓝光/紫外滤波片）相结合的主动光学成像技术<sup>[31]</sup>，克服了高温测量过程中的热辐射干扰问题。同时，高温环境下散斑本身也容易出现脱落的现象，使得软件无法继续跟踪试样的变形，尤其 2000℃以上的高温场景，我们优化了试样表面散斑的制作工艺，使散斑在整个试验过程中不发生脱落。图 8（a）是使用单目三维视觉应变仪在某 985 高校现场测试时的高温试验装置，该试验完成了 2000℃高温下的石墨材料耐高温力学性能测量；图 8（b）是经过表面处理后的试样图片；图 8（c）为计算的应变数据。



(a) 高温试验装置



(b) 表面处理



(c) 应变数据

图8 高温试验装置、试样表面处理效果图及应变数据

## 4 精度验证

### 4.1 应变精度验证

目前还没有相应的计量标准和计量单位可以直接计量仪器的应变精度,本文采用对应变精度普通认同的电阻应变片对单目三维视觉应变仪进行精度验证。为了方便视觉应变仪与电阻应变片进行应变数据对比,本次实验选用等强度悬臂梁试验装置<sup>[32]</sup>为实验平台,见图9。选用的电阻应变片阻值为 $350\Omega$ ,敏感元件大小为 $3\text{mm}\times 3\text{mm}$ 。

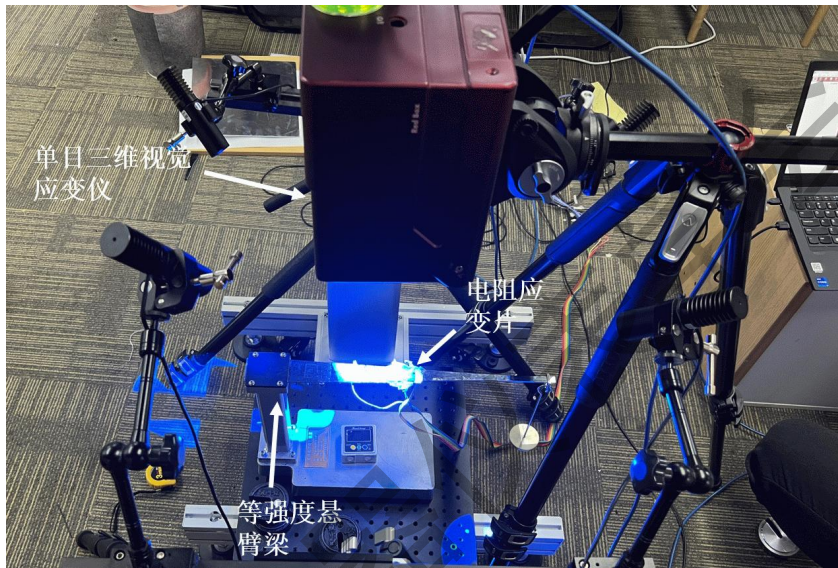


图9 单目三维视觉应变仪与等强度悬臂梁试验装置

试验过程:采用挂砝码分阶段加载的方式,即从 $0\text{N}$ 开始每次增加 $5\text{N}$ 至 $15\text{N}$ ,然后每次增加 $10\text{N}$ 至 $35\text{N}$ ,每次加完砝码之后保持稳定 $50$ 秒以上;同时,单目三维视觉应变仪和电阻应变仪均连续实时测量应变数据。表2为两者测量数据比较,各阶段偏差均在 $50\mu\epsilon$ 以内。

表2 单目三维视觉应变仪和电阻应变片应变测量数据比较

载荷/ $\text{N}$	视觉应变仪/ $\mu\epsilon$	电阻应变片/ $\mu\epsilon$	偏差/ $\mu\epsilon$
0	1.56	0.3	1.26
5	184	175	9
10	358	352	6
15	550	526	24
25	889	877	12
35	1251	1210	41

## 4.2 位移精度验证

国内有多家第三方计量机构可以完成仪器的位移精度校准,本文单目三维视觉应变仪的位移精度计量选择在中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所(国防科技工业第一计量测试研究中心)进行,该计量是依据标准 VDI2634-2<sup>[33]</sup>基于区域扫描的光学三维测量系统校准规范完成的。

使用的计量标准器具为: 35mm 双频激光干涉仪标准装置,其测量范围是 0-35mm,测量不确定度  $U=0.10\mu\text{m}+0.14\times 10^{-6}L$ ,  $k=2$ 。校准结果如表 3 所示,本次校准结果的扩展不确定度为:  $U=3 k=2$ ,示值误差均在 10 $\mu\text{m}$  以内。

表 3 位移校准结果

序号	视觉应变仪 测量值/mm	参考值/mm	示值误差/mm
1	0.0000	0.0000	0.0000
2	3.3091	3.3021	0.0070
3	6.0096	6.0007	0.0089
4	9.0872	9.0812	0.0060
5	12.2478	12.2476	0.0002
6	14.9756	14.9765	-0.0009
7	18.0012	17.9948	0.0064
8	21.0048	20.9972	0.0076
9	24.3495	24.3483	0.0012
10	27.0207	27.0231	-0.0024
11	30.0202	30.0280	-0.0078

## 5 经济与社会效益

本产品已经完成产业化,具备批量生产能力。从 2021 年至今累计销售此款设备 100 多台,已在吉林大学、华南理工大学、成飞集团、中科院大连化学物理研究所、中科院广州能源研究所、中机试验装备股份有限公司、美特斯工业系统、湖北省建筑工程质量检测中心及钢研纳克检测技术股份有限公司等几十家高校研究所及民营企业推广应用。

通过设备的示范应用和推广,预期还将取得以下经济社会效益:

- (1) 满足日益增长的力学性能测试需求及更高的测量要求,尤其是材料力学性能的测

试。材料的力学性能参数对于材料的选择和使用至关重要，而这些参数的获得均要通过拉伸试验才能完成。近年来，受政策支持，我国新材料不断涌现，国内众多的大型原材料厂商（钢企，铝企，复合材料）及这些原材料的使用方、各大高校与研究所的试验需求与日俱增，而且也都提出了更高的测量要求，比如，自动化测量，这使得传统测量手段均无法满足测试需求。本文产品可非接触实现三维变形测量，在拉伸试验过程中能同时测量多组纵向和横向标距变形。同时，与国内各大试验机厂家合作开放通讯协议，配合全自动拉伸试验系统使用时，可实现同步触发、自动测量、实时以数字信号或模拟信号向试验机传输数据，大大提高检测效率。

(2) 本产品突破了国外技术封锁。如前文所述，国内销售的传统 DIC 设备主要是美国 CSI、德国卡尔蔡司 GOM 进口产品为主，但对国家关键领域采取禁售的政策。部分自主品牌产品仍然有技术瓶颈，使得难以大量推广使用。市场急需一款既可满足客户更高测量需求又能让客户在各个行业大量推广使用的产品。目前贸易战愈演愈烈，对于高尖端技术，国外的技术封锁越发严重，国家政策鼓励自主创新尤其我司所专注的基础科研领域，国内品牌的崛起势必更加快速。

(3) 助力我国 DIC 相关设备行业的发展，提高本土化产品的市场占有率，创造经济效益。目前国内现有的采用 DIC 测量原理的产品属于双目三维测量系统，标定容易失效需要反复进行系统标定，对使用者有一定门槛，从技术上和价格上均无法大量普及使用。作为材料生产和使用大国，具有材料力学性能检测需求的企业与研究机构数量庞大，他们保有大量的力学试验机，而且还有巨大的增购需求，同时应变测量设备正朝着微机化、自动化、多功能化的方向发展。而力学试验机均需要结合变形测量测量设备（如：应变片、引伸计）完成测试。本产品采用的单目三维 DIC 技术，大幅提高了性价比和使用效率，使此类 DIC 相关产品大批量替代传统机械式引伸计成为可能。在不到两年的时间，此产品已销售 100 多台，为汽车及零部件、航空航天、轨道交通、土木工程、生物医疗等各行各业的科研和生产带去了高科技的测量产品，促进了他们的研发和生产效率，创造了更多的价值。同时，带动整个行业颠覆性的革新。

(4) 结合深度学习突破了 DIC 技术部分技术瓶颈，解决了一些测试难点，提升了我国关键材料的性能检测能力。在航空航天、核电等工程领域，许多关键材料及部件需要承受高温作用，材料在高温下的性能演变、可靠性评估及工作寿命预测对于产品的安全服役与性能改善至关重要。本产品已经实现 2000℃ 以上高温测试，比如完成的航空发动机叶片材料力学性能测试，钨钼合金高温力学性能验证等。本项目开发的视觉应变仪解决了行业应用痛点，

能够为航空航天等关键领域的客户需求提供测试数据支撑，为国家的科研事业做出做贡献。

## 6 结论

本文产品实现了既定的研究目标，主要有以下创新点：（1）开发了单目三维 DIC 技术，实现了单相机完成三维变形测量，且客户使用无需标定（2）深度学习与 DIC 算法融合，开发了自动识别算法，可完成螺纹钢等无特征识别计算（3）实现与试验机匹配的全自动化测量（4）耐高温光路设计和表面处理方式，实现了 2300℃ 的高温测量。此产品可广泛用于各类材料及其制品的力学性能测试和使役性能评价，对涉及国家安全、国防工业和国民经济的航空、核电、汽车、高铁等领域以及新材料、钢铁冶金、有色金属等产业集群的发展将发挥十分重要的促进作用，具有重要的科学意义和广泛的市场前景，为国民经济可持续发展和综合国力提升提供技术支持与保障。

### 参考文献:

- [1]Chu T C, Ranson W F, Sutton M A, et al. Applications of digital image correlation techniques to experimental mechanics [J]. Exp Mech, 1985, 25(3): 232-244.
- [2]Tong W. An evaluation of digital image correlation criteria for strain mapping applications [J]. Strain, 2005, 41(4): 167-175.
- [3]Sutton M A, Orteu JJ, Schreier HW. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements Basic Concepts, Theory and Applications. Image Rochester NY 2009:341.
- [4]唐正宗, 梁晋, 肖振中, 等. 用于三维变形测量的数字图像相关系统[J]. 光学精密工程, 2010, 18(10): 2244-2253.
- [5]朱飞鹏, 雷冬, 何小元. 基于数字图像相关方法的全场应变测量的精度研究[C]//第十三届全国实验力学学术会议论文摘要集, 7.1, 2012, 昆明, 云南, 中国. 中国力学学会, 20- 12: 35.
- [6]潘兵, 俞立平, 吴大方. 使用双远心镜头的高精度二维数字图像相关测量系统[C]//北京力学学会第19届学术年会论文集, 12.1, 2013, 北京, 中国. 北京力学学会, 2013: 30-31.
- [7]张勇, 程腾, 张青川, 等. 三维数字图像相关教学设备研制[C]//中国力学大会-2015论文摘要集, 8.16, 2015, 上海, 中国. 中国力学学会, 2015: 365.
- [8]俞立平, 潘兵. 使用单彩色相机的单相机三维数字图像相关方法[J]. 实验力学, 2017, 32(05): 687-698.



- [9]池宇希, 俞立平, 潘兵. 使用单个单方相机的三维数字图像相关测量系统[C]//北京力学会第二十四届学生年会会议论文集, 1.21, 2018, 北京, 中国. 北京力学会, 2018: 100-103.
- [10]深圳市海塞姆科技有限公司. 一种使用合光棱镜的新型单相机三维数字图像相关系统: 中国, CN110530286B[P]. 2020-11-17.
- [11]深圳市海塞姆科技有限公司. 一种一体式应变检测装置及一种应变测试方法: 中国, CN114688985A[P]. 2022-07-01.
- [12]深圳市海塞姆科技有限公司. 一种单目三维高速测量系统: 中国, CN114322810A[P]. 2022-04-12.
- [13]深圳市海塞姆科技有限公司. 光路系统、单目三维图像采集系统及三维应变检测系统: 中国, CN113375583A[P]. 2021-09-10.
- [14]深圳市海塞姆科技有限公司. 一种单目三维高速测量方法、光路系统及其标定方法: 中国, CN114322812A[P]. 2022-04-12.
- [15]深圳市海塞姆科技有限公司. 光源、光路系统、单目采集系统、传感器及应变检测系统: 中国, CN113513997A[P]. 2021-10-19.
- [16]吴雨林. 基于半监督和无监督深度学习模型的图像识别与分割[D]. 济南: 山东大学, 2022: 100.
- [17]潘兵. 无冗余计算的反向组合配准算法: 一种可能的标准数字图像相关方法[C]//第十五届北方七省市力学学术会议论文集, 8.1, 2014, 大同, 山西, 中国. 中国力学学会, 2014: 195.
- [18]P N Druzhkov, V D Kustikova. A survey of deep learning methods and software tools for image classification and object detection[J]. Pattern Recognition and Image Analysis, 2016, 26(1): 9-15.
- [19]王玫. 基于自适应深度学习的图像识别研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2022: 144.
- [20]赵景波, 杜保帅. 基于深度学习的小目标检测技术发展[J]. 电光与控制, 2023, 30(02):63-70+74.
- [21]周升和, 邵武长, 王强. 基于深度学习的小目标检测算法综述[J]. 数字技术与应用, 2023, 41(02): 156-158.
- [22]蒋佳宜. 基于深度学习的多尺度小目标检测[D]. 南京: 南京理工大学, 2021: 71.
- [23]周路宽. 基于特征增强与中心采样的无锚框目标检测算法研究[D]. 南京: 东南大学, 2020: 80

- [24]熊磊, 王凤随, 钱亚萍. 基于特征融合的自适应多尺度无锚框目标检测算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(11): 236-244.
- [25]Ma Long, Liu Risheng, Zhang jiaao, *et al.* Learning Deep Context-Sensitive Decomposition for Low-Light Image Enhancement[J]. IEEE transactions on neural networks and learning systems, 2021, 33(10):5666-5680.
- [26]孙炜程. 基于深度学习的上下文相关的目标跟踪[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019: 66.
- [27]黄龙飞. 基于深度学习和上下文的目标检测算法研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2020: 73
- [28]林懿伦, 戴星原, 李力, 等. 人工智能研究的新前线:生成式对抗网络[J]. 自动化学报, 2018, 44(05): 775-792.
- [29]陈胜. 基于深度学习的无锚框目标检测算法研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2021, 76.
- [30]LYONS J S, LIU J, SUTTON M A. High-temperature deformation measurements using digital-image correlation[J]. Experimental Mechanics, 1996, 36(1): 64-70.
- [31]俞立平, 潘兵. 单相机高温三维数字图像相关方法[J]. 航空学报, 2022, 43(06): 292-303.
- [32]耿运贵. 等强度悬臂梁实验装置的设计和应用[J]. 焦作矿业学院学报, 1987, (02): 200-206.
- [33]Optical 3-D measuring systems Optical systems based on area scanning: VDI/VDE 2634 Blatt 2-2012[S]. Germany: Verein Deutscher Ingenieure, 2012.