

文章编号 1004-924X(2018)09-2174-07

## 高速三维数字图像法测量手机跌落全场应变

王立忠, 汪 耀\*, 梁 晋, 戴晨光

(西安交通大学 机械工程学院 机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘要:**为了测量手机跌落时的变形与应变,基于数字图像相关法及双目立体视觉原理,提出一种用于手机跌落试验中变形与应变测量的方法,并研制了相应的高速三维全场应变光学测量系统。针对手机跌落碰撞过程中,角度变化导致散斑匹配失败率高,变形应变场缺损严重的问题,利用高速相机高速采集图像,并改进图像匹配方法,采用顺序逐帧基准匹配,保证了测量精度,提高了应变场完整度。研制了光学测量系统,设计了试验方案,进行了数字图像测量方法与动态应变仪测量结果的对比,对改进的散斑匹配方案进行了验证。试验结果表明,本文的方法使变形应变场的完整度提高了 21%,其位移动态测量精度为 0.42%,应变测量精度为 0.5%。本文的方法和系统可以满足手机跌落碰撞全场变形与应变测量的要求,与传统测量方式相比有明显优势,是研究手机跌落碰撞变形规律的有效途径。

**关键词:**高速三维数字图像相关法;逐帧基准;手机跌落试验;全场应变

**中图分类号:** TP394.1; O348.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182609.2174

## Measurement of full-field strain in cell phone dropping test by high-speed 3D digital image correlation method

WANG Li-zhong, WANG Yao\*, LIANG Jin, DAI Chen-guang

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shanxi, 710049, China)

\* Corresponding author, E-mail: wangyao2016@stu.xjtu.edu.cn

**Abstract:** A three-dimensional deformation method was proposed based on digital image correlation and binocular stereovision to measure the deformation and strain in a cell phone drop test and a 3D full field strain optical measuring system was developed. To solve a problem inherent in the process of collision due to falling in mobile phones, where the change in angle led to a high rate of failure in speckle matching leading to a serious defect in the strain field, high-speed cameras were used for rapid data acquisition of digital images. Furthermore, the speckle matching method was improved using a successive-frame benchmark, and the integrity of the strain field and the measuring accuracy were improved. Subsequently, an optical measurement system was developed and a test scheme was designed. The results measured using the digital image method and the dynamic strain gauge were compared. The improved speckle matching scheme was verified by comparing the data before and after the application of the proposed method. The study proves that this method improved the integrity of the deformation strain field by 21%, the dynamic accuracy of the displacement measurement is

收稿日期:2018-05-17;修订日期:2018-06-29.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51675404, No. 51421004)

0.42%, and the accuracy of the strain measurement is 0.5%. Compared with traditional measurement methods, this method can measure three-dimensional deformation and strain data of mobile phones more comprehensively and intuitively, and it was an effective way to study the deformation effects in drop tests.

**Key words:** high-speed 3D digital image correlation method; successive-frame benchmark; dropping test; full-field strain

## 1 引言

2016年全球智能手机总销量为147 060万部<sup>[1]</sup>。面对庞大的市场需求,提高智能手机可靠性,从而提高其市场竞争力,是各大制造商所追求的。手机的跌落试验是可靠性研究中的重要内容。掌握跌落碰撞过程中的变形规律,可以指导产品结构的优化,为产品材料的选取提供依据,节约成本,同时能够获得抗冲击性能更好的产品。

研究跌落碰撞过程中的变形,可通过研究碰撞过程中产品变形和应变数据实现<sup>[2-3]</sup>。采用某种科学的方法,准确、快速地获取这些数据,掌握跌落碰撞过程中的变形规律,定量评价产品的抗跌落碰撞性能,从而指导产品结构的优化,为产品材料的选取提供依据。现阶段,跌落碰撞的研究大多采用数值模拟方法,计算手机等跌落物件的变形和应变<sup>[4-6]</sup>。有限元方法虽然成本低,但因材料参数及本构方程等模拟条件设置的影响,模拟计算得出的数据与实际情况存在一定程度的差距。跌落碰撞运动存在不确定性,如碰撞的位置,跌落的姿态等。这些不确定性导致需要对所有可能发生碰撞的部位进行测量,增加了测量难度。应变仪等机械测量设备,虽然有较好的精度,但是不能进行全场测量,效率较低,且因其自身接触式测量的缺点,不能很好地适用于运动动态测量。

数字图像相关法是20世纪80年代由M. A. Sutton等提出的一种光学测量方法<sup>[7]</sup>。该方法通过对物体表面变形前后的两幅散斑图像的跟踪匹配及相关计算,获得位移和变形信息,具有非接触、高精度全场测量等优点。目前,国外一些研究者已经开发了高速3D-DIC产品,如VIC-3D等,但是价格普遍昂贵;在国内,该方法已经比较成熟地应用于板料成形、焊接变形等行业。将数字图像相关法应用于跌落冲击实验,需要进行一

些针对性的改进。

高速摄影技术可以拍摄跌落、冲击等高速运动中的动态图像,结合双目立体视觉<sup>[8]</sup>与数字图像相关法,可以实现对物体变形的动态监测与定量分析。本文结合高速图像采集技术、立体视觉原理及数字图像相关法,提出一种用于手机跌落过程全场变形与应变测量的方法,并研制了对应的高速三维光学测量系统。实验结果表明,本文方法可以满足手机跌落碰撞全场变形与应变测量的要求,与传统测量方式相比有明显优势,是研究手机跌落碰撞变形规律的有效途径。

## 2 高速三维数字图像相关法

数字图像相关法的匹配原理如图1所示。在参考图像中,以待匹配点 $(x_0, y_0)$ 为中心,取大小为 $(2M+1) \times (2M+1)$ 的矩形图像子区,在待匹配图像中,通过一定的图像搜索方法,寻找与参考图像中选定的图像子区相关系数(相似程度)最大的以 $(x'_0, y'_0)$ 为中心的目标图像子区,点 $(x'_0, y'_0)$ 即为点 $(x_0, y_0)$ 在待匹配图像中的对应点。数字图像相关法在二维测量,待匹配图像中 $(x'_0, y'_0)$ 点的坐标与参考图像中 $(x_0, y_0)$ 点的坐标之差即为待测点位移。选择不同的参考子区与目标子区,重复以上过程,可得到物体表面全场的变形数据<sup>[9]</sup>。

三维数字图像相关法,是一种基于二维数字图像相关法和立体视觉原理的光学测量方法<sup>[10]</sup>,主要包括相机标定、散斑制作、图像采集、匹配计算、三维重建、变形与应变计算等过程。具体地,采用标定好的两个或多个相机,从不同角度拍摄试件的变形过程,根据立体视觉原理,将图像内点的平面坐标转换成三维空间坐标,通过立体匹配和时序匹配计算三维坐标变化量,获得试件表面的变形场,进一步计算得到应变场<sup>[11]</sup>。

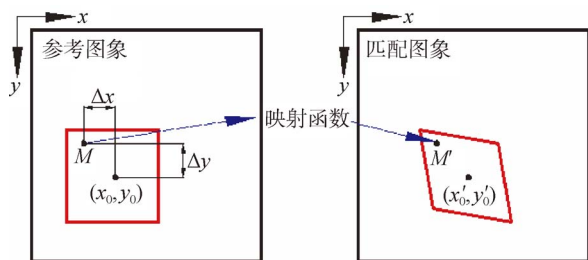


图 1 数字图像相关法基本原理

Fig. 1 Schematic diagram of digital image correlation

数字图像法应用于跌落测量实验的难点在于:跌落时目标的姿态不可控,较大角度的反转会造成散斑图像弱相关,且会引起局部光强变化,导致较低的测量精度甚至匹配失败,过度翻转、遮挡,将会导致不可测量。人为地调整跌落前的姿态,保证与刚性面接触时被测散斑图案面处于相机的视野中,可以基本避免过度翻转与遮挡问题,但是不能解决跌落碰撞时手机翻转对散斑匹配造成的影响,需要对相关计算方案和匹配方案进行改进。

### 2.1 计算方案

相关系数是用来衡量参考子区和目标子区之间相似程度的函数,数字图像相关法通过计算相关系数函数的极值来匹配图像<sup>[12]</sup>。手机跌落碰撞过程中,除了基本的平移运动,还伴随着翻转等运动,会导致采集的散斑图像质量不佳,因此采用带两个未知参数的最小平方距离函数(公式(1)),减小翻转等运动引起角度变化带来的光强波动的影响:

$$C(p) = \sum_{i=1}^{(2m+1)^2} [g(x'_i, y'_i) - a(f(x_i, y_i) - b)]^2, \quad (1)$$

式中:  $(x_i, y_i)$  为参考图像子区中任一点  $M$  的图像坐标;  $f$  为参考图像子区中任一点  $M$  的灰度值;  $g$  为点  $M$  在目标图像中的对应点  $M'$  的灰度值;  $a, b$  为光强波动补偿系数;  $P$  为相关参数向量,取决于映射函数的模式,为待求解的未知数。

在求解相关系数时,需要利用映射函数对子区图像上的像素点的运动进行描述。针对跌落碰撞中平移翻转运动的特点,采用一阶映射函数:

$$\begin{cases} x'_i = x_i + u + u_x \Delta x + u_y \Delta y \\ y'_i = y_i + v + v_x \Delta x + v_y \Delta y \end{cases}, \quad (2)$$

式中:  $u, v$  分别为图像子区中心点变形后在  $x$  方

向和  $y$  方向的位移,  $u_x, u_y, v_x, v_y$  为参考子区的位置梯度,分别为点  $M$  相对子区中心点在  $x$  方向和  $y$  方向的距离。

双三次样条插值具有对亚像素位置处灰度较强的预测能力,本文在灰度迭代运算中使用双三次插值,从而提高计算精度,其表达式为:

$$g(x', y') = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} (x')^i (y')^j. \quad (3)$$

在确定了相关系数、映射系数、插值方法的基础上,本文使用 Newton-Raphson 方法进行灰度梯度迭代得到极值点。

### 2.2 顺序逐帧基准匹配

针对手机跌落碰撞过程中水平面内翻转导致的匹配失败,变形应变场缺损严重的问题,在唐正宗等<sup>[13-14]</sup>提出的种子点匹配方法的基础上,进行适应性改进。如图 2 所示,在进行第  $n$  个状态散斑图像匹配时,令碰撞前一时刻状态为第 0 状态。匹配步骤如下:

(1) 将第 0 个状态图像作为参考优先匹配;

(2) 若与第 0 个状态的散斑图像匹配失败,则与第 1 个状态的散斑图像匹配;

(3) 若匹配失败,则以此类推,直到第  $n-1$  个。

初始未变形状态散斑图像优先匹配,极大程度减小了单纯以上一帧为参考计算带来的累积误差,保证了匹配精度;对于未成功匹配的散斑进行顺序逐帧基准匹配,能够提高变形场的完整度。

匹配及重建完成后,求解坐标变化从而得到变形数据。采用文献[15]中的方法,将目标点及其周围三角网格化,求解三角网格变形前后的边长变化,利用柯西-格林张量,得到拉格朗日应变。

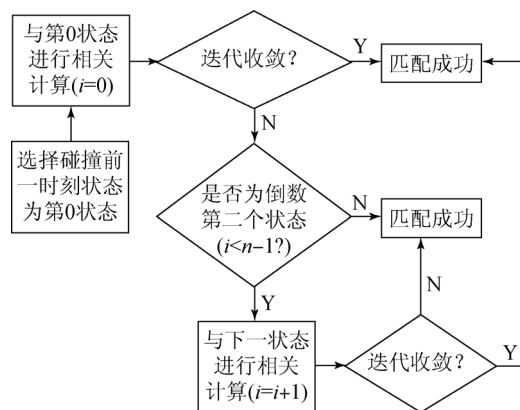


图 2 顺序逐帧基准匹配方法

Fig. 2 Speckle matching by successive-frame benchmark

### 3 试验方案

数字图像相关法测量跌落碰撞中手机的变形过程主要分试验阶段和计算阶段两个阶段。其中,试验阶段主要是在待测表面制备散斑、布置测量头以及对相机进行标定,完成试验,最终获得图像;计算阶段主要计算变形与应变。

#### 3.1 跌落试验三维光学测量系统

针对跌落试验,本文研制的光学测量系统如图 3 所示,主要由两台高速相机(EoSens © 4CXP)、led 光源、控制箱、一台计算机和标尺等硬件以及自主研发的变形测量计算软件组成。其中,EoSens © 4CXP 高速相机的最高分辨率为  $2\ 336 \times 1\ 728$  pixel,最高帧率可达 560 frame/s;标尺主要用于相机的标定;高性能计算机装配了自主研发的计算处理软件,将试验中采集的图像导入软件,经过计算分析,即可获得变形或应变数据。

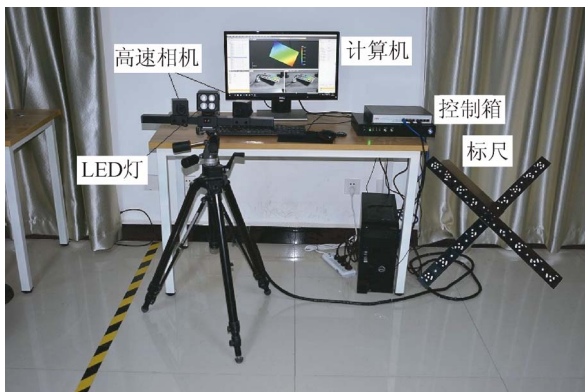


图 3 自主研发的跌落试验三维光学测量系统  
Fig. 3 Proposed 3D optical measurement system for dropping test

#### 3.2 试验装置

为实现上述目的,设计如图 4 所示的跌落试验。对比验证试验和全场测量试验在同一次试验中进行。试验装置如图 4 所示,高速相机的采集频率为 150 Hz,镜头焦距为 16 mm。LED 光源可转动,亮度可调节。测量幅面约为  $290\text{ mm} \times 220\text{ mm}$ 。相机标定采用的是一种基于光束平差原理的相机自标定方法,其具体步骤参考文献[16]。试验采用的跌落物是华为荣耀 4A 手机前壳,准备跌落试验时,在手机壳上粘贴应变片采集单点的应变数据,供后期数据对比。由于手机前壳面较小,且运动条件有限,仅在中央位置贴置应

变片,与温度补偿片组成半桥单补测量桥路。本次试验使用的应变仪为高速动态应变仪,测量精度为 0.5% FS,工作应变片粘贴至手机壳中央位置,温度补偿应变片粘贴至另一个相同材质的手机壳上,作为温度补偿。在粘贴有应变片的手机壳表面制备散斑,如图 5 所示。

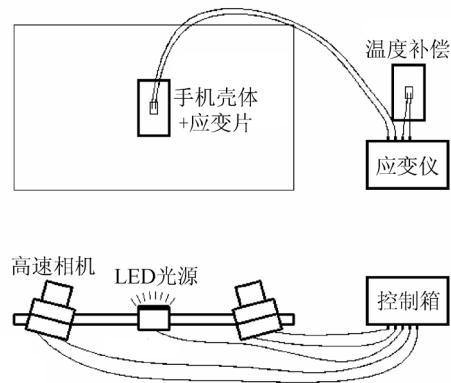


图 4 跌落试验装置示意图  
Fig. 4 Schematic of dropping experimental device

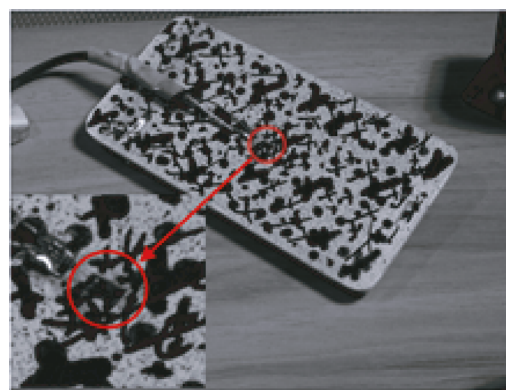


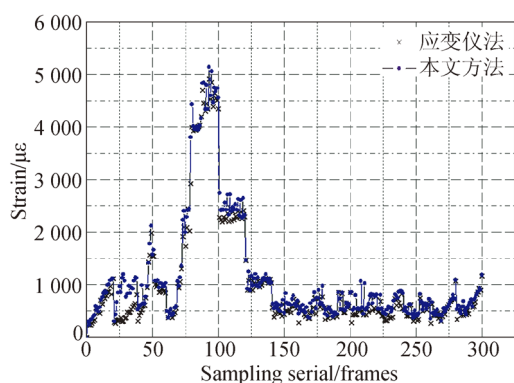
图 5 散斑制备  
Fig. 5 Speckle preparation

### 4 试验结果分析

#### 4.1 对比验证

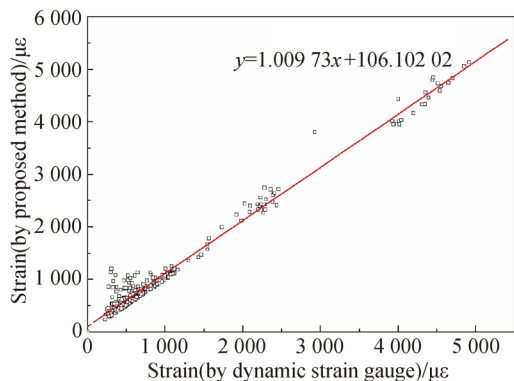
在粘贴区域沿应变片伸展方向选取一条截线,计算平均应变,并与应变仪测得的结果进行对比,结果如图 6 所示。图 6(a)为跌落碰撞过程中两种方法单点测量的平均应变对比曲线,可以看出,两种方法测得的数据分布及变化趋势一致。图 6(b)为以应变仪测得结果为横坐标,本文方法测得值为纵坐标拟合的直线,其线性方程为:  $y = 1.009\ 73x + 106.102\ 02\ \mu\epsilon$ 。由该式可以看出,两种测量方法的相对误差远小于应变仪的标称精度

误差 0.5%，根据概率统计原理，可以认为本文方法的精度误差在 0.5% 以下。存在差异的主要原因如下：(1) 试验中手机壳碰撞时伴随着振动，对应变片粘接处有不同程度的损耗；(2) 测量设备自身的误差。



(a) 测量点应变曲线

(a) Strain curve of measuring points



(b) 两种方法数据相关性拟合结果

(b) Fitting data for correlation of two methods

图 6 两种测量方法结果对比

Fig. 6 Comparison of results between proposed method and dynamic strain gauge

#### 4.2 计算方案验证

计算方案的改进主要体现在匹配计算方法上。由于手机壳在跌落碰撞试验中姿态变化，部分散斑图案往往难以匹配，从而造成变形场空洞。采集手机壳接触地面前 50 个状态，从误差和变形场完整度两方面，比较以初始状态为参考的匹配算法改进前后的优劣性。单纯以上一状态为参考进行匹配，虽能保证较为完整的变形场，但累积误差较大，不予考虑。

在第一帧图片上选取手机壳上距离约为 15 mm 的两个点，在接触地面前，两点间的距离理论上是恒定的，但由于测量设备等因素的影响，往

往存在误差。比较改进前后两点间的距离变化，可以一定程度上反映改进前后的精度差异。

从图 7 可以看出，改进后的匹配方法精度约为 0.42%。图 8 中，改进前平均有效网格面片数量为 3 907，改进后平均有效网格面片数量为 4 721，总体上提高了约 21%，变形场完整度有较大提高。因此，将碰撞前一刻的状态作为优先参考状态，其余状态作为备用参考状态依次顺序匹配能较好地保证匹配精度和变形场的完整性。

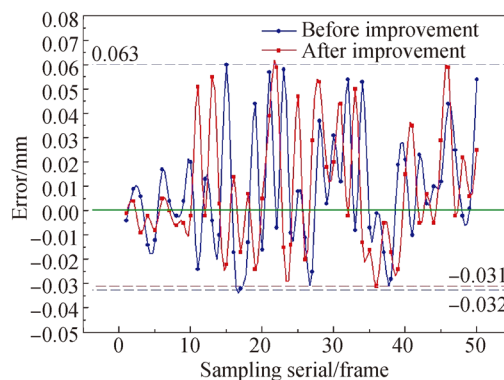


图 7 动态测量误差

Fig. 7 Dynamic measurement error



(a) 改进前

(b) 改进后

(a) Before improvement

(b) After improvement

图 8 面片完整度对比

Fig. 8 Contrast of face integrity

#### 4.3 全场应变分析

由于手机壳上半段有导线遮挡，所以仅对下半段进行变形测量。手机跌落碰撞大体可以分为 4 个阶段，如图 9 所示：接触地面前近似做自由落体，如图 9(a) 所示，(由于应变仪导线的牵制) 手机壳表面无明显应变产生；初始接触地面时，如图 9(b) 所示，与地面接触的前端角处应变最大，并以此为中心，沿着手机壳表面向其它方向波动；缓冲期是指手机壳自由回弹之前的时期，如图 9(c) 所示，此阶段手机壳发生扭转、弯曲，是变形量最大时期，其中，与地面接触的连接处扭转、弯曲最为剧烈；自由回弹期是一个应力释放的过程，如图 9(d) 所示，但由于手机壳有一定的弹性引起自身振动，应力不会骤然消失，总体上应变波动逐渐减小。

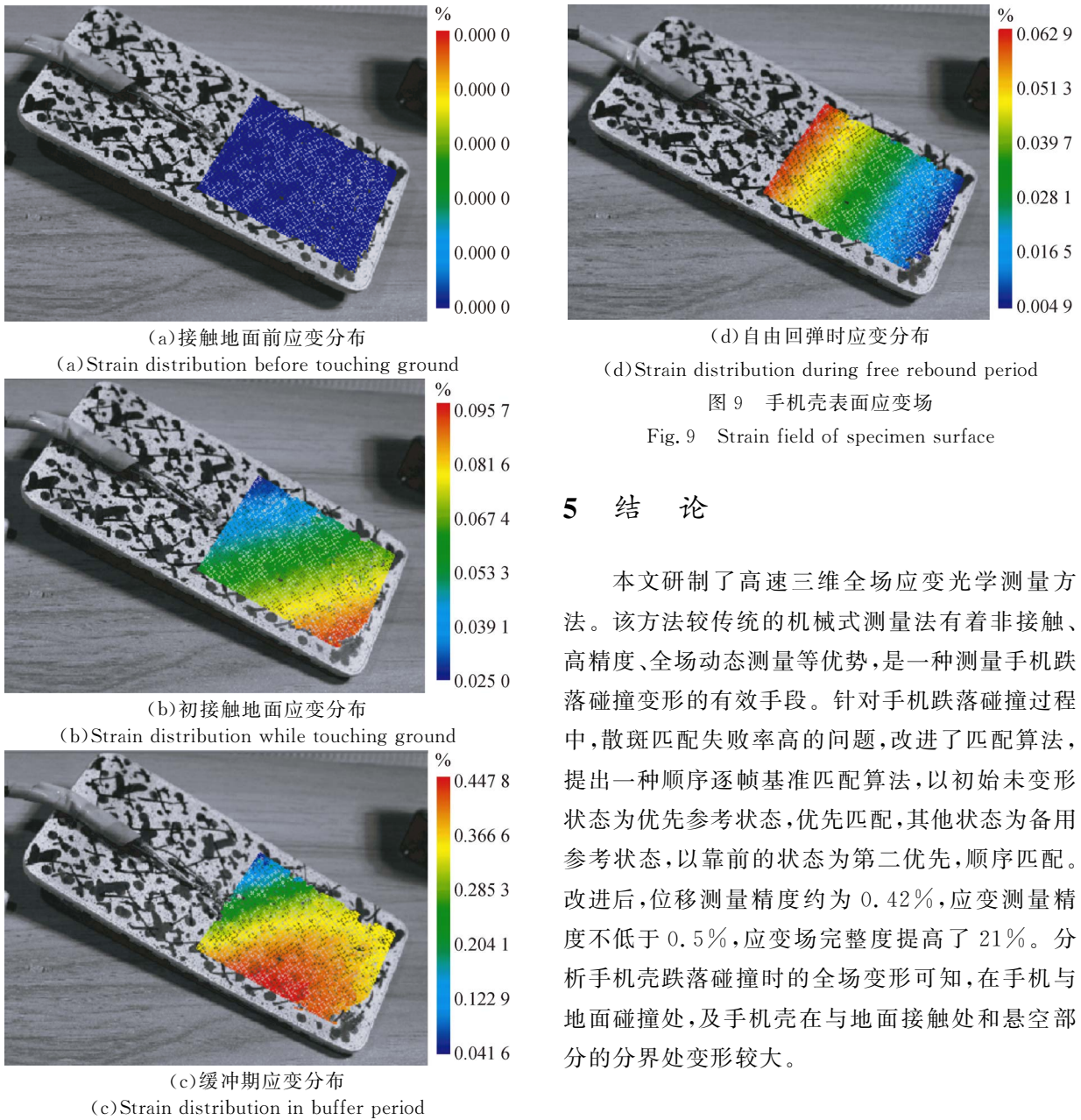


图 9 手机壳表面应变场

Fig. 9 Strain field of specimen surface

### 5 结 论

本文研制了高速三维全场应变光学测量方法。该方法较传统的机械式测量法有着非接触、高精度、全场动态测量等优势,是一种测量手机跌落碰撞变形的有效手段。针对手机跌落碰撞过程中,散斑匹配失败率高的问题,改进了匹配算法,提出一种顺序逐帧基准匹配算法,以初始未变形状态为优先参考状态,优先匹配,其他状态为备用参考状态,以靠前的状态为第二优先,顺序匹配。改进后,位移测量精度约为 0.42%,应变测量精度不低于 0.5%,应变场完整度提高了 21%。分析手机壳跌落碰撞时的全场变形可知,在手机与地面碰撞处,及手机壳在与地面接触处和悬空部分的分界处变形较大。

### 参考文献:

[1] 石春琦. 智能处理器芯片的市场发展趋势分析[J]. 集成电路应用, 2017(10): 9-12.  
SHI CH Q. Analysis of the market trend of smart processor chip [J]. *Applications of IC*, 2017(10): 9-12. (in Chinese)

[2] 吴剑. 基于有限元仿真的大屏幕超薄手机抗跌落研究[J]. 数字技术与应用, 2012(11): 89-90.  
WU J. Study on the anti fall of large screen ultra thin mobile phone based on finite element simulation [J]. *Digital Technology and Application*, 2012 (11): 89-90. (in Chinese)

[3] 马恒杰. 某大屏手机的设计及其有限元分析[D]. 苏州: 苏州大学, 2014.  
MA H J. *Design and Finite Element Analysis of a Large Screen Mobile Phone* [D]. Suzhou: Soochow University, 2014. (in Chinese)

[4] 占智贵, 刘明建. 手机主摄像头跌落仿真和优化设计[J]. 计算机辅助工程, 2015, 24(2): 59-62.  
ZHAN ZH G, LIU J M. Drop simulation and optimization design on main camera of mobile phone [J]. *Computer Aided Engineering*, 2015, 24(2): 59-62. (in Chinese)

- [5] 陈飞, 岳应娟, 杜小军, 等. 基于 LS-DYNA 的高压气瓶跌落仿真分析[J]. 武汉科技大学学报, 2013, 36(2):146-149.  
CHEN F, YUE Y J, DU X J, *et al.*. Simulation analysis of high-pressure gas cylinder dropping based on LS-DYNA [J]. *Journal of Wuhan University of Science and Technology*, 2013, 36: 146-149. (in Chinese)
- [6] LI ZH, CHEN Y M, HE X M, *et al.*. Dropping simulation induced by BGA position in printed circuit board for optical module application [C]. *DEStech Transactions on Engineering and Technology Research*, 2017.
- [7] PETERS W H, RANSON W F, SUTTON M A, *et al.*. Application of digital correlation methods to rigid body mechanics [J]. *Opt. Eng.*, 1983, 22(6):738-742.
- [8] 杨景豪, 刘巍, 刘阳. 双目立体视觉测量系统的标定[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(2):300-308.  
YANG J H, LIU W, LIU Y, *et al.*. Calibration of binocular vision measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(2):300-338. (in Chinese)
- [9] 胡浩, 梁晋, 唐正宗, 等. 数字图像相关法测量金属薄板焊接的全场变形[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(7):1636-1644.  
HU H, LIANG J, TANG ZH Z, *et al.*. Measurement of full-field deformations in metal sheet welding processes by image correlation method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7):1636-1644. (in Chinese)
- [10] YAN T H, SU Y, ZHANG Q CH. Precise 3D shape measurement of three-dimensional digital image correlation for complex surfaces [J]. *Science China(Technological Sciences)*, 2018, 61(1):68-73.
- [11] HUNADY R, HAGARA M. A new procedure of modal parameter estimation for high-speed digital image correlation [J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2017, 93:66-79.
- [12] CHEN ZH X, LIANG J, ZHANG D H, *et al.*. Speckle technique applied to precise measurement of strain [C]. *2010 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology (IC-CET)*, 2010.
- [13] 唐正宗, 梁晋, 肖振中, 等. 大变形测量数字图像的种子点匹配方法[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(11):51-55.  
TANG ZH Z, LIANG J, XIAO ZH ZH, *et al.*. Digital image correlation method based on seed point for large deformation measurement [J]. *Journal of Xian Jiaotong University*, 2010, 44(11):51-55. (in Chinese)
- [14] 肖振中, 徐爱珠, 安顺泰, 等. 用基于种子点的三维图像相关法测量连续大变形[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(9):2277-2283.  
XIAO ZH ZH, XU A ZH, AN SH T, *et al.*. Measurement of large deformation by digital image correlation method based on seed points [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9):2277-2283. (in Chinese)
- [15] JEAN-JOSÉ O. 3-D computer vision in experimental mechanics [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2009, 47(3-4):282-291.
- [16] 胡浩, 梁晋, 唐正宗, 等. 大视场多像机视频测量系统的全局标定[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(2):369-378.  
HU H, LIANG J, TANG ZH Z, *et al.*. Global calibration for multi-camera videogrammetric system with large-scale field-of-view [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2):369-378. (in Chinese)

## 作者简介:



王立忠(1968—),男,山东梁山人,博士,副教授,博士生导师,2004年于西安交通大学获得博士学位,主要从事三维光学测量技术的研究。E-mail: wanglz@mail.xjtu.edu.cn

## 通讯作者:



汪耀(1994—),男,安徽安庆人,硕士研究生,2012年于西北农林科技大学获得学士学位,主要从事三维光学测量方面的研究。E-mail: wangyao2016@stu.xjtu.edu.cn