

# 基于虚拟体育运动的散斑测距研究

阮传扬<sup>1,2,3</sup> 邓飞其<sup>1</sup> 姜军<sup>2,3</sup> 程俊<sup>2,3</sup>

(<sup>1</sup> 华南理工大学自动化科学与工程学院, 广东 广州 510640  
<sup>2</sup> 中国科学院深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518055; <sup>3</sup> 香港中文大学, 香港)

**摘要** 虚拟体育运动是一种逼真自然的人机交互系统。传统散斑相关算法的搜索速度较慢,不能满足虚拟体育运动对实时性的要求。通过对数字散斑相关测量方法的研究,提出一种有效的基于邻域相关信息的快速搜索方法,极大地降低了对应点匹配的计算复杂度,进而提高了深度测量的速度。根据测量结果的误差特征,提出了距离加权邻域平均插值算法,可以显著提高深度测量的精度。实测实验证明了该方法的有效性。

**关键词** 测量;虚拟体育运动;数字散斑;时间序列相关;单峰性

**中图分类号** TP391.41; TN911.73; O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.071002

## Research on Speckle Range Measurement Based on Virtual Sports

Ruan Chuanyang<sup>1,2,3</sup> Deng Feiqi<sup>1</sup> Jiang Jun<sup>2,3</sup> Cheng Jun<sup>2,3</sup>

(<sup>1</sup> College of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China  
<sup>2</sup> Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen, Guangdong 518055, China  
<sup>3</sup> Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China)

**Abstract** Virtual sports is a vivid human-computer interaction system. Search speed of the traditional speckle correlation algorithm is a little lower and it cannot meet the actual requirement of virtual sports. By studying the methods of digital speckle correlation measurement, a kind of an effective fast search method based on the relevant information of the neighborhood is proposed which can greatly reduce the computational complexity of the corresponding point matching and increase the speed of depth measurement. According to the error characteristics, a new interpolation method based on distance weighting is presented, which can greatly improve the accuracy of depth measurement. Experiments are demonstrated to support the effectiveness of this method.

**Key words** measurement; virtual sports; digital speckle; temporal-sequence correlation; single-peaked property

**OCIS codes** 100.2000; 100.6890

## 1 引言

长期以来,科技工作者一直致力于寻求一种图文并茂、逼真自然并具身临其境之感的和谐人机交互环境。这一需求推动了虚拟体育运动的兴起与发展。人体运动捕捉一直是计算机视觉领域的研究热点。传统方法采用的是带标志点的识别方式,通过对标志点进行图像匹配和三维重建,获取目标的三维信息。在微软公司2010年发布的Xbox360 Kinect系统中,应用了最先进的无标志点的基于数字散斑投影的三维测量技术,可以实时、高精度地重建出目标场景的深度信息,然后对场景中的人体进行三维信息处理、理解和跟踪。

**收稿日期**: 2012-03-14; **收到修改稿日期**: 2012-04-19; **网络出版日期**: 2012-05-21

**基金项目**: 国家自然科学基金(60806050)、广东省自然科学基金重点项目(10251064101000008)和深圳市科技研发资金基础研究计划(JC201005270364A)资助课题。

**作者简介**: 阮传扬(1987—),男,硕士研究生,主要从事系统分析与集成和计算机视觉等方面的研究。

E-mail: ruancyang@163.com

**导师简介**: 邓飞其(1961—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事控制理论与系统工程方面的研究。

E-mail: aufqdeng@scut.edu.cn

这种交互方式具有真实的用户体验和强大的便捷性,使得人机交互方式更加自由、方便,彻底改变了人机交互传统的感应方式。

数字散斑相关测量方法是20世纪80年代由日本的Yamaguchi<sup>[1]</sup>和美国的Peters等<sup>[2]</sup>同时独立提出的。Yamaguchi<sup>[1]</sup>在研究物体微小形变时,通过测量物体变形前后光强的互相关函数峰值,来导出物体的位移。在此同时,Peters等<sup>[2]</sup>通过对物体变形前后得到的数字灰度场进行相关迭代运算,也就是计算相关系数随试凑位移及其导数的变化过程,获取相关系数的极值,进而得到相应的位移、应变。

数字散斑相关测量方法是对全场位移和应变进行量化分析的光学测量方法,其基本原理是通过比较物体变形前后表面散斑图像的变化,来获取位移和应变场信息。与其他光学测量方法相比[如利用散斑照相的二次曝光或者散斑图像相减以及电子散斑图像相减,从而得到杨氏条纹<sup>[3]</sup>,测量物体的应变、振动和位移],该方法可以通过分析散斑图像所携带的信息来测量物体表面的粗糙度和形貌<sup>[4~8]</sup>,以及利用自混合散斑干涉测量流体速度等<sup>[9]</sup>。数字散斑测量相关方法的优点是<sup>[10]</sup>:1)具有非接触性、无损测试的特点;2)光路简单,可使用白光做光源;3)表面处理技术简便,可通过物体表面自然或人工形成的随机散斑图像,来提取所需的变形信息;4)对测量环境要求不高,便于实现工程现场应用。但是,为了寻求其最大的相关值,需要进行大量重复繁琐的数字散斑相关计算,导致处理数据的过程非常慢。此外,环境光以噪声的形式对散斑图像产生影响,导致测量精度降低。数字散斑相关法为三维体感人机交互提供了一种新颖的测量方法,并可以有效地应用于虚拟体育运动中。然而虚拟体育运动要求系统对数据进行实时处理,因此如何在保证一定测量精度的条件下,降低数字散斑相关搜索方法的计算复杂度是研究的重点。

本文通过理论和实验研究,提出了一种基于相邻点的数字散斑快速搜索方法,该方法有效地提高了数据的利用率,灵活地避免了复杂运算。根据测量点的误差特征,提出了距离加权邻域平均法,显著地提高了测量精度并得到了非常好的测量结果。实验证明所提方法能快速、有效地测量物体的深度信息。

## 2 基本原理

### 2.1 基本概念

将随机数字散斑投影到参考平面上,等间距平行移动,每隔一段间距取一个参考平面,记录参考平面上的散斑图案,作为相关运算的参考图像集合 $R(t)$ 。参考平面的数量 $N$ 由测量精度决定,精度越高, $N$ 越大。然后,用被测物体取代参考平面空间,采集被测物体的散斑图像,其子图像 $O(x, y; H_0)$ 与参考图像集中对应位置的子图像 $R(x, y; t)$ 之间的相关曲线呈现近似高斯分布的特征,其峰值点所对应的参考平面深度,就是该子图像对应的深度 $H(x, y)$ 。该方法利用了散斑随深度的变化而在水平面内移动的性质<sup>[11]</sup>。

### 2.2 数字散斑相关算法以及相关曲线

设投影散斑图像被分成若干个 $i \times i$ 的散斑子图像。为不失一般性,可设散斑子图像为方阵。每个参考散斑子图像可以用 $R(x, y, m, n; t)$ 表示,其中 $(x, y)$ 为子图像在散斑图像坐标系中的位置, $(m, n)$ 为子图像中像素点的位置, $m, n$ 的取值从1到 $i$ ;  $t$ 从0到 $N$ ,为参考平面序列号;每一参考平面对应于零参考平面的相对深度为 $H = \Delta h \times t$  ( $\Delta h$ 为参考平面之间的间距)。在被测物体散斑图中取同样大小的子图像 $O(x, y, m, n; H_0)$ 。分别计算 $O(x, y, m, n; H_0)$ 与参考平面集中对应位置的散斑子图像序列 $R(x, y, m, n; t)$ 之间的相关值。

图1为参考散斑图像集中相关运算示意图<sup>[12]</sup>,图1(a)中 $R(x, y; 0), R(x, y; 1), \dots, R(x, y; t), \dots, R(x, y; N-1), R(x, y; N)$ 为参考集中 $(x, y)$ 处的散斑子图像序列,中心连线垂直于参考平面;图1(c)为被测物体上对应点处的子图像 $O(x, y; H_0)$ 。要计算 $O(x, y; H_0)$ 处的高度 $H_0(x, y)$ ,首先要计算 $O(x, y; H_0)$ 分别与参考集中对应子图像序列 $R(x, y; t)$ 间的相关值。

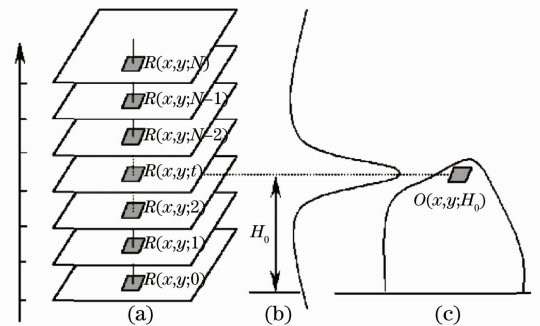


图1 数字散斑时间序列相关法原理图

Fig. 1 Principle illustration of digital speckle temporal-sequence correlation method

根据确定相关系数的难易程度、搜索最大相关值的速度以及测量的精度比较各种相关公式后得知,下式最为有利且符合要求<sup>[13]</sup>:

$$C(x, y; t) = \frac{\left\{ \sum_i \sum_i [(f - \bar{f}) \cdot (g - \bar{g})] \right\}^2}{\sum_i \sum_i (f - \bar{f})^2 \cdot \sum_i \sum_i (g - \bar{g})^2}, \quad (1)$$

式中  $f = R(x, y, m, n; t)$ ,  $g = O(x, y, m, n; H_0)$ ,  $\bar{f}$  与  $\bar{g}$  分别为  $f$ 、 $g$  的平均值;  $C(x, y; t)$  为被测物体在  $(x, y)$  处与第  $t$  个参考平面相对应位置的相关值。

由于被测物体子图像的深度信息落在最大相关值所对应的参考平面附近,因此子图像序列中的其他子图像与被测子图像只会部分相似,离最大相关值平面越远的参考平面其相关值越小,因此图 1(b) 的图像呈高斯分布特征。

因为被测物体子图像的深度信息未必刚好落在最大相关值所对应的参考平面上,所以为了不失一般性,需要进行曲线拟合来确定被测子图像每一点的深度信息。考虑到虚拟体育对实时性要求较高而对精度的要求不是很高的特点,可以用三点重心算法,即取相关峰值附近 3 个点做重心运算,则  $(x, y)$  处的位置为<sup>[11]</sup>

$$t(x, y) = \frac{\sum_{s=-1}^1 C(x, y; t_0 + s) \times (t_0 + s)}{\sum_{s=-1}^1 C(x, y; t_0 + s)}, \quad (2)$$

式中  $t_0$  为最大相关值所对应的序列数,被测物体深度准确位置为

$$H = t(x, y) \times \Delta h. \quad (3)$$

### 3 改进的数字散斑相关测量方法

针对虚拟体育对实时性的较高要求,为了降低相关算法的计算复杂度,本文对相关算法搜索路径进行了改进,提出了基于邻域相关信息的快速搜索方法。由于散斑测量中误差点的相关值可信度较低,因此需要对其进行有效剔除及插值。根据测量点的误差特征,提出了有效的距离加权邻域平均插值算法。

#### 3.1 基于邻域相关信息的快速搜索方法

传统数字散斑相关算法的搜索路径就是利用(1)式与每个参考平面进行相关运算,找出最大相关值所在的参考平面,从而计算出其深度。由于每次计算相关值都需要进行大量运算,而找出最大相关值又需要被测子图像跟各个参考平面相对应位置进行相关值运算,然后再进行比较,所以整个过程计算数据非常庞大,比较耗费机时,很难达到虚拟体育实时性的目标。为了提高测量速度,提出一种新的基于邻域相关信息的快速搜索方法。搜索流程如图 2 所示:首先按照传统搜索方法找到被测图像起始子图像与参考平面簇中对应位置的最大相关值,当最大相关值满足阈值条件时,则最大相关值所在的参考平面深度值为有效值。其相邻点可以利用该有效参考平面进行相关运算,根据相关曲线呈单一主峰形<sup>[14]</sup>的特点,可以快速、准确地找到其对应的最大相关值所在的参考平面。具体搜索步骤如下:

1) 计算被测图像在起始点  $(x, y)$  处的散斑子图像  $O(x, y, m, n; H_0)$  与参考平面簇中对应位置的散斑子图像序列  $R(x, y, m, n; t)$  之间的最大相关值  $C(x, y; t_0)$ , 其中  $i/2 < x < 480 - i/2$ ,  $i/2 < y < 640 - i/2$ 。设阈值为  $T$ , 当  $C(x, y; t_0)$  大于  $T$  时为有效值, 确定出  $t_0$ ; 当  $C(x, y; t_0)$  小于阈值时, 跳过该点计算下一点, 直到找到相关值大于阈值的点。

2) 取被测散斑子图像  $O(x, y, m, n; H_0)$  的相邻子图像  $O(x + p, y + q, m, n; H)$  与参考平面簇中对应位置的第  $t_0$  及  $t_0 - 1$  个平面进行相关值计算。

3) 若  $C(x + p, y + q; t_0) > C(x + p, y + q; t_0 - 1)$ , 则令子图像  $O(x + p, y + q, m, n; H)$  与参考平面簇中对应位置的第  $t_0 + 1$  个平面进行相关值计算, 若  $C(x + p, y + q; t_0 + 1) > C(x + p, y + q; t_0)$ , 则依此类推, 往下进行计算并对比, 直到  $C(x + p, y + q; t_0 + k) < C(x + p, y + q; t_0 + k - 1)$  为止, 其中  $k > 1$ 。由于相关值呈单一主峰形, 则知深度值与第  $t_0 + k - 1$  个平面最大相关。

4) 若  $C(x + p, y + q; t_0) < C(x + p, y + q; t_0 - 1)$ , 则令子图像  $O(x + p, y + q, m, n; H)$  与参考平面簇

中对应位置的第  $t_0 - 2$  个平面进行相关值计算, 若  $C(x+p, y+q; t_0 - 1) < C(x+p, y+q; t_0 - 2)$ , 则依此类推继续计算, 直到  $C(x+p, y+q; t_0 - k) > C(x+p, y+q; t_0 - k - 1)$  时, 则最大相关值平面为第  $t_0 - k$  个平面。

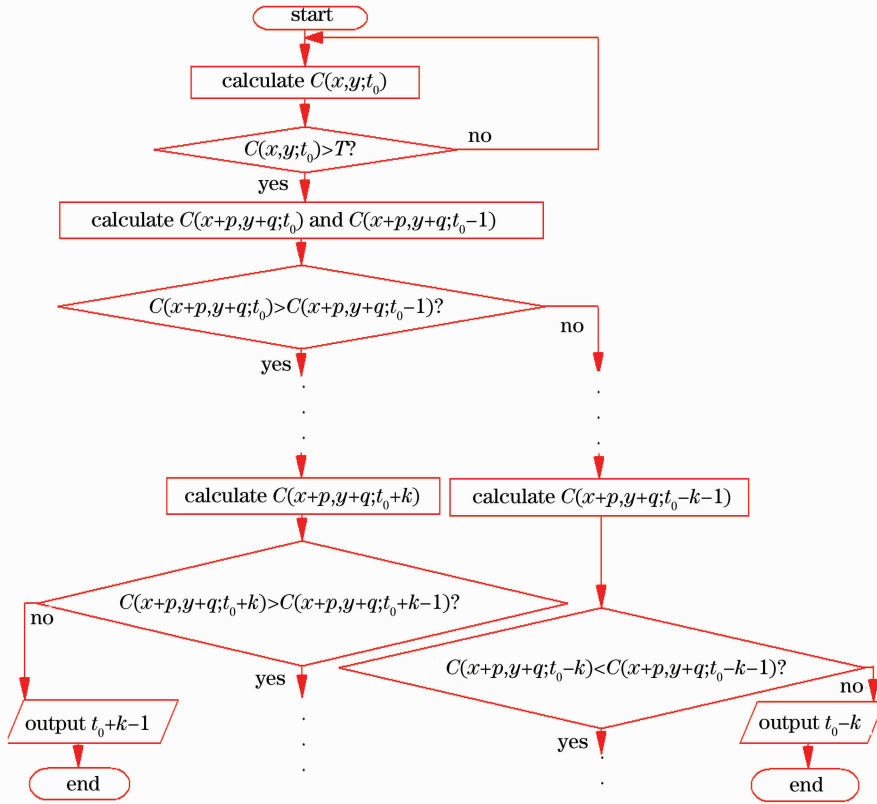


图 2 基于相邻点的快速搜索方法程序流程图

Fig. 2 Program flow chart of quick search method based on the adjacent point

利用以上的搜索方法, 被测子图像无需逐个与参考平面进行相关运算, 而是根据需要进行计算, 而且每一次计算都是朝着该点的最大相关值所在的平面靠近, 与传统搜索方法相比, 无疑可以大大地减少计算量, 加快运行速度。

### 3.2 距离加权邻域平均插值算法

由于相关值越大, 其对应的深度值就越可信, 如果在插值时该点贡献越多, 则插值结果就越可靠。不可信点不参与插值计算, 这样不仅保证了插值的可靠性, 而且能有效防止误差扩散。设相关值不可信点的坐标为  $(x, y)$ , 对应的相关值为  $C(x, y)$ , 根据不同距离点对误差点的贡献不同, 则对误差点的有效相关值为

$$G(x, y) = \frac{C(x, y)}{\sqrt{x^2 + y^2}}. \quad (4)$$

对于非边界点  $H(x, y)$ , 其相邻点中满足阈值条件的有效相关值总和为

$$\sum G(x, y) = \sum_{i=-1}^{i=1} \sum_{j=-1}^{j=1} G(x+i, y+j), \quad C(x, y) > T. \quad (5)$$

权因素  $k(i, j)$  由(4)、(5)式得出

$$k(i, j) = \begin{cases} \frac{G(x+i, y+j)}{\sum G(x, y)} & C(x, y) > T \\ 0 & C(x, y) < T \end{cases}, \quad i = -1, 0, 1, j = -1, 0, 1 \quad (6)$$

则插值点的高度为

$$H(x, y) = \sum_{i=-1}^{i=1} \sum_{j=-1}^{j=1} H(x+i, y+j) \times k(i, j). \quad (7)$$

在距离加权邻域平均插值算法中,如果 8 点最小邻域中没有两点相关值大于阈值,则考察 24 点邻域;若仍没有两个测量点的相关值大于阈值,则考虑 48 点邻域;若仍没有两个测量点的相关值大于阈值,放弃插值。一般测量中,不会出现这种情况。这既保证了插值过程的准确性,又保证能替换掉不可靠的测量结果<sup>[11]</sup>。

## 4 实验及验证过程

### 4.1 测量方法

实验中散斑图像由 Kinect 设备生成,通过与计算机连接并运用 VC2008 及 OpenCV 程序从 Kinect 中提取出标定好的散斑图像。具体实验步骤如下:1)将可移动桌子放置到与墙间距  $d$  处且正侧面平行于墙面,然后把 Kinect 设备放置到可移动桌正侧面的上方桌面上,并且保证与正侧面平行一致,然后将其固定在桌面上并连接到计算机。2)运行事先编好的程序,拍摄第一幅散斑图像作为零参考平面,然后将可移动桌面往墙的反方向等间距平行移动,间距为 2 mm,每移动一个位置就拍摄一幅散斑图像作为参考平面。3)当移动到最后一幅参考平面时,将可移动桌固定,然后将被测物放置于移动桌与墙壁之间,且距移动桌  $d$  外,拍摄被测物图像。考虑到 Kinect 设备可拍摄的范围以及虚拟体育所需的空间大小,当  $80 \text{ mm} < d < 200 \text{ mm}$  时比较合理,实验中拍摄的散斑图像尺寸统一为  $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ ,具体计算时,可只截取感兴趣区域进行计算。图 3 为工作椅调制散斑图。

### 4.2 实验结果

根据上述方法,用 VC++ 及 OpenCV 编制了散斑相关算法及其搜索程序,对一个普通的工作椅进行了测量,当子图像为  $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$  时,结果如图 4 所示。

在大量实验及研究的基础上得知:随着子图像尺寸  $i$  增大,误差有下降的趋势。当  $i$  较小时,一个子图像中包含的散斑结构不足以使散斑序列之间可靠地区分开,这时深度分辨率很低;随着  $i$  增大,深度分辨率增加;当  $i$  太大时,空间分辨率又会下降。因此,在实际测量中, $i$  要取一个适当的数值。结合虚拟体育的应用场景,在本实验中, $i = 5$  为最佳。

实验表明,当用传统逐点分析法时,测量一幅  $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$  的图片在 Intel(R) Pentium(R) Dual E2200@2.20 GHz 的微机上需用 19.5 s,即计算一点的深度平均需用  $63 \mu\text{s}$ ,而采用上述搜索方法仅需 4.6 s,计算一点的深度平均需用  $15 \mu\text{s}$ ,计算速度提高了很多,如表 1 所示。

表 1 两种搜索方法的搜索时间对比

Table 1 Comparison of search time for two search methods

Search method	Total search time / s	Average time / s
Point-by-point analysis	19.5	0.063
Method based on relevant information of neighborhood	4.6	0.015

从测量结果来看,物体面形得到了很好的恢复,但仍有很多误差点存在。比较图 3 与图 4 可以发现,误差主要来源并非物体表面突变而是阴影。经过大量实验发现,测量结果中有误差的地方,其最大相关值大多数小于 0.5。根据本文算法,这意味着被测子图像与参考平面簇中没有一个是相似的,则该相关值不可信,由它确定的深度值也不可信,应该剔除,该点的深度值由插值得到。这里比较三种插值算法:邻域平均法、相关值加权邻域平均法<sup>[13]</sup>及本文提出的距离加权邻域平均法。



图 3 工作椅调制散斑图

Fig. 3 Modulated speckle image of the work chair



图 4 工作椅测量结果

Fig. 4 Measured result of the work chair

利用三种插值方法分别对图 4 进行插值计算,并采用相同的阈值  $T=0.9$ ,得到的插值结果分别如图 5~图 7 所示。图 5 中椅子平面比较清晰,但仍有较大误差,背景中的误差点也没有消除;图 6 中椅体有较大误差,椅背也有微小误差,背景中的误差点基本消除;图 7 中椅体得到了明显改善,椅背误差点基本消除,整个椅子表面得到了比较精确的恢复。实验证明距离加权邻域平均插值法在处理因阴影引起的测量误差时,比邻域平均插值法及相关值加权邻域平均插值法效果更好。

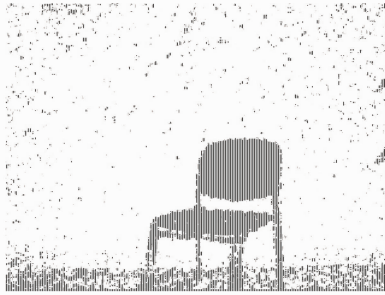


图 5 普通的邻域平均法插值结果

Fig. 5 Interpolation result of Fig. 4 by traditional adjacent domain average interpolation



图 6 相关值加权邻域平均法插值结果

Fig. 6 Interpolation result of Fig. 4 by correlation weighted adjacent domain average interpolation

## 5 结 论

根据虚拟体育运动对实时性的较高要求,提出了基于相邻点的快速搜索方法,给出了实验结果。从实验结果中可以看出,文中提出的搜索方法能够显著地降低计算复杂度,可以快速地测量物体的深度信息。根据测量结果中的误差特征,提出了距离加权邻域平均插值算法,与传统的邻域平均插值算法及相关值加权邻域平均插值算法相比,深度分辨率损失更少,且能显著提高测量精度。不过,由于散斑图记录的是离散的灰度信息,相关搜索时窗口的平移也只能以像素为单位进行,因此相关搜索所能获得的深度信息是以像素为最小单位的值,而真实的位移值不一定正好为整像素值。所以,如何快速地进行亚像素搜索将是下一步的研究方向。



图 7 距离加权邻域平均法插值结果

Fig. 7 Interpolation result of Fig. 4 by distance weighted adjacent domain average interpolation

## 参 考 文 献

- 1 I. Yamaguchi. A laser-speckle strain gage[J]. *J. Phys. E*, 1981, **14**(11): 1270~1273
- 2 W. H. Peters, W. F. Ranson. Digital imaging technique in experimental stress analysis[J]. *Opt. Engng.*, 1982, **21**(3): 427~431
- 3 Robert K. Erf. Speckle Metrology[M]. Yu Guanzheng, Li Dacheng, Cao Mang Transl.. Beijing: China Metrology Press, 1990
- 4 Robert K. Erf. 散斑计量学[M]. 余官正, 李达成, 曹芒译. 北京:中国计量出版社, 1990
- 4 S. L. Toh, C. Quan, K. C. Woo *et al.*. Whole field surface roughness measurement by laser speckle correlation technique [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2001, **33**(6): 427~434
- 5 G. S. Spagnolo, D. Paoletti. Digital speckle correlation for on-line real-time measurement[J]. *Opt. Commun.*, 1996, **132**(1): 24~28
- 6 L. Larsson, M. Sjödaahl, F. Thuvander. Microscopic 3-D displacement field measurements using digital speckle photography[J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2004, **41**(5): 767~777
- 7 Chen Bingquan. Defect measurement based on rotating aperture-stroboscopic speckle interferometry[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 78~81
- 陈炳泉. 旋转孔径频闪散斑干涉法用于缺陷检测[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 78~81
- 8 Liu Haowen, Zhang Qingchuan, Yu Shaojuan *et al.*. Investigation on the three-dimensional deformation of local shearing band by digital speckle metrology technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 898~902

- 刘颢文, 张青川, 于少娟 等. 数字散斑法在局域剪切带三维变形研究中的应用[J]. 光学学报, 2007, **27**(5): 898~902
- 9 Lu Min, Wang Ming, Hao Hui. Measurement of flow velocity using self-mixing speckle interference generated in laser diode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 190~194
- 陆 敏, 王 鸣, 郝 辉. 半导体激光器的自混合散斑干涉测量流体速度[J]. 光学学报, 2005, **25**(2): 190~194
- 10 Fan Xuesong. The Reserch of Digital Speckle Correlation Method[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004
- 樊雪松. 数字散斑相关方法的研究[D]. 天津: 天津大学硕士论文, 2004
- 11 Dai Hongjun, Su Xianyu. Shape measurement by digital speckle temporal sequence correlation method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(10): 1208~1213
- 代红军, 苏显渝. 数字散斑时间序列相关三维面形测量方法[J]. 光学学报, 2001, **21**(10): 1208~1213
- 12 H. J. Dai, X. Y. Su. Shape measurement by digital speckle temporal sequence correlation with digital light projector[J]. *Opt. Eng.*, 2001, **40**(5): 793~800
- 13 Jin Guanchang, Meng Libo, Chen Junda *et al.*. The progress and application of digital speckle correlation method [J]. *J. Experimental Mechanics*, 2006, **21**(6): 689~702
- 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
- 14 Sun Yiling, Li Shanxiang, Li Jingzhen. Investigation and modification of the digital speckle correlation method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(1): 54~57
- 孙一翎, 李善祥, 李景镇. 数字散斑相关测量方法的研究与改进[J]. 光子学报, 2001, **30**(1): 54~57
- 15 Yan Haitao, Wang Ming. Orientation of mouse using digital speckle correlation method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 467~471
- 闫海涛, 王 鸣. 数字散斑相关方法实现鼠标定位原理[J]. 光学学报, 2008, **28**(3): 467~471