

基于灰度约束的三维数字散斑整像素相关搜索

何进英, 刘晓利*, 彭翔, 李阿蒙, 蔡泽伟

深圳大学光电工程学院教育部广东省光电子器件与系统重点实验室, 深圳 518060

摘要 在三维数字散斑整像素相关搜索中,先利用极线约束和投影校正原理将相关搜索范围从整个图像约束到投影校正后的同一水平极线上,再利用视差约束缩小搜索范围,该相关搜索过程非常耗时。在投影校正和视差约束的基础上,提出了基于灰度约束的三维数字散斑整像素相关搜索方法,该方法可进一步滤除视差范围内大部分的待匹配点。当有效点个数为85783、相关窗口大小为 $9\text{ pixel}\times 9\text{ pixel}$ 时,相关搜索时间由7.24 s缩短为2.15 s。实验结果表明,所提方法能有效提高三维数字散斑整像素相关搜索效率。

关键词 测量; 三维数字散斑; 相关搜索; 投影校正; 灰度约束

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0404003

Integer Pixel Correlation Searching for Three-Dimensional Digital Speckle Based on Gray Constraint

He Jinying, Liu Xiaoli, Peng Xiang, Li A'meng, Cai Zewei

Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

Abstract In the integer pixel correction searching for three-dimensional digital speckle, the epipolar constraint and the projective rectification principle are used to constrain the correlation searching range from the whole image to the same horizontal line after projection rectification, and then the disparity constraint is used to reduce the searching scope. The correlation searching process is time-consuming. A novel integer pixel correlation searching method for three-dimensional digital speckle based on gray constraint is proposed, which is based on projective rectification and disparity constraint. The proposed method can remove most of the candidate matching points in parallax scope. When the number of valid points is 85783, the size of the correlation window is $9\text{ pixel}\times 9\text{ pixel}$, and the correlation searching time is reduced from 7.24 s to 2.15 s. Experimental results show that the efficiency of integer pixel correction searching for three-dimensional digital speckle can be improved greatly.

Key words measurement; three-dimensional digital speckle; correlation search; projective rectification; gray constraint

OCIS codes 120.6650; 110.6150

1 引言

数字散斑相关搜索方法是由 Yamaguchi^[1]和 Peters 等^[2]分别独立提出的,其基本原理是利用区域灰度相似性搜索对应点,从而实现物体位移和变形的测量。经典的数字散斑相关搜索方法有双参数法^[3]、粗细搜索法^[4]和十字搜索法^[5]等。传统的数字散斑相关搜索方法只能测量面内位移,只适用于二维变形场的测量。三维数字散斑相关方法将立体视觉技术与数字散斑相关搜索方法相结合^[6],可用于三维物体的轮廓测量和变形测量。国内有研究人员将三维数字散斑相关搜索方法应用在动态物体形变测量和三维形貌绝对测量

收稿日期: 2016-11-10; 收到修改稿日期: 2016-12-29

作者简介: 何进英(1989—),男,硕士研究生,主要从事三维成像方面的研究。E-mail: 114227844@qq.com

导师简介: 彭翔(1955—),男,博士,教授,主要从事三维数字成像及造型、光学信息安全方面的研究。

E-mail: xpeng@szu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: lxl@szu.edu.cn

中^[7-8],该方法的测量过程为:先利用数字散斑相关搜索方法寻找整像素级的对应点,在此基础上用亚像素优化方法得到更精确的亚像素对应点位置,然后利用双目立体视觉重建得到物体的三维坐标。在整像素相关搜索时,需要对每个待匹配点进行相关函数的计算比较,再选取最大相关系数作为对应点,此过程计算量庞大,非常耗时。因此,缩短整像素相关搜索的时间是非常重要的。三维数字散斑相关搜索方法在进行整像素对应点相关搜索时,通常利用双目立体视觉的极线约束^[9]将相关搜索从二维约束到一维,即将对应点的搜索限制在极线上而非整个图像上,从而提高搜索效率。由于原始极线是倾斜的,不便于相关搜索,而利用投影校正可使对应点都位于同一水平线上,为整像素相关搜索提供了极大的便利。在此基础上,加入视差约束可以进一步缩小对应点的搜索范围。尽管利用了投影校正和视差约束,仍然需要计算视差范围内每一个待匹配点的相关系数,因此相关搜索过程依旧非常耗时。

本文在投影校正和视差约束的基础上,根据对应点的灰度值相近这一特性,提出了基于灰度约束的三维数字散斑整像素相关搜索方法。所提方法通过判断待匹配点与测量点之间灰度值之差的绝对值,来剔除诸多无需进行相关运算的待匹配点,从而减小运算量,缩短了相关搜索时间。

2 三维数字散斑整像素相关搜索原理

2.1 数字散斑相关搜索方法

数字散斑相关搜索方法的基本原理是利用左右相机同时拍摄物体,得到两幅散斑图像,以左相机获取的散斑图像(参考图像)上某个测量点区域的散斑灰度特征作为基准,根据相关系数在右相机获得的散斑图像(目标图像)中寻找与其最为相似(相关系数为最大值)的子窗口图像,此子窗口中心点即为左图像测量点的匹配点。对于相关系数的表示形式,文献[10]有详细描述。其中,最常用的归一化相关系数可表示为

$$C = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}][g(x'_i, y'_j) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [g(x'_i, y'_j) - \bar{g}]^2}} \quad (1)$$

式中 $f(x_i, y_j)$ 和 $g(x'_i, y'_j)$ 分别为参考图像和目标图像子窗口中相应位置的灰度值, \bar{f} 和 \bar{g} 分别为参考图像和目标图像子窗口的平均灰度值,子窗口的大小为 $m \times m$ 。

2.2 极线约束与投影校正

如图1所示, p_l, p_r 分别为空间同一点 p 在左图像平面 I_l 和右图像平面 I_r 上的投影,直线 l_l 为左图像平面 I_l 上对应于点 p_l 的极线,直线 l_r 为右图像 I_r 上对应于 p_r 点的极线。如果已知点 p_l 的位置,则其对应点 p_r 必然位于极线 l_r 上,反之亦然。图中 e_r, e_l 分别为图像中的右极点和左极点。

极线约束为三维数字散斑相关搜索提供了便利的条件,将二维搜索约束到一维。然而,由于极线之间彼此不平行并且是倾斜的,沿着这样的极线进行相关搜索仍然是非常耗时的,而且搜索计算过程受噪声的影响较大。Hartley^[11]提出了一种投影校正方法,校正前后的系统结构示意图如图2所示。经投影校正后的左右图像共轭极线位于同一水平线上,即对于左图像中的一点 p_l ,搜索其对应点 p_r 时只需沿着同一水平线进行即可,这一性质为相关搜索提供了极大的便利。图中 u_r, u_l 分别为右、左图像的横向坐标轴, v_r, v_l 分别为

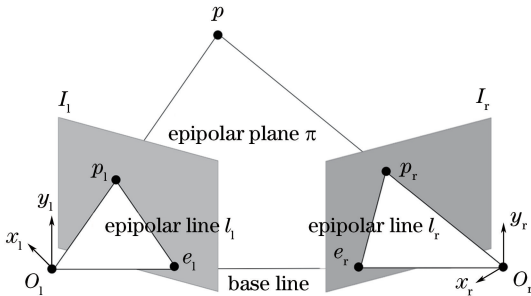


图1 双目立体视觉极线约束示意图

Fig. 1 Schematic of binocular stereo disparity epipolar constraint

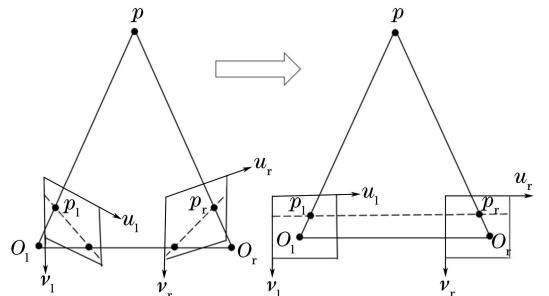


图2 投影校正结构变化示意图

Fig. 2 Schematic of structural change of projective rectification

右、左图像的纵向坐标轴。

2.3 视差约束

如图 3 所示,图像中的一点 p_1 对应的空间最近点 p_1 和最远点 p_2 在右相机水平极线上的投影点分别为 p_{r1} 和 p_{r2} ,由于 p_1 对应的物点一定位于物体深度范围(Z_{\min}, Z_{\max})内,即位于线段 $p_1 p_2$ 之间,故 p_1 在右相机的对应点一定位于线段 $p_{r1} p_{r2}$ 之间,这就是视差约束的原理。利用视差约束可以进一步缩小对应点的搜索范围。

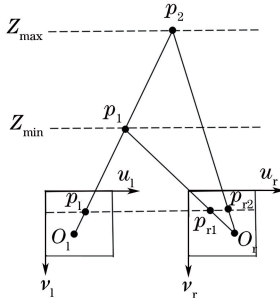


图 3 视差约束示意图

Fig. 3 Schematic of disparity constraint

2.4 基于灰度约束的相关搜索方法

三维数字散斑整像素相关搜索的基本步骤为:沿着投影校正后的极线进行相关函数运算并寻找对应点,同时利用视差约束缩小部分搜索范围,但每对一个待测量点进行整像素对应点搜索时,都需要计算视差约束范围内的每一个点的相关系数,整个搜索过程依旧非常耗时。

理论上,左右图像上对应点的灰度值是相同的,但由于左右相机的视角、光圈大小、曝光时间和噪声等因素不同,对应点之间的灰度值存在一定的差异。尽管如此,对应点之间的灰度值依旧非常接近。因此,可构建灰度约束条件,即:对于灰度值与测量点相差较大的待匹配点,可以排除其为对应点的可能性,无需计算相关系数。利用灰度约束条件,设定阈值 σ ,过滤掉大量无效待匹配点,忽略不必要的相关运算,从而提高相关搜索效率。图 4 为基于灰度约束的相关搜索方法的流程图。

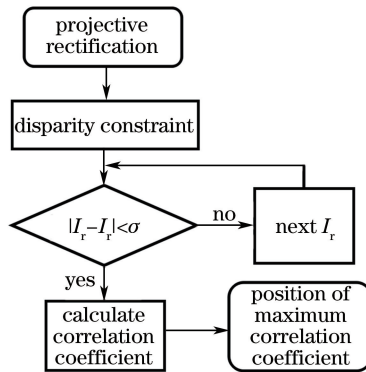


图 4 基于灰度约束的相关搜索方法的流程图

Fig. 4 Flow chart of correlation searching method based on gray constraint

3 实验结果与分析

依据上述原理,对一张白纸进行散斑三维重建实验,通过对比基于视差约束和灰度约束的两种整像素相关搜索方法的效率,得到所提方法可提高搜索效率的结论。

图 5(a)、(b)分别为经投影校正后的左、右散斑图像,其中的数字序号分别为随机选取的待测点及搜索到待测点的对应点。

对于每一个待匹配点, σ 设定为 20(所用图像皆为 8 位灰度图),沿着同一水平的视差约束范围搜索其整像素对应点,统计各个待测点在搜索过程中分别采用视差约束和灰度约束获取正确对应点所需的相关计算次数,结果如表 1 所示。

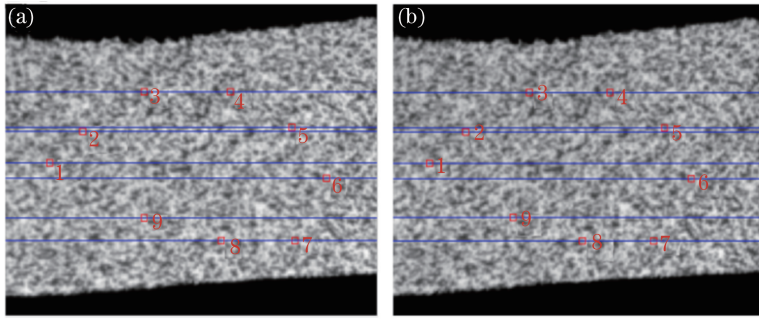


图 5 投影校正后的(a)左散斑图像和(b)右散斑图像

Fig. 5 (a) Left speckle image and (b) right speckle image after projective rectification

表 1 待测点相关计算次数对比

Table 1 Comparison of correlation calculation times of sampling point

Sampling point No.	Correlation calculation times	
	Disparity constraint	Gray constraint
1	340	81
2	340	54
3	340	110
4	340	104
5	340	119
6	340	120
7	340	110
8	340	143
9	340	68
Average value	340	101

由表 1 可知,利用灰度约束对每一个待测点进行相关计算的次数都比利用视差约束时要少,利用视差约束进行相关计算的平均计算次数为 340,而利用灰度约束进行相关计算的平均计算次数仅为 101,是利用视差约束进行相关计算的平均计算次数的 29.7%,约 70%的待匹配点因不满足灰度约束条件而跳过相关计算步骤。

对两种搜索方法完成所有有效点(85783 个)的整像素相关搜索所需的相关计算次数进行统计,利用视差约束时所需的总相关计算次数为 21234332,而利用灰度约束后所需相关计算的总相关计算次数减少到 6826044。可以看出,利用灰度约束完成所有有效点的整像素相关搜索所需的总相关计算次数为利用视差约束的 32.2%,与随机抽样 9 个点的统计结果非常接近。可以看出,视差范围内约 70%的待匹配点不满足灰度约束条件。

图 6 为两种相关搜索方法所用的搜索时间随相关窗口大小的变化。当相关窗口大小为 9 pixel×9 pixel

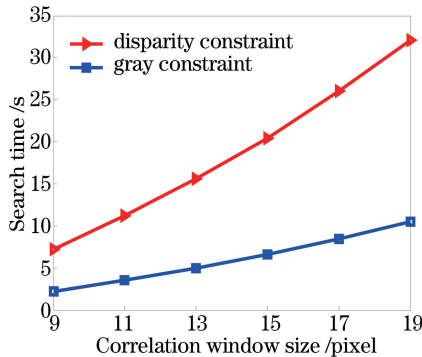


图 6 两种相关搜索方法所用的搜索时间随相关窗口大小的变化

Fig. 6 Relationship between searching time of two correlation search methods and correlation window size

时,在视差约束的基础上,利用灰度值约束,相关搜索时间由 7.24 s 缩短为 2.15 s,为只利用视差约束时的 29.7%,这是由于视差范围内约 70%的待匹配点不满足灰度约束条件,可以直接跳过,只有约 30%的待匹配点参与了相关系数的运算,故其搜索时间约为原来的 30%。从图 6 还可以看出,相关窗口越大,相关搜索时间越短,效率越高,这是因为相关窗口越大,参与运算的像素个数越多,计算相关系数所需的时间就越多,因此在利用灰度值约束过滤掉同样数量点的情况下,节省的时间就越多。

图 7 为采用两种搜索方法得到的三维重建结果。重建中亚像素优化均采用 Newton-Rapshon(N-R)迭代方法^[12],相关窗口大小选取 9 pixel×9 pixel。从图 7 中可以看出,两种方法的重建结果几乎一模一样,由于利用视差约束和灰度约束找到的像素级对应点是相同的,因此采用两种方法重建的结果相同。但灰度约束方法的搜索效率远高于视差约束方法。

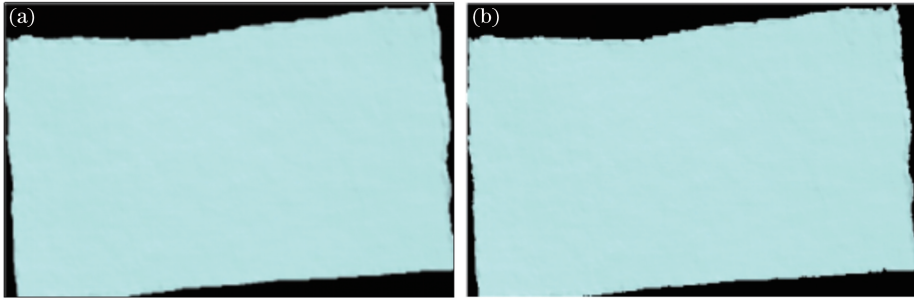


图 7 (a)采用视差约束的三维重建结果;(b)采用灰度约束的三维重建结果

Fig. 7 (a) Three-dimensional reconstruction result based on disparity constraint; (b) three-dimensional reconstruction result based on gray constraint

上述实验中,取 $\sigma = 20$ 。为了验证 σ 的稳健性,对脚型和风扇进行三维重建,得到的原始散斑图如图 8 所示。

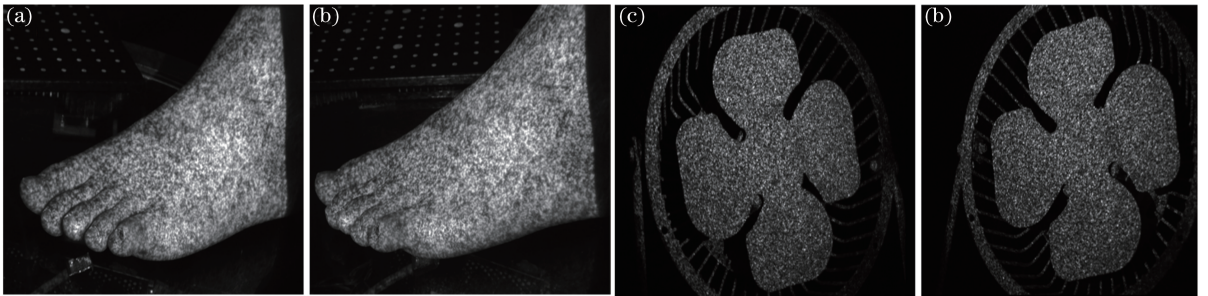


图 8 (a)脚型左相机原始散斑图;(b)脚型右相机原始散斑图;(c)风扇左相机原始散斑图;(d)风扇右相机原始散斑图

Fig. 8 (a) Original speckle pattern of foot obtained by left camera; (b) original speckle pattern of foot obtained by right camera; (c) original speckle pattern of fan obtained by left camera; (d) original speckle pattern of fan obtained by right camera

图 9、10 分别为脚型和风扇的三维重建结果,亚像素优化同样采用 N-R 迭代方法,相关窗口大小为 9 pixel×9 pixel。其中,脚型有效点的个数为 287403,搜索时间由 25.865 s 缩短为 8.207 s;风扇有效点的个数为 1.4×10^5 ,搜索时间由 13.508 s 缩短为 4.206 s。两者搜索时间均约为原来的 30%,与前面的分析结果一致,三维重建结果的一致性意味着采用两种搜索方法得到的整像素对应点是一致的。

上述 3 组实验中,在采集白纸的散斑图像时,两相机未加入硬件电信号同步,而脚型和风扇的散斑图像是用外部电信号触发同步采集获取的,实验中灰度阈值设为 20,均可搜索到正确的整像素对应点,表明该阈值具有一定的稳健性。原则上,两相机的参数(如光圈大小、曝光时间和同步性等)越接近,其对应点之间的灰度值就越接近,其灰度阈值可以设置的更低,这样过滤的待匹配点更多,能进一步提高搜索效率。

基于上述分析,逐步减小 σ ,统计脚型的整像素相关搜索时间随灰度约束阈值的变化,如图 11 所示。可以看出,基于灰度约束的整像素相关搜索时间随着灰度约束阈值的减小而缩短,且几乎呈线性变化。各个阈值条件下脚型和风扇的三维重建结果分别如图 12、13 所示。

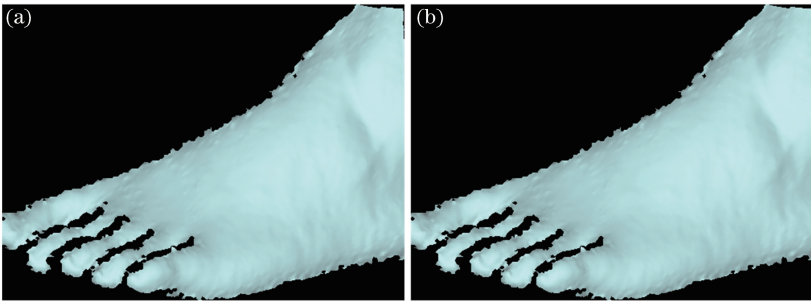


图 9 (a)基于视差约束的脚型三维重建结果;(b)基于灰度约束的脚型三维重建结果
Fig. 9 (a) Three-dimensional reconstruction result of foot based on disparity constraint;
(b) three-dimensional reconstruction result of foot based on gray constraint

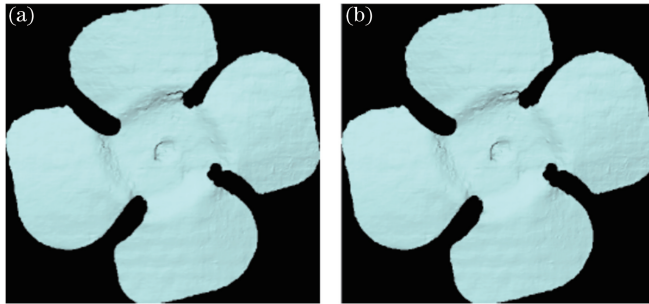


图 10 (a)基于视差约束的风扇三维重建结果;(b)基于灰度约束的风扇三维重建结果
Fig. 10 (a) Three-dimensional reconstruction result of fan based on disparity constraint;
(b) three-dimensional reconstruction result of fan based on gray constraint

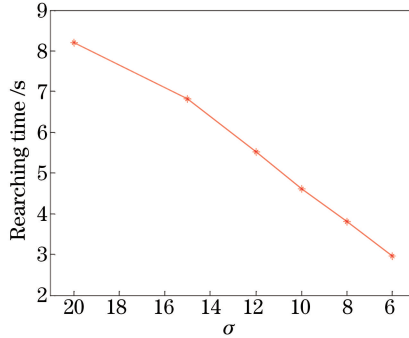


图 11 整像素相关搜索时间随灰度约束阈值的变化

Fig. 11 Relationship between correlation searching time of integer pixel and gray constraint threshold

从图 12(a)~(c)、图 13(a)~(c)中可以看出, σ 从 20 逐步减小到 12 时, 三维重建结果相同, 意味着当 $\sigma \geq 12$ 时搜索到的整像素对应点是一致的; 从图 12(d)~(f)、图 13(d)~(f)中可以看出, $\sigma < 12$ 时开始出现小部分的数据缺失, $\sigma = 6$ 时出现大面积的数据缺失。说明当 $\sigma < 12$ 时, 由于阈值过小, 部分待测点搜索不到对应点或者搜索到错误的对应点, 表现为重建的三维结果不完整。阈值越小, 数据的缺失就越严重。当 $\sigma = 12$ 时, 脚型搜索时间缩短为 5.516 s, 约为原搜索时间的 21%, 搜索效率提高了约 4 倍。

从上述分析可知, 在搜索整像素对应点时, 对于非电信号同步采集获取的散斑图像, 可将灰度约束阈值设置为 20; 对于电信号同步采集获取的散斑图像, 可将灰度约束阈值设置为 12, 进一步提高了搜索效率。在基于数字散斑相关三维重建中, 应使两相机的光圈和曝光时间保持一致, 并尽量采用同步触发采集散斑图像, 这样才能保证左右散斑图像的灰度尽可能一致, 不仅有利于提高整像素的搜索效率, 也有利于提高亚像素插值的准确性。

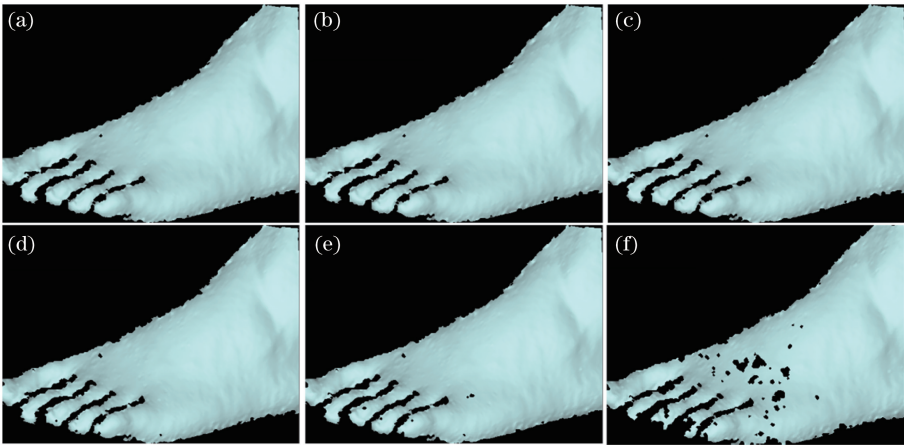


图 12 基于不同灰度约束阈值的脚型三维重建结果。(a) $\sigma=20$; (b) $\sigma=15$;
(c) $\sigma=12$; (d) $\sigma=10$; (e) $\sigma=8$; (f) $\sigma=6$

Fig. 12 Three-dimensional reconstruction results of foot based on different gray constraint thresholds.

(a) $\sigma=20$; (b) $\sigma=15$; (c) $\sigma=12$; (d) $\sigma=10$; (e) $\sigma=8$; (f) $\sigma=6$

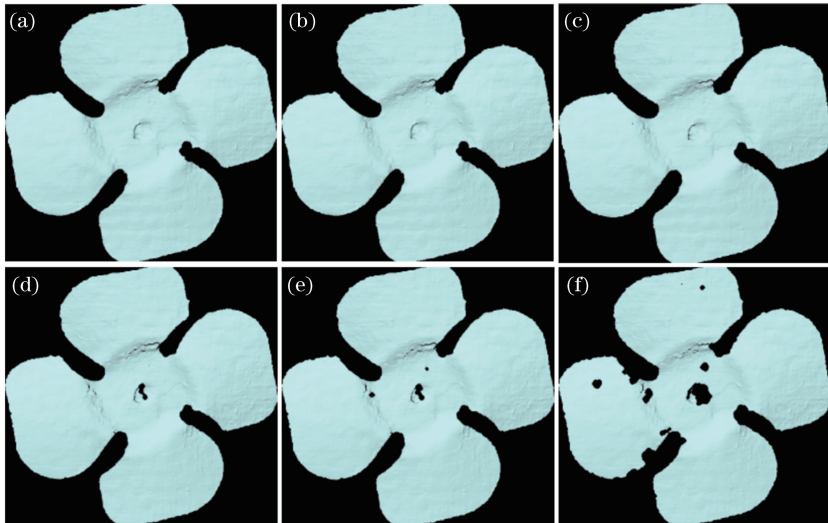


图 13 基于不同灰度约束阈值的风扇三维重建结果。(a) $\sigma=20$; (b) $\sigma=15$; (c) $\sigma=12$; (d) $\sigma=10$; (e) $\sigma=8$; (f) $\sigma=6$

Fig. 13 Three-dimensional reconstruction results of fan based on different gray constraint thresholds.

(a) $\sigma=20$; (b) $\sigma=15$; (c) $\sigma=12$; (d) $\sigma=10$; (e) $\sigma=8$; (f) $\sigma=6$

4 结 论

在投影校正和视差约束的基础上,根据对应点的灰度值相近这一特性,提出了基于灰度约束的三维数字散斑整像素相关搜索方法。所提方法通过判断待匹配点与测量点之间灰度值之差的绝对值来剔除大量的待匹配点,从而减小相关运算量,并缩短了搜索时间。将灰度约束阈值设为 20 时,视差范围内约 70% 的待匹配点被成功剔除,搜索时间约为只利用视差约束的 30%,搜索效率提高了约 2 倍。对于电信号同步触发采集获取的散斑图像,可进一步将灰度约束阈值减小为 12,搜索时间约为只利用视差约束的 21%,搜索效率提高了约 4 倍。实验中的相关窗口大小为 $9 \text{ pixel} \times 9 \text{ pixel}$ 时,相关搜索时间由 7.24 s 缩短为 2.15 s;当相关窗口大小为 $19 \text{ pixel} \times 19 \text{ pixel}$ 时,相关搜索时间由 32.13 s 缩短为 10.49 s。所提方法可有效提高三维数字散斑整像素相关搜索效率,而且搜索效率随着相关窗口的增大而提高。

参 考 文 献

[1] Yamaguchi I. Speckle displacement and decorrelation in the diffraction and image fields for small object deformation[J].

- Optica Acta: International Journal of Optics, 1981, 28(10): 1359-1376.
- [2] Peters W H, Ranson W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis[J]. Optical Engineering, 1982, 21(3): 213427.
- [3] Jin Guanchang. Computer aided optical measurement[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997: 143-174.
金观昌. 计算机辅助光学测量[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997: 143-174.
- [4] Chu T C, Ranson W F, Sutton M A. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics [J]. Experimental Mechanics, 1985, 25(3): 232-244.
- [5] Rui Jiabai, Jin Guanchang, Xu Bingye. A new digital speckle correlation method and its application[J]. Acta Mechanica Sinica, 1994, 26(5): 599-607.
芮嘉白, 金观昌, 徐秉业. 一种新的数字散斑相关方法及其应用[J]. 力学学报, 1994, 26(5): 599-607.
- [6] Chao Y J, Sutton M A, Perters W H, *et al.* Measurement of three-dimensional displacements in deformable bodies by digital image processing[C]. 1989 SEM Spring Conference on Experimental Mechanics, 1989: 139-146.
- [7] Zhao Ran, Sun Ping. A new method for deformation phase measurement by speckle correlation theory[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(6): 0612004.
赵冉, 孙平. 一种基于散斑相关理论测量变形相位的新方法[J]. 光学学报, 2016, 36(6): 0612004.
- [8] Zhao Minglu, Ma Xiao, Zhang Zibang, *et al.* Three-dimensional shape absolute measurement based on laser speckles [J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(2): 0208001.
赵明路, 马骁, 张子邦, 等. 激光散斑三维形貌绝对测量技术[J]. 中国激光, 2016, 43(2): 0208001.
- [9] Ma Songde, Zhang Zhengyou. Computer vision - computing theory and algorithm[M]. Beijing: Science Press, 1988.
马颂德, 张正友. 计算机视觉—计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [10] Chen Hua. Visual distortion measurement technology research based on digital speckle correlation method[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
陈华. 基于数字散斑相关方法的视觉变形测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [11] Hartley R I. Theory and practice of projective rectification[J]. International Journal of Computer Vision, 1999, 35(2): 115-127.
- [12] 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.