

采用改进 KLT 算法的标志点匹配方法

于之靖¹, 马凯², 王志军¹, 吴军^{2*}

¹中国民航大学电子信息与自动化学院, 天津 300300;

²中国民航大学航空工程学院, 天津 300300

摘要 在散斑视觉测量中,通常引入标志点以提高散斑的测量效率。针对传统标志点匹配过程中存在的匹配时间长、匹配准确率低等问题,提出了一种采用改进 KLT(Kanade-Lucas-Tomasi)算法的标志点匹配方法。该方法在利用改进加速稳健性特征(SURF)算法对标志点进行检测以建立初始匹配点的基础上,采用改进的 KLT 算法实现标志点的匹配,并利用最大双向误差作为约束条件删除匹配过程中存在的误匹配点,以提高匹配的可靠性。最后,对机翼颤振测量中涂敷在机翼模型散斑区的标志点进行了匹配实验验证。结果表明,与传统的尺度不变特征转换(SIFT)与 SURF 匹配算法相比,所提方法在匹配时间上分别减少了 75.9%和 42.8%,在匹配准确率上分别提高了 30.6%和 22.2%。

关键词 相干光学; 散斑测量; 标志点匹配; 改进加速稳健性特征算法; 改进 Kanade-Lucas-Tomasi 算法; 最大双向误差

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.020301

Marker Matching Method with Improved KLT Algorithm

Yu Zhijing¹, Ma Kai², Wang Zhijun¹, Wu Jun²

¹College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

²College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract In speckle vision measurement, markers are usually used to improve the measurement efficiency. To overcome long matching time and low matching accuracy in traditional marker matching process, we propose a new method for marker matching by using improved Kanade-Lucas-Tomasi (KLT) algorithm. Firstly, we measure the marker to establish initial matching point based on the improved speeded up robust feature (SURF) algorithm. Secondly, we use the improved KLT algorithm to achieve the marker matching. Thirdly, we use the constraint condition based on max bidirectional error to delete the mismatched points and improve the reliability of maker matching. Finally, we make a matched experiment to verify the marker coated on the speckle region of the wing model during the wing flutter measuring. The results show that, compared with traditional scale-invariant feature transform (SIFT) and SURF matching methods, the proposed method reduces the matching time by 75.9% and 42.8%, and improves the matching accuracy by 30.6% and 22.2%, respectively.

Key words coherence optics; speckle measurement; marker matching; improved speeded up robust feature algorithm; improved Kanade-Lucas-Tomasi algorithm; max bidirectional error

OCIS codes 030.6140; 030.6610; 100.4550

收稿日期: 2017-07-15; 收到修改稿日期: 2017-08-16

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合项目(U1533111)、中央高校基本科研业务费项目中国民航大学专项(3122017033)

作者简介: 于之靖(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事计算机视觉测量及自动检测技术方面的研究。

E-mail: hit_yu@126.com

* 通信联系人。E-mail: j_wu@cauc.edu.cn

1 引言

机翼变形及颤振特性是影响飞机性能和安全的因素,也是气动弹性变形分析与适航认证的重要测试内容之一^[1]。近年来,基于散斑图像相关技术的动态测量方法以其非接触、散斑可连续涂敷等优势,得到了迅速发展,并广泛应用于工程中^[2]。散斑匹配作为散斑图像相关技术中的关键环节,目的是建立散斑图像中散斑网格单元特征点之间的对应关系。但在实际测量过程中,同一散斑网格单元特征对相机基站位置及光照变化敏感,导致网格单元不能被正确识别与匹配,进而影响散斑测量效率,因此通常在散斑图像中加入具有明显特征的标志点来提高散斑测量效率^[3]。

传统的标志点匹配方法多为基于区域灰度的匹配方法和基于特征的匹配方法。其中,基于区域灰度的匹配方法在测量范围较大时存在时间复杂度高、计算效率低等不足。基于特征的匹配方法具有匹配速度快、匹配精度高以及对光照、噪声等适应能力强等优点,已得到广泛应用^[4-5],其匹配过程主要分为以下两个步骤:

1) 特征点的提取。Lowe^[6]提出了局部特征描述子尺度不变特征转换(SIFT),其对尺度变换及旋转具有不变性,但计算数据量大、时间复杂度高。Rublee等^[7]提出了快速特征点提取和描述算法,在

保证尺度、旋转不变的基础上,提高了运算速度,但对复杂图像特征点的检测效果有待改善。

2) 特征点的描述和匹配。针对基础匹配方法SIFT存在的问题开展研究,Ke等^[8]提出用主成分分析(PCA)方法对特征描述进行数据降维处理,但在没有任何先验知识的情况下,反而增加了计算量。Delponte等^[9]提出用奇异值分解方法进行特征匹配,但匹配过程复杂,且不能用于宽基线匹配。

针对上述匹配过程中存在的匹配时间长、匹配过程复杂等问题,借鉴视频帧间处理过程中的目标跟踪方法,将KLT(Kanade-Lucas-Tomasi)算法引入到标志点的匹配中。在分析其可行性的基础上,本文提出了一种采用改进KLT算法的标志点匹配方法,并应用最大双向误差(MBE)作为约束条件,删除匹配过程中存在的误匹配点,实现了标志点的准确高效匹配。

2 标志点提取方法

为了实现散斑的精确测量,一般在散斑表面粘贴具有显著特征的人工标志点,标志点示意图如图1所示,标志点多采用回光反射材料制成,目的是增大与背景图像之间的对比度,使其具有良好的识别性,进而实现标志点的自动检测与匹配。通过对标志点的识别与匹配,即可实现机翼的变形测量以及颤振特性的测试^[10-11]。

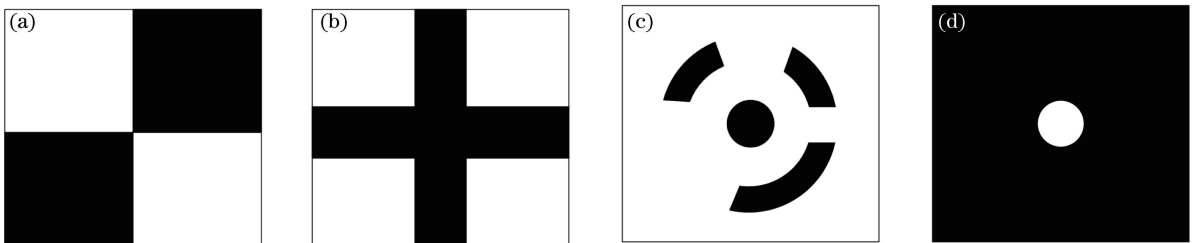


图1 标志点示意图。(a)对角标志点;(b)十字标志点;(c)编码标志点;(d)圆形标志点

Fig. 1 Schematic of markers. (a) Diagonal marker; (b) cross marker; (c) coded marker; (d) circular marker

相较于对角标志点、十字标志点以及研究应用较多的编码标志点,圆形标志点具有以下特点:1)简单易识别、识别速度快;2)对图像质量的要求较低;3)占用空间小,更适合散斑测量的要求。因此,采用圆形标志点(以下简称为标志点)作为散斑测量研究所用的标志点。

Juan等^[12]比较了SIFT、PCA-SIFT以及加速稳健性特征(SURF)三种常用的特征提取算法,并证明了在考虑时间、光照等影响因素的前提下,SURF算法表现最优;此外,Valgren等^[13]通过实验证明,在保证提取精度的前提下,SURF算法较

SIFT算法的效果更好。因此,选择SURF算法作为标志点的提取算法。使用传统SURF算法对标志点进行提取时,经尺度空间提取后存在大量无效的特征点,对应的散斑图像如图2所示。

图2检测出的冗余特征点会增加处理的复杂度并降低匹配效率。为了提高后续匹配的准确性,有必要对SURF算法进行改进。经观察可以发现,标志点有很强的边缘结构,因此基于该特点提出了一种边缘约束检测法,使特征点的检测只在显著的边缘区域进行。具体步骤为:

1) 获得原图像产生的每组高斯差分金字塔

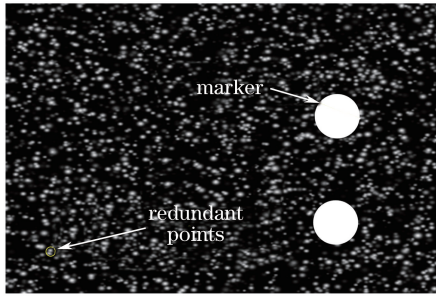


图2 散斑图像

Fig. 2 Speckle image

(DOG)的第一层图像;

2) 对该差分图像进行基于最大类间方差法(Otsu)的自适应阈值分割,得到二值图;

3) 将二值图作为特征点检测时的约束条件,使SURF检测只在边缘区域内部进行。

Otsu基于图像的灰度特征进行阈值选取,计算复杂度低且受环境中亮度和对比度的影响较小,经过上述步骤即可完成对标志点的提取。

3 改进的标志点匹配方法

利用改进SURF算法所提取出的标志点仅可得到其位置和角点的响应值。如果采用距离准则进行匹配,则需要求取标志点的SURF特征描述子^[14]。该过程非常耗时且对计算机的硬件要求比较高,不适合应用在动态散斑测量中,鉴于此,采用KLT算法对标志点进行匹配。

3.1 KLT算法在标志点匹配中的可行性

KLT算法是一种基于最优估计的跟踪算法^[15],在视频帧间目标跟踪中应用较多。但是,到目前为止,KLT算法还未直接应用于散斑测量标志点匹配领域。该算法基于以下三个假设:1)亮度恒定;2)时间连续或标志点运动是“小运动”;3)空间一致。

对比分析散斑测量双目成像系统与视频帧间目标跟踪过程,并建立其示意图。双目立体视觉测量系统和标志点跟踪示意图如图3所示。

图3(a)为散斑测量双目成像系统的示意图, P 为标志点, P_l, P_r 分别为 P 在左、右相机中的成像, O_l, O_r 分别为左、右相机的光心位置。 R, T 为右相机相对于左相机的旋转矩阵和平移矩阵。图3(b)为标志点跟踪示意图。分析可知,标志点在双目相机中的成像点 P_l 和 P_r 可以看作是相邻帧间标志点在空间“移动后”的投影,因此将KLT算法应用于标志点的匹配中是可行的。进一步分析可得,双目立体视觉测量系统满足KLT算法的假设条件,

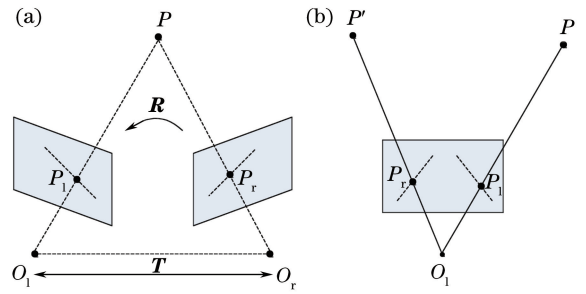


图3 (a)双目立体视觉测量系统;(b)标志点跟踪示意图

Fig. 3 (a) Binocular stereoscopic vision measurement system; (b) schematic of marker tracking

理由如下:1)双目相机可实现同步拍摄,左右两幅图像灰度分布基本相同,即满足假设1);2)为了保证成像质量及图像的重叠区域,在图像采集过程中双目相机的基线距离及夹角不会太大,间接保证了标志点运动不会过大;3)标志点是涂敷在机翼上的,可以保证相邻标志点具有相似的运动。

3.2 标志点匹配KLT数学模型建立

在双目立体视觉成像系统中,右图像的标志点可以看作是左图像标志点经过仿射变换得到的,仿射变换可表示为^[16-17]

$$x' = (E + D)x + d, \quad (1)$$

式中 $D = \begin{bmatrix} d_{xx} & d_{xy} \\ d_{yx} & d_{yy} \end{bmatrix}$ 为变形矩阵, d 为特征窗口中心的平移矩阵, x', x 均为2维向量, E 为单位矩阵。定义 x 为左相机标志点的非齐次坐标, x' 为 x 在右相机成像中对应匹配点的非齐次坐标。

给定图像I和图像J及图像I的特征窗口 w ,KLT算法能找到使评价函数 ϵ 最小化时的变形矩阵 D 和特征窗口中心的平移矩阵 d ,则有

$$\epsilon = \iint_w \{J[(E + D)x + d] - I(x)\}^2 w(x) dx, \quad (2)$$

式中 $w(x)$ 为加权函数,可采用高斯分布函数以突出窗口中心区域的作用; $J(\cdot)$ 为图像J的灰度分布; $I(\cdot)$ 为图像I的灰度分布。通常情况下, d 与 x 相比是可以忽略的小量,因此可以对 $J[(E + D)x + d]$ 进行泰勒级数展开,并只截取线性项,再根据(2)式对 d 进行求导,经整理化简可以得到

$$\begin{aligned} \iint_w g(g^T u) w(x) dx &= \iint_w [I(x) - J(x)] g w(x) dx \\ \iint_w g x^T (g^T x) w(x) dx &= \iint_w [I(x) - J(x)] g x^T w(x) dx \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $\mathbf{u} = \mathbf{D}\mathbf{x} + \mathbf{d}$, $\mathbf{g} = \left(\frac{\partial J}{\partial x} \quad \frac{\partial J}{\partial y} \right)^T$, 其中 $\frac{\partial J}{\partial x}$ 和 $\frac{\partial J}{\partial y}$ 分别为图像 x 、 y 方向的梯度模值。对于左右相机采集的标志点图像, 迭代求解可得到变形矩阵 \mathbf{D} 和特征窗口中心的平移矩阵 \mathbf{d} 。代回(1)式, 即可求得左相机标志点非齐次坐标 x 在右相机图像中匹配点的非齐次坐标 x' , 进而完成标志点的匹配。

3.3 改进 KLT 算法

上述 KLT 算法假设特征窗口内的运动小而连贯, 然而双目相机的基线距离或双相机夹角过大会导致左右相机图像中标志点的位移较大, 进而影响匹配过程, 因此需要使用较大的窗口来满足位移要求, 但大窗口往往会违背 KLT 算法中运动连贯的假设, 因此需要借助图像金字塔完成对 KLT 算法的改进^[18]。改进的 KLT 算法示意图如图 4 所示, 图中 I 和 J 为双目相机采集的标志点图像。

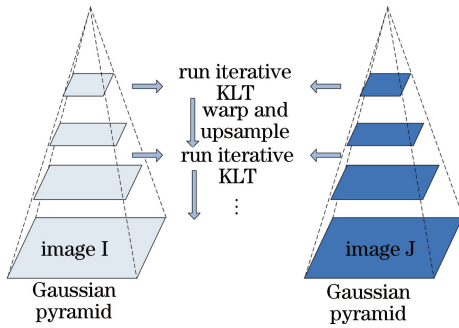


图 4 改进 KLT 算法的示意图

Fig. 4 Schematic of improved KLT algorithm

进行标志点匹配时, 先在图像金字塔的最高层计算光流, 再将得到的运动估计结果作为下一层金字塔的起始点, 反复迭代直至金字塔的最底层, 将不满足小而连贯运动假设的可能性降到最低, 实现对更快、更长的运动跟踪, 进而完成两幅图像中对应标志点的匹配。

3.4 基于 MBE 的误匹配删除方法

在匹配过程中, 光线变化、双目相机的外部方位等因素会影响采集图像的质量, 进而导致误匹配, 因此需要建立标志点误匹配删除方法。蔡佳等^[19]提出了一种基于统计的误匹配删除方法, 但这种方法依赖模型建立的准确性。谢凡等^[20]提出了一种利用随机采样一致性算法以及外极线约束进行匹配点筛选的方法, 但该方法需要估计基础矩阵并建立极线误差搜索带, 算法复杂度较高。基于此, 采用 MBE 作为标志点的约束条件^[21], 对误匹配点进行有针对性的删除, 误匹配点删除原理如图 5 所示。

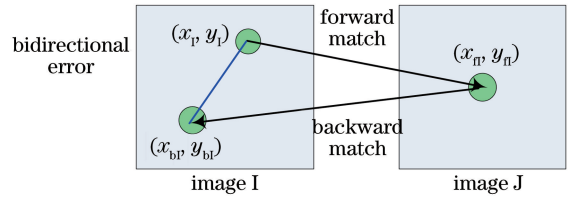


图 5 误匹配点删除原理

Fig. 5 Removal principle of mismatch marker

双目相机采集到的两幅标志点图像为图像 I 和图像 J, 且 (x_1, y_1) 为图像 I 上的标志点, (x_n, y_n) 为采用改进 KLT 算法正向匹配得到的图像 J 中的匹配标志点, (x_{bi}, y_{bi}) 为 (x_n, y_n) 逆向匹配得到的在图像 I 中的匹配标志点, 则定义 MBE 为

$$e_{MBE} = \| (x_1, y_1) - (x_{bi}, y_{bi}) \| \quad (4)$$

当 MBE 过大时即认为是误匹配点, 需要删除。因此, 通过 MBE 匹配策略可以删除初始匹配点集中的误匹配点, 进一步提高标志点匹配的可靠性。

4 实验验证

实验所采用的双目相机为加拿大 Point Grey 工业相机, 两台相机的镜头型号均为 FL3-GE-50S5M, CCD 型号为日本 Sony 公司生产的 Sony ICX655AL, 感光尺寸为 0.67", 分辨率为 2448 pixel \times 2048 pixel。被测机翼模型表面喷涂散斑, 并在散斑区随机涂敷 50 个标志点。实验装置如图 6 所示。

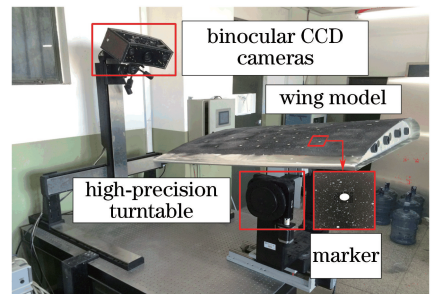


图 6 实验装置图

Fig. 6 Experimental setup

4.1 改进 SURF 算法有效性验证

对左相机采集到的机翼模型散斑区标志点进行检测, 标志点检测结果如图 7 所示。

从图 7(b)中可以看出, 利用传统 SURF 算法对原始标志点图像进行标志点检测时, 虽然能够识别标志点, 但同时也检测出了大量散斑干扰点。由图 7(c)可以看出, 改进的 SURF 算法利用 DOG 图像能有效检测出标志点的强边缘, 但同时也检测出一定的干扰点弱边缘。由图 7(d)可以看出, 采用 OTSU 自适应阈值分割法可得到标志点清晰的边

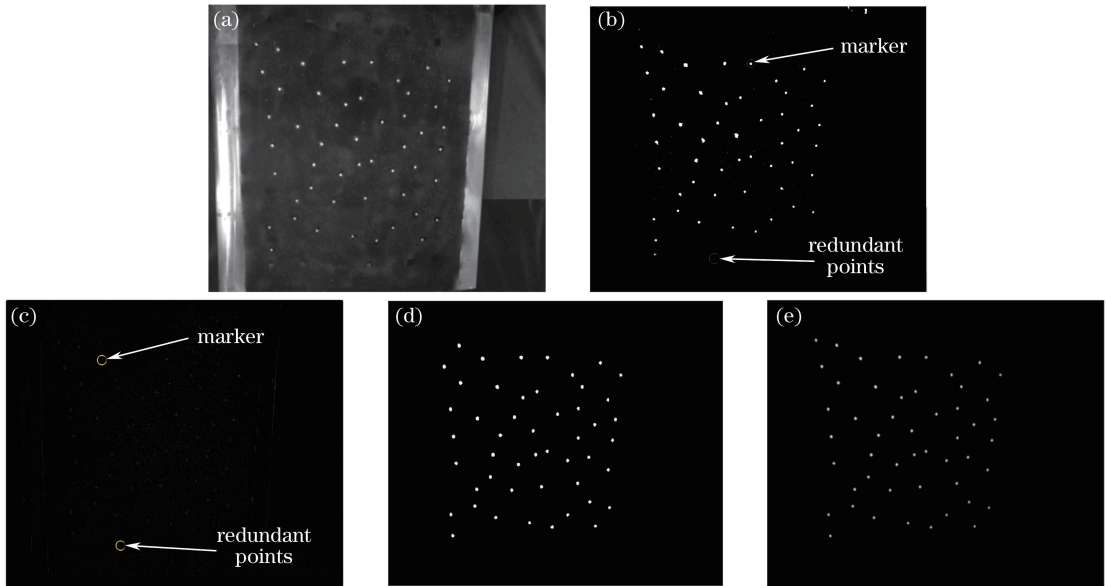


图7 标志点检测结果。(a)原始标志点图像;(b)传统 SURF 算法检测结果;(c)标志点 DOG 图像;(d) OTSU 分割图像;(e)改进的 SURF 算法检测结果

Fig. 7 Measurement results of markers. (a) Images of original markers; (b) measurement result of traditional SURF algorithm; (c) DOG image of markers; (d) OTSU segmentation image; (e) measurement result of improved SURF algorithm

缘结构。在此基础上,由图 7(e)可以看出,采用 SURF 算法检测出的标志点清晰可见。由此可以验证,改进的 SURF 算法能对标志点进行有效检测,在一定程度上保证了后续标志点的准确匹配。

4.2 改进 KLT 算法匹配验证

使用 KLT 算法对检测出的标志点进行跟踪匹配,得到的标志点匹配结果如图 8 所示。其中,红(绿)色表示左(右)相机成像,红(绿)点表示左(右)相机成像中的标志点。黄线表示对应标志点之间的匹配线。为便于观察,对图 8(a)中未匹配标志点颜色进行深化处理。

由图 8(a)可见,当采用未改进的 KLT 算法时,大部分标志点能正确匹配,但仍存在未匹配(区域 A、B、C)及误匹配(区域 D)标志点。图 8(b)为采用改进 KLT 算法得到的匹配图,从图中可以看出,区域 A、B 以及区域 C 的标志点都已正确匹配,但仍存在误匹配情况(区域 D)。图 8(c)为采用 MBE 作为约束条件(为保证匹配准确率,误差值设为 1 pixel)删除误匹配点后得到的标志点匹配图,此时区域 A、B、C 中的标志点均已识别并正确匹配,同时区域 D 存在的误匹配情况也得到了修正,此时的标志点均已正确匹配。

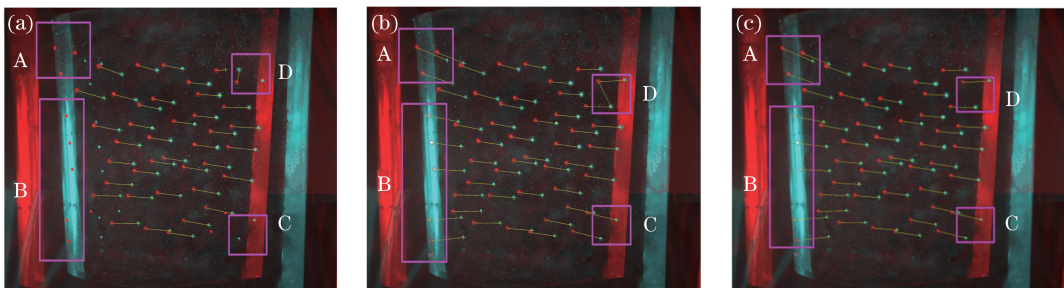


图8 标志点匹配图。(a)未改进 KLT 算法匹配图;(b)改进 KLT 算法匹配图;(c)删除误匹配后的匹配图

Fig. 8 Matching diagrams of markers. (a) Matching diagram using unimproved KLT algorithm; (b) matching diagram using improved KLT algorithm; (c) matching diagram when mismatching points are removed

4.3 匹配时间及准确率分析

为不失一般性,共进行 10 次实验,每次实验中,机翼在转台的带动下随机转动一定角度。从

匹配时间及匹配准确率方面对所提方法进行评价,同时引入传统的 SIFT、SURF 算法进行对比,其中,定义 SIFT、SURF 算法所需的匹配时间为生

成特征描述子并采用距离准则进行匹配所需的时间,同时定义匹配准确率的评价指标^[22] $P = N_{tp} / N_p$,其中 N_{tp} 为正确匹配点的个数, N_p 为标志点的个数,每次实验中 $N_p = 50$ 。10 次实验中,标志点匹配所需的匹配时间和匹配准确率如图 9(a)、

(b) 所示。

由图 9(a)、(b) 可知,与 SIFT 和 SURF 算法相比,所提方法在匹配时间上分别减少了 75.9% 和 42.8%,匹配准确率分别提高了 30.6% 和 22.2%。进一步验证了所提方法的有效性及其准确性。

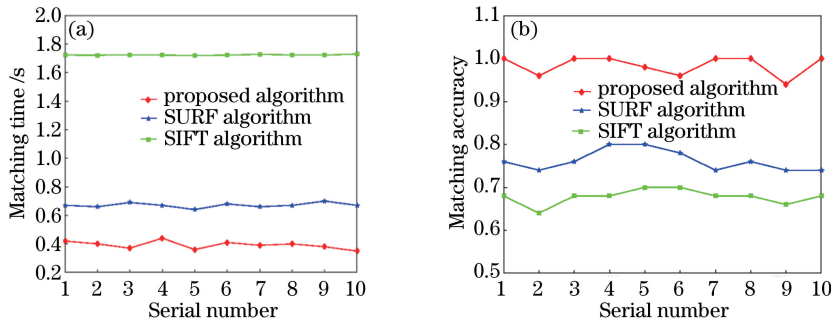


图 9 实验结果。(a)匹配时间;(b)匹配准确率

Fig. 9 Experimental results. (a) Matching time; (b) matching accuracy

5 结 论

针对散斑测量中标志点的匹配问题,提出了一种采用改进 KLT 算法的标志点匹配方法。该方法根据标志点的成像特征,利用边缘约束思想对 SURF 算法进行改进,实现了标志点的准确检测,在此基础上采用改进 KLT 算法实现了标志点的匹配,同时建立 MBE 误匹配删除机制,提高了标志点的匹配准确率。通过对机翼模型散斑区标志点进行匹配实验,验证了所提方法的有效性。结果表明,相较于传统 SIFT、SURF 算法,所提方法的匹配时间分别减少了 75.9% 和 42.8%,匹配准确率分别提高了 30.6% 和 22.2%,实现了标志点的快速、可靠匹配。该结论为后续的机翼变形散斑测量及颤振特性分析提供一定的理论基础。

参 考 文 献

- [1] Kehoe M W. A history overview of flight flutter testing [R]. California: NASA Technical Memorandum, 1995, 4720: 19960004074.
- [2] Peeters B, Hendricx W, Deblille J, *et al.* Modern solutions for ground vibration testing of large aircraft [J]. Sound and Vibration, 2009, 43(1): 732-742.
- [3] Zhang H Y, Chen C, Wang S B, *et al.* Application of 3D-DSCM in dynamic test on airplane wing's deformation [J]. Measurement & Control Technology, 2016, 35(7): 31-34.
张红颖, 陈晨, 王韶彬, 等. 三维散斑相关法在机翼变形动态测量中的应用 [J]. 测控技术, 2016, 35(7): 31-34.
- [4] Chen H. Study of vision deformation measurement technologies 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.
- [5] Li M J. Stereo matching based on a speckle-projected stereo vision system [D]. Chengdu: Sichuan University, 2005.
李梅菊. 基于投影数字散斑双目系统视觉的立体匹配 [D]. 成都: 四川大学, 2005.
- [6] Lowe D G. Object recognition from local scale-invariant features [C] // Proceedings of IEEE International Conference, 1999: 6365386. [7] Rublee E, Rabaud V, Konolige K, *et al.* ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF [C]. IEEE International Conference on Computer Vision, 2011: 12491177.
- [8] Ke Y, Sukthankar R. PCA-SIFT: A more distinctive representation for local image descriptors [C]. IEEE Proceedings of Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2004: 8161522.
- [9] Delponte E, Isgrò F, Odone F, *et al.* SVD-matching using SIFT features [J]. Graphical Models, 2006, 68(5): 415-431.
- [10] Zhang H Y, Yu Z J. Initial displacement estimation method for speckle image based on marker matching [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0303001.
张红颖, 于之靖. 基于标志点匹配的散斑图像变形初值估计法 [J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0303001.
- [11] Yu Z J, Wang S B. Improved PCA-SIFT algorithm for

- matching stereo system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(3): 031501.
- 于之靖, 王韶彬. 改进 PCA-SIFT 算法的立体匹配系统 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(3): 031501.
- [12] Juan L, Gwon O. A comparison of SIFT, PCA-SIFT and SURF [J]. *International Journal of Image Processing*, 2009, 3(4): 143-152.
- [13] Valgren C, Lilienthal A J. SIFT, SURF & seasons: Appearance-based long-term localization in outdoor environments [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2010, 58(2): 149-156.
- [14] Ding N N, Liu Y Y, Zhang Y, *et al.* Fast iamge registration based on SURF-DAISY algorithm and randomized kd trees [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2012, 23(7):1395-1402.
- 丁南南, 刘艳滢, 张叶, 等. 基于 SURF-DAISY 算法和随机 kd 树的快速图像配准 [J]. *光电子 • 激光*, 2012, 23(7): 1395-1402.
- [15] Teng F, Liang X H, He Z Y, *et al.* A registration method based on nature feature with KLT tracking algorithm for wearable computers [C]. 2008 IEEE International Conference on Cyberworlds, 2008: 10399772.
- [16] Guo Q D, Quan Y M, Yu G P, *et al.* Improved binocular calibration based on ICP algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12): 1215003.
- 郭清达, 全燕鸣, 于广平, 等. 基于 ICP 算法的双目标定改进方法研究 [J]. *光学学报*, 2016, 36(12): 1215003.
- [17] Li H, Lu J, Shi G H, *et al.* Tracking features in retinal images of adaptive optics confocal scanning laser ophthalmoscope using KLT-SIFT algorithm [J]. *Biomedical Optics Express*, 2010, 1(1): 31-40.
- [18] Wu X G, Luo L M. An improved method of optical flow estimation [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(1): 130-131.
- 吴新根, 罗立民. 一种改进的光流场计算方法 [J]. *电子学报*, 2000, 28(1): 130-131.
- [19] Cai J, Huang P F. Research of a real-time feature point tracking method based on the combination of improved SURF and P-KLT algorithm [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(5):1204-1214.
- 蔡佳, 黄攀峰. 基于改进 SURF 和 P-KLT 算法的特征点实时跟踪方法研究 [J]. *航空学报*, 2013, 34(5): 1204-1214.
- [20] Xie F, Qin S Y. Wide baseline stereo vision matching approach for monocular mobile robot based on SIFT [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(11): 2247-2252.
- 谢凡, 秦世引. 基于 SIFT 的单目移动机器人宽基线立体匹配 [J]. *仪器仪表学报*, 2008, 29(11): 2247-2252.
- [21] Kalal Z, Mikolajczyk K, Matas J. Forward-backward error: Automatic detection of tracking failures [C]. 20th IEEE International Conference on Pattern Recognition, 2010: 11580471.
- [22] Li Y L, Wang S J, Tian Q, *et al.* A survey of recent advances in visual feature detection [J]. *Neurocomputing*, 2015, 149(Part B): 736-751.