

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108408

基于预筛选和局部单应性的风电叶片图像匹配方法*

李梦帅 燕必希 董明利 孙鹏 刘其林

(北京信息科技大学光电测试技术北京市重点实验室 北京 100192)

摘要: 将动态摄影测量方法应用到风电叶片动态监测中,对于优化风电系统设计、保证系统安全可靠运行具有重要意义。图像特征点自动匹配是动态摄影测量系统中的关键技术,匹配方法的优劣直接影响最终的测量精度。在实际风电叶片动态摄影测量中,叶片运行时的摆振会加剧叶片的非平面性,使得直接采用极线或单应性匹配技术匹配双目图像特征变得更加困难,因此提出一种基于预筛选和局部单应性的双目图像匹配方法,可用于风电叶片平缓连续曲面测量场。首先,通过双目摄影测量系统获取叶片像点图,对左相机采集到的像点图通过极线约束筛选出各个点在右像面中的候选匹配点集;其次对当前待匹配点及其候选匹配点集中的每个点分别抽取一个以该点为中心的局部近平面区域并做相应组合;之后针对每一组近平面区域分别采用改进的随机抽样一致算法估计相应的最佳单应性矩阵模型;最后通过局部单应性变换及合理的误差阈值在多个候选点中确定当前待匹配点的最终匹配点。该方法已成功应用于风电叶片的摆振测量实验,像点匹配率不低于96%且匹配准确率不低于97%,能够满足实际风电叶片图像匹配精度的要求。

关键词: 风电叶片;图像匹配;极线约束;近平面;随机抽样一致;局部单应性

中图分类号: TH701;P235.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.20

Wind turbine blade image matching method based on
pre-screening and local homography

Li Mengshuai Yan Bixi Dong Mingli Sun Peng Liu Qilin

(Beijing Key Laboratory of Optoelectronic Test Technology, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: The application of dynamic photogrammetry to the dynamic monitoring of wind turbine blades is of great significance to optimize the design of wind power system and ensure the safe and reliable operation of the system. Automatic matching of image feature points is a key technology in dynamic photogrammetry system. The quality of matching method directly affects the final measurement accuracy. In the actual dynamic photogrammetry of wind turbine blades, the shimmy of the blades during operation will aggravate the non-planarity of the blades, which makes it more difficult to directly use the epipolar or homography matching technology to match the binocular image features. Therefore, a binocular image matching method based on pre-screening and local homography is proposed, which can be used in the measurement scene of wind turbine blades characterized by a smooth continuous surface. Firstly, the point images of the blade are obtained through the binocular photogrammetry system. For the point image captured by the left camera, the candidate matching point set of each point in the left image is filtered from the right point image through the epipolar constraint. Secondly, a local approximate plane region centered on this point is extracted for each point in the current point to be matched and its candidate matching points and all local approximate plane regions are combined accordingly. Then, for each group of approximate plane regions, the improved random sample consensus algorithm is used to estimate the corresponding optimal homography matrix model. Finally, the final point that matches the current point to be matched is determined in multiple candidate points through the local homography transformation and reasonable error threshold. This method has been successfully applied to the shimmy experiment of the wind turbine blade. The image point matching rate is not less than 96% and the matching accuracy is not less than 97%. The method can satisfy the requirements of actual wind turbine blade image matching for accuracy.

Keywords: wind turbine blades; image matching; epipolar constraint; approximate plane; random sample consensus; local homography

0 引言

风电作为一种极具潜力的清洁能源,是当前世界重要

的可持续和可再生能源之一^[1]。近年来,风电发展水平逐渐成为国家竞争力的标志,其中我国风电装机总量连续几年位居全球第一^[2]。迅猛增长的风电需求对风电设备提出

收稿日期:2021-11-20

* 基金项目:北京市教委科技计划重点项目(KZ201711232029)、北京信息科技大学促进内涵发展科研水平提高项目(2020KYNH223)资助

了更高的要求,需要设计效率更高、容量更大的风力发电机,叶片尺寸也便随之增大^[3]。叶片在实际运行过程中与空气阻力、发电机内电磁力、发电机组件之间会产生复杂的结构动力学相互作用,进而使得叶片成为整个发电机组最易受损的部件^[4-6]。因此,充分了解并有效监测叶片在运行状态下的摆振及变形等动态响应特性,对于优化风电机组的能量输出,保证系统的安全可靠运行,提高系统的使用寿命至关重要。

目前,国内外对于风电叶片运动特性的研究方法主要分为两类:接触式测量以及非接触式测量方法^[7-9]。以视觉测量为代表的非接触式风电叶片运行状态监测是近年发展起来的一种非常有前途的方法。视觉测量与接触式测量相比,具有如下优点:非接触、多目标点同时测量、高精度、测量范围广、可获得待测点的全面信息^[10]。因此将视觉测量方法应用到风电叶片动态监测中是相当可靠的。

在风电叶片双目动态摄影测量中,图像匹配是实现测点三维重建的关键环节。经研究发现,风电叶片双目图像匹配依然存在很多问题:叶片运行过程中的摆振,加剧了叶片表面人工标志点的非平面性,仿射变换、单应性变换等一些传统的平面图像匹配方法不再直接适用;场景中共极平面点和近极线干扰点又会导致极线误匹配,进而造成双目极线匹配准确率相对较低。因此需要寻求一种新的图像匹配方法解决上述问题。

目前,视觉图像匹配算法研究主要包含两类:灰度匹配算法和特征匹配算法^[11-13]。基于灰度的图像匹配算法虽然能够有效提高匹配准确率,但很容易受到光源的影响且匹配速度相对较慢,而基于特征的图像匹配算法对于对比度、光照和旋转变换等相对稳定,且匹配速度相对较快。工业摄影测量中一般借助高反光性能的人工标志点,采用基于特征的图像匹配方法来完成高精度匹配工作,如极线约束、单应性变换、仿射变换等匹配方法。近年来,研究者在传统方法基础上相继提出了多种改进的图像匹配方法:姚佳宝等^[14]在图像配准领域对随机抽样一致算法进行了改进并结合 L-M 算法求解单应性矩阵,提高了单应性匹配的准确率,但该方法只能解决平面或近平面图像匹配问题;刘其林等^[15]在小型风电叶片动态数据获取研究中借助编码点自匹配特征采用单应性变换完成叶片图像匹配,在叶片未发生显著形变时能够满足基本需求,但在实际大型风电叶片图像匹配中具有较低的匹配率;张培松等^[16]、王可等^[17]、孔祥思^[18]将随机抽样一致算法应用到基础矩阵求解中,虽然一定程度上提高了基础矩阵和极线的精度且适用于非平面图像匹配,但却无法解决共极平面点所带来的双目极线误匹配问题。

针对风电叶片动态摄影测量图像匹配难题,提出一种基于预筛选策略和局部单应性的双目图像匹配方法,并设计叶片摆振实验模拟叶片运行中的振动及变形状态。结果表明,该方法可以有效提高图像匹配精度,为后续叶片关键点三维重建及叶片运行状态分析提供可靠支持。

1 风电叶片图像匹配方法

风电叶片运行过程中垂直于旋转平面的振动是导致摄影测量图像匹配问题的主要因素。为了解决叶片动态测量过程中所存在的图像匹配问题,此处设计了局部近平面搜索算法,综合极线约束和单应性的优点并通过独特的方式将它们巧妙融合,提出一种基于预筛选和局部单应性的双目图像匹配方法:首先采用极线约束筛选出左像面中各像点在右像面中的候选匹配点集;其次针对当前待匹配点及其候选匹配点集中的每个点,分别抽取一个以该点为中心的局部近平面区域并将对应区域中的像点进行去中心存储;之后依次假定当前待匹配点所在近平面区域与其中一个候选点所在近平面区域为三维空间中的同一近平面,采用随机抽样一致(random sample consensus, RANSAC)算法估计相应的单应性矩阵模型;最后通过局部单应性变换及合理的误差阈值在多个候选点中确定当前待匹配点的最终匹配点。以包含风电叶片在内的平缓连续曲面测量场为应用背景,该方法充分利用极线约束的筛选作用,缩小了匹配点的搜索范围;以预筛选出的点为基础,设计局部近平面搜索算法,打破了单应性变换的使用局限性;改进 RANSAC 算法,提高了单应性矩阵模型求解精度和效率。两种传统匹配方法的融合可有效提高匹配率和匹配准确率。

1.1 极线约束确定候选匹配点

鉴于极线约束在摄影测量中的广泛适用性,针对左图中的每个普通标志点先采用极线约束筛选出其在右图中的候选匹配点组,即右图中离对应极线较近的一组点作为候选匹配点组。

极线约束又称对极几何约束,原理如图 1 所示。 Q 为空间一点, C 和 C' 分别为两个相机的光心,这 3 个点所构成的对极平面与两个相机的成像平面分别相交于左极线 l_l 和右极线 l_r 。 Q 在左像面和右像面上的像点分别为 q 和 q' , C 和 C' 的连线分别与左右像面相交于 e_1 和 e_2 。

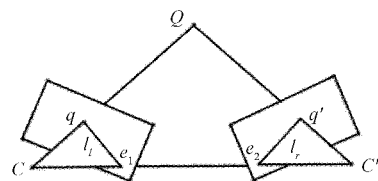


图 1 对极几何约束

像点 q 在另一像面上的匹配点 q' 位于 q 对应的极线 l_r 上,同理 q' 的匹配点在其对应极线 l_l 上。该原理可通过一个 3×3 且秩为 2 的基础矩阵 F 来表示^[19],设 q 和 q' 是左右两幅图像上的同名点齐次坐标,则有:

$$q'^T F q = 0 \quad (1)$$

其中, F 矩阵可通过两幅图像中部分已知匹配点集,

采用归一化8点法进行估计。按照基础矩阵的解析形式,式(1)可进一步分解为:

$$l_r = Fq \quad (2)$$

$$l_l = F^T q' \quad (3)$$

已知 F 矩阵,便可通过式(2)和(3)分别求解左像面中某一点对应在右像面的极线以及右像面中某一点对应在左像面的极线。此外,在极线约束中还存在着一种特殊情况,即三维空间中某一点存在与之共极平面的点,如图2所示。

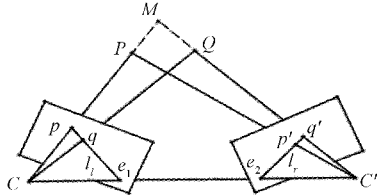


图2 对极几何约束中的共极平面情形

此时, P 和 Q 两点处于同一个对极平面 (M, C, C' 所在平面) 上, 它们在左像面中的像点 p 和 q 处于同一极线 l_l 上, 在右像面中的像点 p' 和 q' 处于同一极线 l_r 上。针对这种情况, 在求解左像面中点 p 在右像面所对应的匹配点 p' 时, 极线约束只能起到筛选作用, 却无法确定准确的匹配关系, 它是本文需要解决的问题之一。

以左像面中的点为基准, 通过式(2)确定左像面中的点在右像面中的极线。理论上, 左像面中某一点在右像面中所对应的匹配点会出现在该点所对应的极线上, 但实际匹配受到多种因素影响, 如像点提取精度和 F 矩阵的准确性等, 与该点相匹配的点往往只是出现在极线附近。因此, 可结合实际测量场景设定合适的点到极线的距离阈值, 进而确定左像面中某一像点在右像面中所对应的候选匹配点 (包含共极平面点), 最终通过局部单应性得到准确匹配点。

1.2 单应性变换理论

单应性变换可表示同一空间平面或近平面场景中的点在左相机和右相机上的像面坐标之间的变换关系, 如式(4)所示。

$$X_2 = HX_1 \quad (4)$$

其中, X_1, X_2 分别为空间某点在左、右相机上的像面坐标的齐次坐标形式, H 为单应性矩阵。设 λ_1 和 λ_2 为非零常数, x_1 和 x_2 为相应齐次坐标, 式(4)可进一步表示为:

$$\lambda_1 x_1 = X_1, \lambda_2 x_2 = X_2, \text{ 即 } \lambda_2 x_2 = H\lambda_1 x_1 \quad (5)$$

单应性矩阵 H 拥有8个自由度, 求解该矩阵至少需要4对已知匹配点^[20]。为了进一步计算单应性矩阵 H , 在齐次坐标系下有如下关系:

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \lambda_2 x_2 = H\lambda_1 x_1 \quad (6)$$

因为在非齐次坐标系中 $x_2' = x_2/z_2$ 且 $y_2' = y_2/z_2$, 由式(6)可得:

$$x_2' = \frac{h_{11}x_1 + h_{12}y_1 + h_{13}z_1}{h_{31}x_1 + h_{32}y_1 + h_{33}z_1} \quad (7)$$

$$y_2' = \frac{h_{21}x_1 + h_{22}y_1 + h_{23}z_1}{h_{31}x_1 + h_{32}y_1 + h_{33}z_1} \quad (8)$$

不失一般性, 令 $z_1 = 1$ 得:

$$x_2'(h_{31}x_1 + h_{32}y_1 + h_{33}) = h_{11}x_1 + h_{12}y_1 + h_{13} \quad (9)$$

$$y_2'(h_{31}x_1 + h_{32}y_1 + h_{33}) = h_{21}x_1 + h_{22}y_1 + h_{23} \quad (10)$$

整理得:

$$a_x^T h = 0 \quad (11)$$

$$a_y^T h = 0 \quad (12)$$

其中,

$$h = (h_{11}, h_{12}, h_{13}, h_{21}, h_{22}, h_{23}, h_{31}, h_{32}, h_{33})^T \quad (13)$$

$$a_x = (-x_1, -y_1, -1, 0, 0, 0, x_2'x_1, x_2'y_1, x_2')^T \quad (14)$$

$$a_y = (0, 0, 0, -x_1, -y_1, -1, y_2'x_1, y_2'y_1, y_2')^T \quad (15)$$

给定一组相互关联的点, 可构成如下线性方程:

$$Ah = 0 \quad (16)$$

其中,

$$A = \begin{pmatrix} a_{x1}^T \\ a_{y1}^T \\ \vdots \\ a_{xN}^T \\ a_{yN}^T \end{pmatrix} \quad (17)$$

最终可通过齐次线性最小二乘法求得 H 矩阵中全部元素。已知单应性矩阵得 H , 便可依据式(4)计算当前像面中某一待匹配点在另一像面中的理论匹配点, 通过各个点与理论点的距离偏差及合理的阈值确定最终的匹配点。

1.3 叶片局部近平面区域抽取

由于单应性匹配只适用于平面或近平面场景, 但整个测量对象又是非平面的, 因此对整个叶片像点图直接使用单应性变换并不可行。为了拓宽单应性适用范围, 充分利用单应性匹配结果具有唯一性的优点完成后续匹配工作, 寻找局部近平面是必要的。

此处提出一种创新性思路: 在极线约束预筛选基础上, 分别以左图中当前待匹配点及其在右图中所对应的候选匹配点组为中心抽取局部近平面区域, 为之后 RANSAC 求解局部近平面单应性矩阵模型提供初始数据集。图3为叶片局部近平面抽取算法流程。

详细抽取策略为: 给定某一点的中心坐标、一个足够大的初始搜索半径、合适的半径缩减步长和最终所求近平面包含的点的数量阈值 (以较高内点率为宜), 然后以该点为中心, 搜索该点周围满足当前搜索半径的像点。如果抽取到的点的数量满足设定的近平面点数量阈值, 则停止搜索并存储相应点数据, 如果不满足, 则以给定的半径缩减步长来缩减搜索半径, 并重复上述搜索过程, 直至以某一半径进行搜索时得到的点的数量满足给定阈值, 则将该平面中的

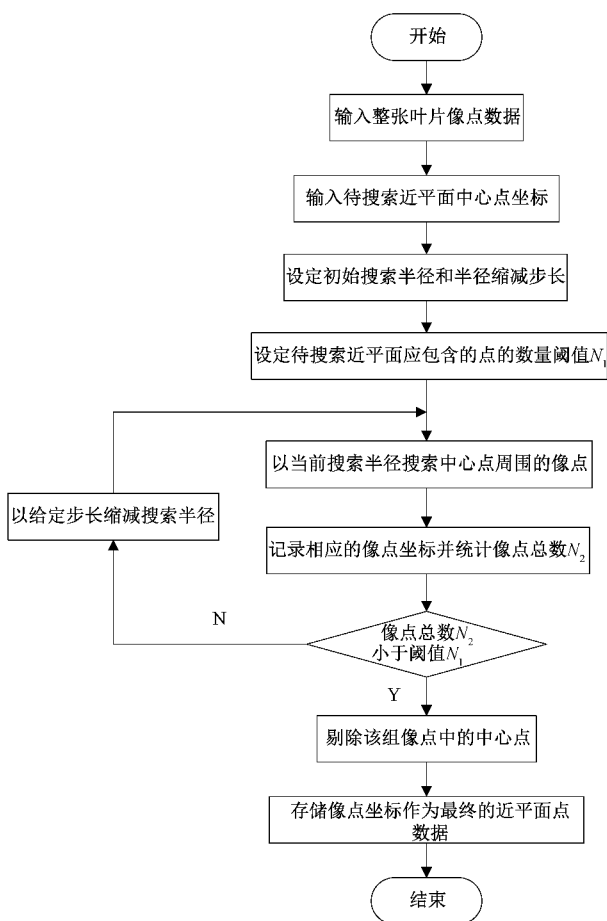


图 3 叶片局部近平面区域抽取算法流程

点进行存储。鉴于后续要使用局部单应性完成最终验证，因此此处需要剔除搜索过程中的中心点，避免其参与单应性矩阵模型求解。

1.4 RANSAC 估计局部单应性矩阵

RANSAC 即随机抽样一致，它能够从一组包含“局外点”的观测数据集中，通过一定次数的迭代估计出一个适用于“局内点”的最优数学模型，其中“局内点”表示满足该数学模型的点，“局内点”以外的点称为“局外点”。此处借鉴这一思想并结合实际做了改进，最终将其应用于求解局部近平面区域单应性矩阵模型。

在得到当前待匹配点及其候选匹配点组所在近平面区域的像点数据后，需要估计左图中待匹配点所在近平面与右图中哪个候选点所在近平面是实际三维场景中的同一个近平面。将当前待匹配点所在近平面的像点数据与其各个候选匹配点所在近平面的像点数据分别进行组合，假定每组都对应三维空间中的同一近平面，采用改进的 RANSAC 算法依次估计各组近平面的单应性矩阵。针对每一组近平面点数据，保留迭代过程中局内点最多的单应性矩阵模型作为该组近平面的最佳单应性矩阵。

以某一个近平面组合为例，RANSAC 估计单应性矩阵

模型算法步骤如下。

1) 随机从两个近平面像点数据中分别抽取不共线的 4 个样本点数据，初步计算相应的单应性变换矩阵模型 H 。

2) 计算两个近平面数据集中其他所有数据与模型 H 的投影误差，若误差小于设定的阈值，则将其加入局内点集；否则，将其舍弃。

3) 如果当前局内点集元素数量大于最优局内点集元素数量，则更新最优局内点集。

4) 更新并记录当前迭代次数。

5) 如果迭代次数大于先前设定值，则退出迭代；否则进行下次迭代，重复上述步骤。

6) 利用迭代完成后的最优局内点集重新计算变换矩阵模型 H ，作为该组近平面的最佳单应性矩阵。

根据数据集中内点占有率 p 和一定的置信度 μ 可由式(18)初步确定算法中最小迭代次数 m 。

$$m = \frac{\log(1 - \mu)}{\log(1 - p^4)} \quad (18)$$

为了保证局部单应性矩阵模型求解的精度和可靠性，在上述 RANSAC 算法中做了如下改进。

1) 修改传统 RANSAC 迭代方式，设计两层迭代算法，外层迭代用于在左图近平面中抽取相应样本点，内层迭代则用于在右图近平面中抽取相应样本点，用于提高有效样本的出现概率。

2) 在步骤 1) 中对两个近平面分别抽取到的 4 个样本数据通过排列组合，获得 24 种一一对应关系，即每完成一次抽取便可求得 24 个初始的单应性矩阵模型，之后借助单应性变换对 24 个模型分别进行类似步骤 2) 和 3) 的模型验证，进而确定当前迭代所抽取的样本对应的最优局内点集。该处理可以确保有效样本的准确使用。

3) 存储当前两个近平面数据完成最终迭代后的最优局内点集，并用其重新计算单应性矩阵，可进一步提高模型求解精度。

1.5 局部单应性确定最终匹配点

在当前点匹配过程中，得到各组局部近平面所对应的单应性矩阵模型 H 后，由于并非每个 H 矩阵都表征空间中的某一近平面，因此需要从中确定一个对应实际三维场景中局部近平面的单应性矩阵，并在此基础上求解当前待匹配点的最终匹配点。

采取如下策略：首先通过上述 RANSAC 算法所估计的各组近平面的单应性矩阵，分别采用单应性变换求解当前待匹配点在另一幅像面中的理论匹配点，其中每个理论匹配点都分别与其中一个候选匹配点相对应，依次计算各候选匹配点与相对应的理论匹配点的距离偏差，最后结合各距离偏差和合理的误差阈值确定正确的 H 矩阵以及当前点的最终匹配点。

综合以上论述，此处给出如图 4 所示的基于预筛选和局部单应性的双目图像匹配算法流程。

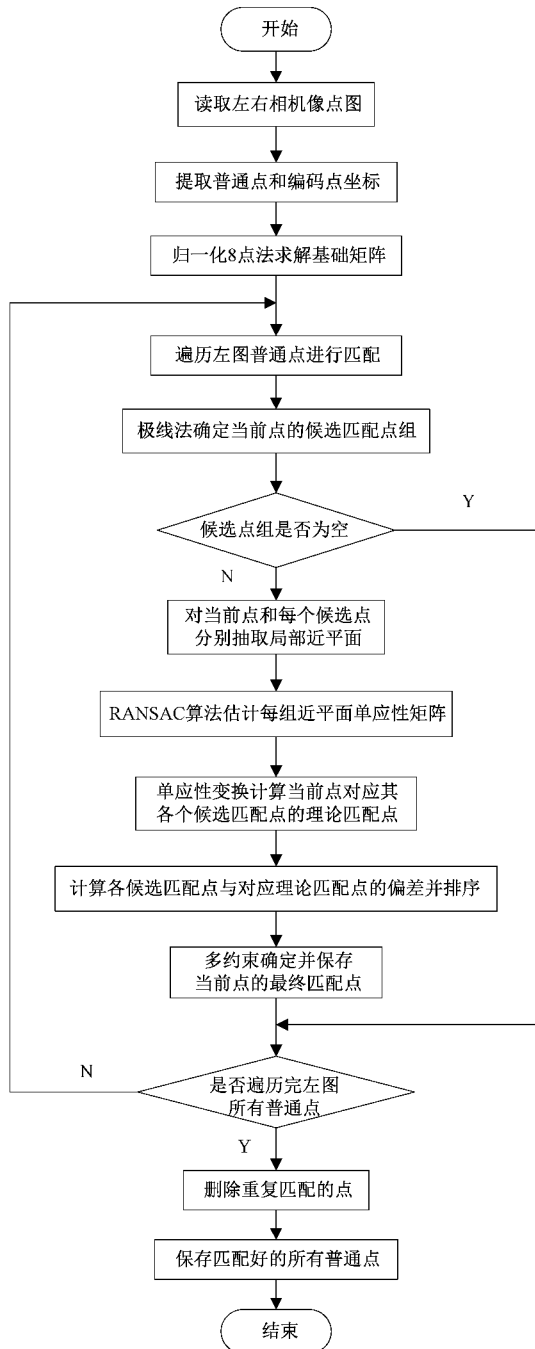


图4 基于预筛选和局部单应性的双目图像匹配算法流程

2 实验结果与分析

2.1 实验设计

为了验证上述匹配方法的可靠性及准确性,选用长160 cm,宽6~22 cm(尖端宽度~尾端宽度)的风电叶片作为测量对象,搭建如图5所示实验场景。

实验采用两台型号为PROGISE GE4900的工业相机完成图像采集工作,其中图像传感器尺寸为36.0 mm×24.0 mm,分辨率为4 872 pixel×3 248 pixel,像元尺寸为

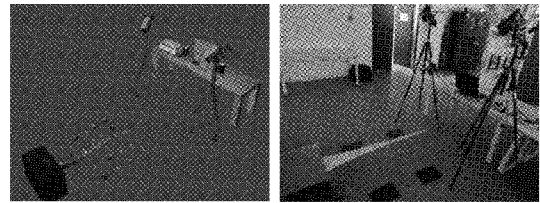


图5 风电叶片实验设计与场景搭建

$7.40 \mu\text{m} \times 7.40 \mu\text{m}$ 。首先在叶片表面相应位置布置110个人工标志普通点,直径均为3 mm,像点分布如图6所示。之后,将叶片固定在光学平台上,并在叶片周围布置15组编码点。其中,叶片上普通标志点是后续待匹配点,已知匹配关系的编码点则用于8点法求解 F 矩阵。

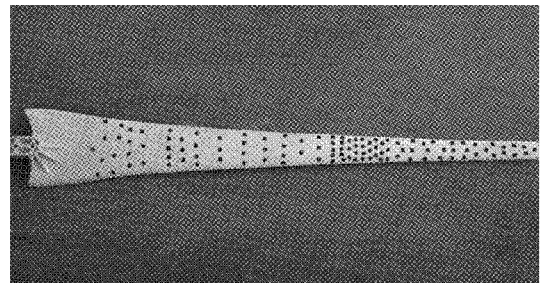


图6 叶片表面标志点分布

调整双相机位置,并将它们架设在适当高度进行俯拍。在实验过程中,人为对叶片施加激励,使叶片产生上下摆振,采集不同时刻的叶片像点图像。

前期实验发现,影响该匹配方法最终性能的主要因素有:人工标志点的疏密程度、近平面搜索中像点数量阈值、极线预筛选阈值、RANSAC算法迭代次数以及单应性误差阈值。其中人工标志点分布应尽量满足同一近平面区域不少于8个点,确保较高的内点率;像点数量阈值的设定以内点率不低于70%为宜;极线预筛选阈值和单应性误差阈值均由像点坐标提取精度决定,精度在1/20 pixel时,阈值一般取2~4 pixel;算法迭代次数是决定匹配精度的关键因素,将通过具体实验定性分析。

对采集到的像点图进行两类实验:任意选取风电叶片上下摆动过程中所拍摄的1组像点数据,分析不同迭代次数对匹配结果的影响;随机选取5组像点数据,分别采用传统极线匹配方法和上文所述匹配方法对每组数据进行像点匹配,对比分析实验结果,并以匹配率和匹配准确率作为评价标准。

2.2 实验结果与分析

在整个实验中,设定极线预筛选阈值为3 pixel,近平面搜索中像点数量阈值为11,局部单应性误差阈值为4 pixel。

使用本文方法对同一组像点数据进行多次匹配实验,结果显示不同迭代次数会产生不同的匹配效果。此处以外层迭代次数取20为例,给出不同内层迭代次数对匹配结果的影响,如表1所示。

表 1 不同内层迭代次数对匹配结果的影响

内层迭代次数	10	15	20	25	30	35
匹配率/%	94.55	92.73	96.45	96.36	96.55	96.94
匹配准确率/%	96.08	97.12	98.08	98.11	100.00	100.00

综合多次实验结果得出,在算法中设定合适的内外层迭代次数可以达到较好的匹配效果,一般情况下,内外层迭代次数均不宜低于 15。

表 2 两种不同匹配方法对于 5 组实验数据的匹配结果

实验编号	匹配方法	应匹配像点数	实际匹配像点数	匹配率/%	准确匹配像点数	误匹配像点数	匹配准确率/%	运行时间/s
1	极线匹配	110	86	78.18	82	4	95.35	0.67
	本文方法		106	96.36	104	2	98.11	3.42
2	极线匹配	109	85	77.98	83	2	97.65	0.71
	本文方法		107	98.17	106	1	99.07	3.39
3	极线匹配	110	88	80.00	85	3	96.59	0.69
	本文方法		106	96.36	106	0	100.00	3.40
4	极线匹配	108	89	82.41	85	4	95.51	0.73
	本文方法		105	97.22	102	3	97.14	3.37
5	极线匹配	107	85	79.44	83	2	97.65	0.68
	本文方法		105	98.13	103	2	98.10	3.38

表 2 总结了分别采用 2 种匹配方法对 5 组不同时刻像点数据的匹配结果。其中,外层和内层迭代次数均为 20。表 2 中“应匹配像点数”为左右像面实际识别到的共有像点数,“匹配率”为“实际匹配像点数”与“应匹配像点数”之比,“匹配准确率”为“准确匹配像点数”与“实际匹配像点数”之比。图 7 直观地显示了新的匹配方法对某一时刻像点数据的匹配结果,其中相同的编号表示互相匹配的像点。

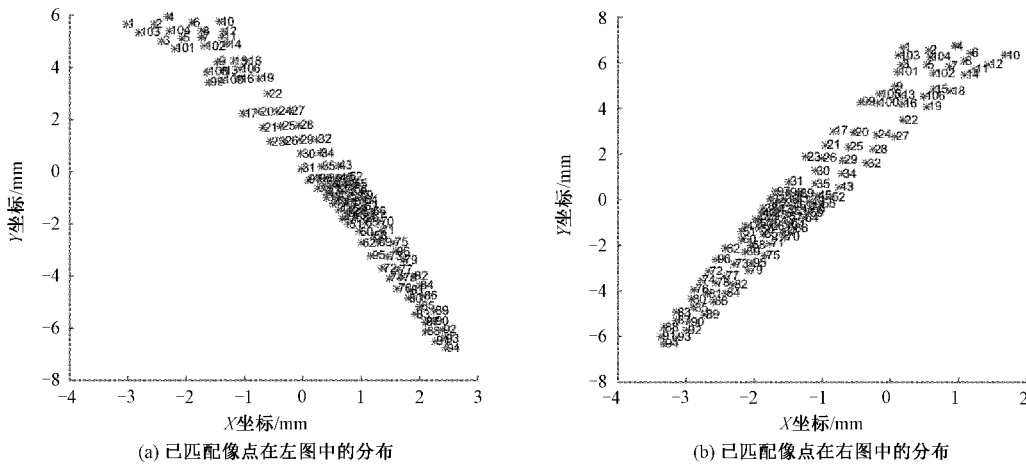


图 7 本文匹配方法对某一时刻像点数据的匹配结果

由表 2 可得,针对风电叶片不同姿态,本文提出的图像匹配方法虽然时间复杂度略有上升,但匹配率和匹配准确率都明显优于极线匹配方法。叶片像点数量的增加和叶片的上下摆动导致极线匹配中出现很多近极线干扰点和共极平面点,进而造成较低的匹配率和匹配准确率,而实验结果表明,新的匹配方法可以有效解决上述匹配问题。

综合以上分析,基于预筛选和局部单应性的双目图像匹配方法能够有效解决风电叶片运动过程中的图像匹配问题,且在算法中设定合适的参数值可以得到较高的匹配

率(高于 96%)和匹配准确率(高于 97%)。此外,经过实际大型风电叶片动态摄影测量,该方法依然能够表现出较好的匹配性能,对于其他平缓连续曲面测量场同样具有适用性。

3 结 论

针对风电叶片动态摄影测量中传统图像匹配方法所存在的匹配问题,如匹配率和匹配准确率相对较低,适用场景有限等,提出了一种基于预筛选和局部单应性的双目图像匹配方法。该方法综合了极线约束和单应性在图像

匹配中的优点,通过极线约束初步筛选匹配点,之后抽取局部近平面并采用改进的RANSAC算法估计相应近平面单应性矩阵,最终通过单应性变换确定最佳匹配点。为了验证该匹配方法的可靠性,设计了风电叶片摆振实验,对采集到的像点图分别采用极线匹配和本文匹配方法进行图像匹配。该匹配方法优于极线匹配,且具有较高的匹配率和匹配准确率。在大型风电叶片实景测量中,该匹配方法同样表现出较好的性能,同时该方法可为其他平缓连续曲面测量场的图像匹配提供参考,且足够数量的标志点可以进一步提高匹配率和匹配准确率。

参考文献

- [1] TUMMALA A, VELAMATI R K, SINHA D K, et al. A review on small scale wind turbines [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 56 (C): 1351-1371.
- [2] 中国可再生能源学会风能专业委员会,中国农业机械工业协会风力机械分会,国家可再生能源中心. 2018年中国风电吊装容量统计简报[J]. *风能*, 2019, 110(4):58-69.
- [3] OCHIENG F X, HANCOCK C M, ROBERTS G W, et al. A review of ground-based radar as a noncontact sensor for structural health monitoring of in-field wind turbine blades [J]. *Wind Energy*, 2018, 21 (12): 1-15.
- [4] 王琳琳,陈长征,周勃. 基于热力熵分析的风力机叶片疲劳早期损伤研究[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(10): 104-111.
- [5] YANG W X, TAVNER P J, CRABTREE C J, et al. Wind turbine condition monitoring: Technical and commercial challenges [J]. *Wind Energy*, 2014, 17(5):673-693.
- [6] 孙溢膺,董明利,乔玉军. 基于摄影测量的大型风机叶片运行模态分析[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 226(10):165-172.
- [7] PEREZ J S, ARREDONDO M A T, GUEMES A. Damage and nonlinearities detection in wind turbine blades based on strain field pattern recognition. FBGs, OBR and strain gauges comparison [J]. *Composite Structures*, 2016, 137(8):156-166.
- [8] AIHARA A, KAWAGUCHI T, MIKI N, et al. A vibration estimation method for wind turbine blades [J]. *Experimental Mechanics*, 2017, 57(8):1213-1224.
- [9] BAQERSAD J, POOZESH P, NIEZRECKI C, et al. Photogrammetry and optical methods in structural dynamics-A review [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 86:17-34.
- [10] 孙鹏. 大尺寸动态摄影测量关键技术研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2019.
- [11] 贾迪,朱宁丹,杨宁华,等. 图像匹配方法研究综述[J]. *中国图象图形学报*, 2019, 24(5):677-699.
- [12] 杨白雪,张晓丹. 尺度不变特征变换的图案匹配研究[J]. *国外电子测量技术*, 2020, 303(2):53-58.
- [13] 陈晓勇,何海清,周俊超,等. 低空摄影测量立体影像匹配的现状及展望[J]. *测绘学报*, 2019, 48 (12): 1595-1603.
- [14] 姚佳宝,田秋红,陈本永. 一种基于L-M算法的RANSAC图像拼接算法[J]. *浙江理工大学学报*, 2015, 33(7):552-557.
- [15] 刘其林,燕必希,董明利,等. 风电叶片动态数据获取及运动分析[J]. *机械设计与制造*, 2021(8):48-52.
- [16] 张培耘,华希俊,夏乐春. 基于RANSAC算法的极线约束立体视觉匹配方法研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2013(11):20-22.
- [17] 王可,贾松敏,李秀智. 基于全概率更新的改进RANSAC算法[J]. *控制与决策*, 2017, 32(3):427-434.
- [18] 孔祥思. 改进的RANSAC立体匹配算法的研究[J]. *北京建筑大学学报*, 2017, 33(4):39-44.
- [19] 单宝华,霍晓洋,刘洋. 一种极线约束修正数字图像相关匹配的立体视觉测量方法[J]. *中国激光*, 2017, 44(8):192-201.
- [20] 李云雷,张曦,屠大维. 形貌视觉测量中立体拼接靶标的设计及应用[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38 (9): 2161-2169.

作者简介

李梦帅,硕士研究生,主要研究方向为视觉测量技术。

E-mail: monshyli@outlook.com

燕必希,教授,主要研究方向为视觉测量技术、光电检测技术等。

E-mail: yanbx@bistu.edu.cn

董明利(通信作者),教授,主要研究方向为视觉测量技术、精密测量技术与仪器。

E-mail: dongml@sina.com