

基于椭圆检测的视觉测振技术

夏新飞,王彤

(南京航空航天大学 航空学院,江苏 南京 210016)

摘要:针对目标跟踪算法应用于视觉测振领域复杂度高及高频时由于去相关现象而导致信噪比降低等问题,设计一种改进的椭圆检测算法并将其应用于目标跟踪。通过悬臂梁振动实验,目标跟踪准确度高达99.7%,验证了所提算法的精确性,且测得的模态参数与传统加速度传感器所测值误差仅为1.7%,表明所提算法应用于振动测试的有效性。

关键词:视觉测振;数字图像相关算法;椭圆检测

中图分类号:TP275 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)03-0185-04

Vibration Test Technology Based on Ellipse Detection

XIA Xinfei, WANG Tong

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aimed at the high complexity of target tracking algorithm in the field of visual vibration measurement and the reduction of signal-to-noise ratio due to decorrelation at high frequency, an improved ellipse detection algorithm is designed and applied to target tracking. The cantilever beam vibration experiment shows that the accuracy of the proposed algorithm is as high as 99.7%, which verifies the accuracy of the proposed algorithm, and the error between the measured modal parameters and the measured ones by the traditional acceleration sensor is only 1.7%, which proves the effectiveness of the proposed algorithm in vibration test.

Keywords: visual vibration measurement; digital image correlation algorithm; ellipse detection

0 引言

模态分析技术广泛应用于航空航天、机械、土木等领域,为振动控制、损伤分析及减振隔振等提供重要依据。振动测试是模态分析的前提,而振动信号拾取是振动测试的基础。目前应用最广泛的振动信号拾取方法是以采用压电式加速度传感器为代表的接触式方法。该方法具有精度高、适用频带宽等优点,但其对轻质结构将引起明显的“附加质量效应”,且在低频、高温、强磁等条件下存在一定局限性,而非接触式测试则能有效避免上述问题。

视觉测量是一种典型的非接触式测量方法。国内外许多学者对该方法进行了研究并在振动测试领域得到了较好的应用。臧旭等将双目视觉应用于柔性太阳翼的模态实验,为柔性太阳翼在轨模态参数识别奠定了基础^[1];马天兵等利用机器视觉技术测量结构振动并以此进行振动控制^[2];王彤等利用单目视觉实现了轻质大柔度结构的振动测试与分析^[3];林雅峰结合计算机视觉开发轨道式巡检机器人,减轻了巡检工作强度,提高了工作效率^[4]。

基于计算机视觉的振动测试技术对其中的目标跟踪算法的首要要求是具有较高的精度,其中应用较为广泛的数字图像相关算法^[5-7]以迭代的方式在后一帧图像中搜索与目标区域相关性最高的位置,具有高精度的优点。但其算法过程复杂,且在振动频率较高时相机所采集视频出

现运动模糊时将导致相关系数急剧降低,使得测量信号信噪比大大降低。针对这些问题,本文提出一种改进的椭圆检测算法并将其应用于目标跟踪,通过图像预处理得到弧段的分类,并以椭圆对弧段组合拟合,而后对该拟合进行验证。逐帧、逐目标进行椭圆检测实现目标跟踪,简化了算法的流程且提高了目标跟踪的精度及效率。最后,以激振器实验及振动实验验证本文所提算法的精确性及应用于视觉测振时的有效性。

1 椭圆检测

椭圆检测算法主要分为两种:霍夫变换和边缘跟随。霍夫变换广泛应用于直线、圆等图形元素的检测,但存在计算量大、内存消耗大的问题^[8]。边缘跟随有效地解决了霍夫变换所存在的问题,一般其首先通过边缘检测算子生成二值边缘图像,而后定义弧段、匹配弧段,最后验证椭圆得到最终检测椭圆^[9]。虽然椭圆检测算法已研究多年,但目前还没有针对微小椭圆的检测算法。本文在边缘跟随算法基础上进行了改进,使其适用于微小椭圆的检测,其主要包括两个步骤:预处理及拟合验证。

1.1 预处理

本文采用的预处理方法,具体流程包括边缘检测、连通域分析及弧段分类。

基金项目:江苏高效优势学科建设工程资助项目

第一作者简介:夏新飞(1997—),男,江苏徐州人,硕士研究生,研究方向为视觉动态测振。

首先以 Canny 边缘检测算子检测图像生成二值边缘图并利用边缘点梯度相位将边缘点分为两类,每一类边缘点组成一张边缘图;接着针对每一类边缘图执行 8 连通域分析算法以生成连续弧段;最后利用弧段外接正矩形的弧上面积、弧下面积的大小关系将弧段分为 2 类。至此,得到分为 4 类的连续弧段。

1.2 拟合验证

预处理得到的弧段包含部分噪声,可通过弧段长度初步滤除噪声,即直接去除长度小于阈值的弧段,而后以霍夫变换思想在 4 类椭圆弧段中检测椭圆。

首先在 4 类连续弧段集合中各取一弧段组合为新弧段集合,以文献[10]中椭圆拟合方法拟合新弧段集合,而后记录拟合椭圆的内点占比。遍历 4 类椭圆弧段后取内点占比最大的组合为最终椭圆支撑弧段,其椭圆拟合结果为最终检测椭圆。

内点占比计算公式为

$$\psi(p) = \frac{n(p,e)}{c(e)} \tag{1}$$

式中: e 为 p 的拟合椭圆; $n(p,e)$ 为椭圆弧点集 p 相较于 e 的内点数量; $c(e)$ 为椭圆 e 周长。椭圆周长没有精确计算公式,本文采用椭圆周长近似计算公式:

$$c(e^k) \approx \pi \left[\frac{3}{2}(a+b) - \sqrt{ab} \right] \tag{2}$$

式中 a 、 b 分别为椭圆长、短半轴。

本文所提椭圆检测流程如图 1 所示。

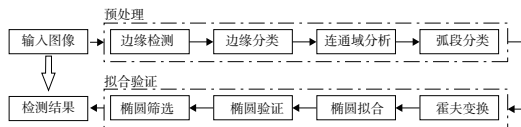


图 1 椭圆检测流程

1.3 基于椭圆检测的视觉测振

将所改进的椭圆检测目标跟踪算法应用于振动测试

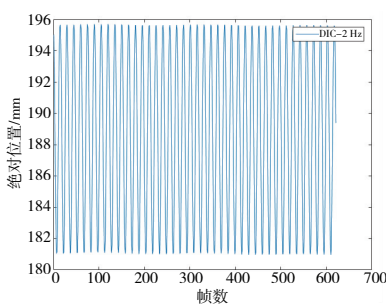


图 2 DIC 时域信号

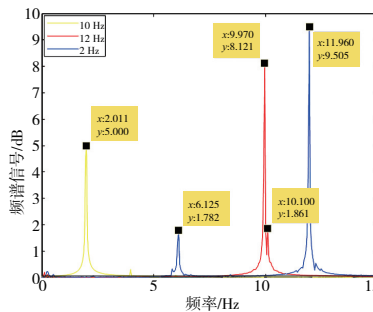


图 3 DIC 跟踪时域信号频谱

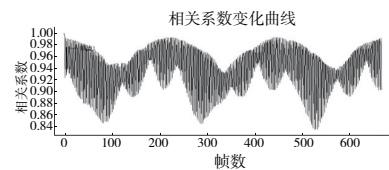


图 4 10 Hz 时 DIC 跟踪相关系数曲线

由椭圆检测跟踪所得时域信号如图 5 所示,频谱如图 6 所示。可以发现,无论在低频还是高频情况下,检测结果都是鲁棒的,频率误差范围在 0.02 Hz 以内。在计算效率方面,660 帧目标运动视频 DIC 跟踪需要 91 s,而本文方

法仅需 6 s,提升了 12.4 倍(算法皆由 Python 实现)。本文提出的基于椭圆检测的目标跟踪技术在存在运动模糊时依然能有效地检测出图像中的椭圆,解决了 DIC 中的去相关问题,且显著提高了跟踪效率。

信号拾取。对于仅需测量结构在某一平面内的振动情形,假设振动平面与空间坐标系中 $z=0$ 平面重合,其上任一空间点 $P=[x, y]^T$ 的相机投影点 $p=[u, v]^T$ 可表示为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中 H 为可逆单应矩阵。由式(3)可知,像素坐标时域信号与空间坐标时域信号为线性关系。此时无需进行相机标定或三维重构空间点坐标,可直接由像素坐标时域信号进行模态分析,对结果几乎无影响。

2 实验结果与分析

本文通过两个实验验证算法鲁棒性。其一为激振器实验,通过对比本文提出的基于改进椭圆检测的目标跟踪算法与 DIC 跟踪算法,验证本文算法高精度及高效率的特点。其二为视觉测振实验,与传统加速度传感器振动信号拾取的模态分析结果对比,验证算法的有效性及鲁棒性。

2.1 激振器实验

由 OROS 发射正弦信号,经功率放大器传入激振器。在激振器顶部分别粘贴散斑图及圆形贴纸以比较 DIC 算法与所提算法。其中实验硬件包括 OROS 采集仪、功率放大器、激振器、工业相机及 N-Modal 模态测试系统。因所用工业相机的帧率为 30 帧/s,故依次设置信号发射器发射 2~14 Hz 正弦信号,步长为 2 Hz。

由 DIC 算法跟踪所得时域信号如图 2 所示,频谱如图 3 所示(本期刊为黑白印刷,如有疑问请咨询作者)。可以发现,在频率较低时 DIC 跟踪结果精度较高,但是在频率较高时其频谱出现了多余噪声成分。其原因是在频率较高时,相机出现了运动模糊,使 DIC 跟踪的相关系数降低(图 4)而跟踪噪声随之升高。多次实验发现:频率在 8 Hz 以下时,相关系数维持在 0.9 以上;在频率达到 10 Hz 时,相关系数跌至 0.84;频率达到 12 Hz 时,相关系数进一步跌至 0.65。

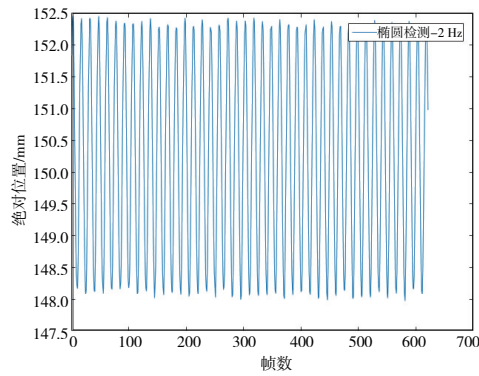


图5 椭圆跟踪时域信号

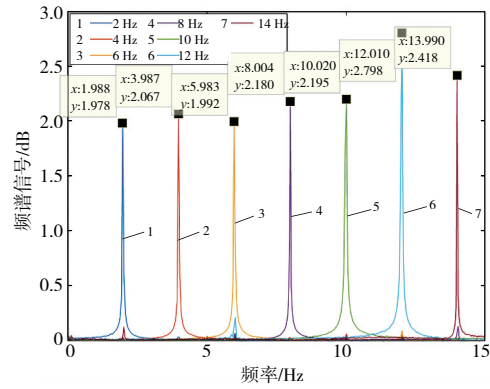


图6 椭圆检测跟踪时域信号频谱

2.2 视觉测振实验

以铝制悬臂梁的低频模态测试验证所提方法,实验场景如图7所示。实验硬件包括:OROS采集仪、PCB力锤、PCB单轴加速度传感器、工业相机及N-Modal模态测试系统。

分别由传统接触式测振方法及视觉测振方法拾取铝

制悬臂梁振动信号,而后将测得的时域信号导入N-Modal模态分析软件获取其低频模态,比较其所得模态参数验证所提目标跟踪算法应用于振动测试时的有效性。

传统接触式测试的力信号及响应信号分别如图8、图9所示,测试所得模态指示函数如图10所示。其一阶弯曲频率为1.0Hz,一阶弯曲振型如图11所示;二阶弯曲频率为6.26Hz,二阶弯曲振型如图12所示。



图7 实验场景

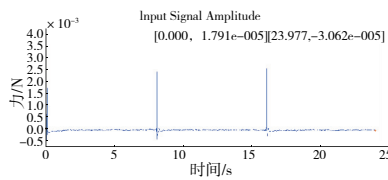


图8 力信号

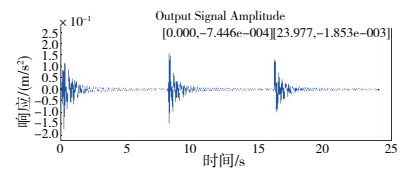


图9 响应信号

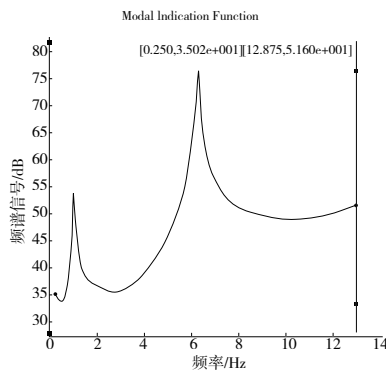


图10 模态指示函数

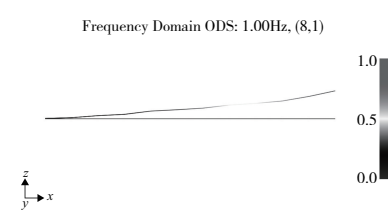


图11 一阶弯曲振型

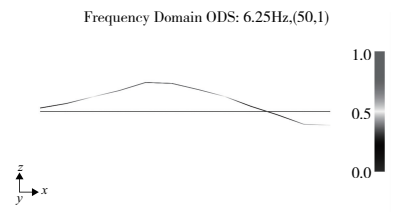


图12 二阶弯曲振型

工业相机所采集悬臂梁振动视频1024帧,共12288个椭圆,其中仅有36个椭圆检测失败,检测准确率达99.7%。基于视觉的测试方法所得时域信号如图13所示,分析所得模态指示函数如图14所示。其一阶弯曲频率为1.03Hz,一阶弯曲振型如图15所示;二阶弯曲频率为6.28Hz,二阶弯曲振型如图16所示。

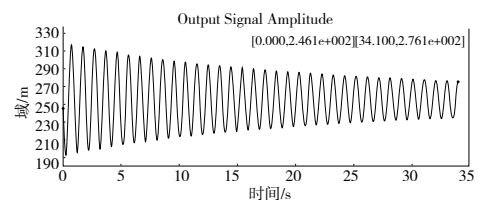


图13 时域信号

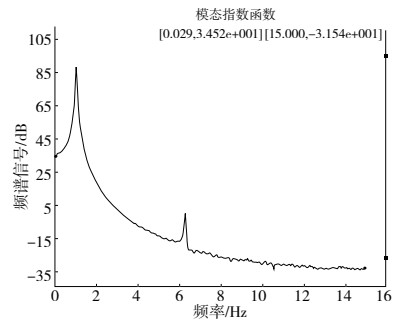


图 14 基于视觉测试方法模态指示函数

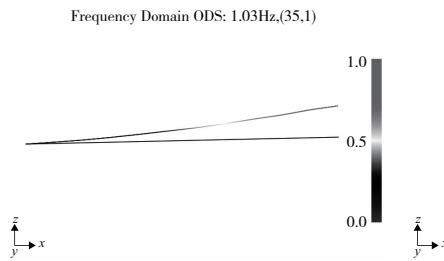


图 15 基于视觉测试方法一阶弯曲振型

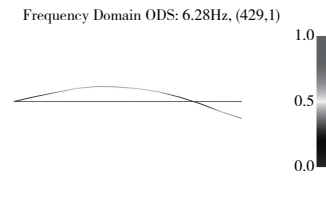


图 16 基于视觉测试方法二阶弯曲振型

对比可知,视觉测试与传统测试所得模态参数平均误差仅为 0.025 Hz,平均相对误差为 1.7%。且视觉测试与传统测试所得模态振型几乎相同,验证了本文方法的有效性。

3 结语

针对 DIC 算法复杂度高及高频时的去相关问题,本文提出一种基于改进椭圆检测的目标跟踪算法。经实验验证,得到以下结论:

1) 本文所提目标跟踪算法简化了目标跟踪流程,解决了去相关问题,提高了抗噪性,存在一定运动模糊时仍能鲁棒地检测出目标椭圆;

2) 所提方法计算效率相较于 DIC 算法显著提高;

3) 所提目标跟踪算法应用于振动测试时能满足结构低频模态的测试需求。

参考文献:

- [1] 臧旭,吴松,郭其威,等. 视觉测振技术在柔性太阳翼模态试验中的应用[J]. 宇航学报,2020,41(1):44-51.
- [2] 马天兵,周青,杜菲,等. 基于机器视觉和改进 PID 的压电柔性机械臂振动控制[J]. 光学精密工程,2020,28(1):141-150.

- [3] 王彤,李俊坡,夏遵平. 基于视频测量的运行状态模态分析[J]. 振动与冲击,2017,36(5):157-163,220.

- [4] 林雅峰. 一种轨道式巡检机器人系统技术开发与应用[J]. 机械制造与自动化,2021,50(4):162-165.

- [5] FENG D M, FENG M, OZER E, et al. A vision-based sensor for noncontact structural displacement measurement [J]. Sensors, 2015, 15(7):16557-16575.

- [6] 单宝华,王海,袁文厅,等. 地震动作用下三层框架模型倒塌的平行双目视觉监测[J]. 振动与冲击,2018,37(12):48-52.

- [7] POOZESH P, BAQERSAD J, NIEZRECKI C, et al. Large-area photogrammetry based testing of wind turbine blades [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 86:98-115.

- [8] DUDA R O, HART P E. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures [J]. Communications of the ACM, 1972, 15(1):11-15.

- [9] FORNACIARI M, PRATI A, CUCCHIARA R. A fast and effective ellipse detector for embedded vision applications [J]. Pattern Recognition, 2014, 47(11):3693-3708.

- [10] FITZGIBBON A, PILU M, FISHER R B. Direct least square fitting of ellipses [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(5):476-480.

收稿日期:2021-11-29