

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211631

基于欧拉运动放大的微小振动测量技术综述*

朱美意¹ 陈日东¹ 郑德智²

(1.北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院 北京 100191; 2.北京航空航天大学前沿科学技术创新研究院 北京 100191)

摘要: 在工程振动测量领域,近年基于机器视觉的振动测量方法是最常用的技术手段。针对微小幅度振动测量问题,依赖于传统图像处理算法的视觉测量方法难以测准测精,对此,基于机器视觉的运动放大方法是很好的解决方案。这种方法将人眼难以察觉的微小运动进行放大,再结合图像运动信息提取方法,实现了更准确的运动信息测量。本文总结了目前常用的基于机器视觉的振动测量方法,重点围绕基于机器视觉的运动放大技术展开详细介绍。运动放大技术主要分为拉格朗日放大方法及欧拉放大方法,本文介绍了拉格朗日放大技术和欧拉放大技术方法的起源发展,对两类方法的核心进行了对比分析,阐述了欧拉运动放大技术的优越性,进一步详细介绍了多种欧拉放大技术的改进方法,分析了各类改进方法的特点和局限性。最后,总结了基于欧拉运动放大的微小振动测量技术的发展前景。

关键词: 机器视觉;振动测量;运动放大;拉格朗日放大;欧拉放大

中图分类号: TB936 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Review of vibration measurement techniques based on euler motion magnification

Zhu Meiyi¹ Chen Ridong¹ Zheng Dezhi²

(1. School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Research Institute for Frontier Science, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In the field of engineering vibration measurement, the vibration measurement method based on machine vision is a commonly used technical means in recent years. For small amplitude vibrations, visual measurement methods relying on traditional image processing algorithms are difficult to measure accurately. To solve this problem, a machine vision-based motion magnification method was proposed. It achieves more accurate motion information measurement by amplifying the tiny motion that is difficult to detect by the human eye and combining with the image motion extraction method. First, this paper summarizes the commonly used machine vision-based vibration measurement methods, focusing on the detailed introduction of machine vision-based motion magnification technology. Motion magnification methods include Lagrangian magnification approach and Eulerian magnification approach. The origin of both motion magnification methods is introduced. The two technologies' feature are analyzed and compared. Then the various improvement methods of Euler magnification techniques are introduced in detail, including the characteristics and limitations. Finally, the development prospects of small amplitude vibrations measurement technology based on Euler motion magnification are discussed.

Keywords: machine vision; vibration measurement; motion magnification; Lagrangian motion magnification; euler motion magnification

0 引言

在精密制造业加工零件时几何量测量^[1-2]、机器人三维姿态定位^[3]、大型桥梁建筑结构位移测量^[4]等等诸多工业和民用生活领域,基于视觉技术的非接触测量普遍应用。

除了静态测量,基于视觉的振动测量在航天器大型柔性结构件的振动测试^[5]、大型建筑结构振动监测^[6]也发挥重要作用。众多工程振动测量的场景中,微小振动的测量是一个亟需关注的领域,一些难以被肉眼察觉的微小振动往往包含着重要的信息,譬如涡轮机叶片微小振动^[7]可以反映

收稿日期:2022-10-08

* 基金项目: ** 基础科学研究计划项目(***601*10)、京沪高铁重点项目(20100002021140002)资助

结构损伤的程度、颈动脉从心脏到头部的血液循环所产生的头部微小振动^[8]可以给出更好的心率结果、呼吸时的胸腹运动可以帮助提高呼吸率的检测精度^[9]等,精准测量这些微小振动就可以更好地研究学习^[10-11]。

基于视觉的振动测量精度与视觉系统成像分辨率大小相关,当振动幅度不足 1 个像素,像素级的视觉处理方法将会失效,大大影响位移和振动频率的测量。针对微小振动带来的振动测量问题,基于机器视觉的微小运动放大是广受关注的解决方案之一。通过运动放大技术,可以将这些人眼难以分辨的小运动放大到可以识别检测的程度,为人和机器视觉系统提供重要信息,所以运动放大方法逐渐成为机器视觉测振的一个关键部分。其中,运动放大方法依据原理不同主要分为拉格朗日放大与欧拉放大两种。本文从机器视觉振动测量方法引入,对拉格朗日与欧拉放大两种运动放大方法进行展开叙述,重点针对目前应用更为广泛的欧拉运动放大方法综合阐述,解析了欧拉运动放大方法的应用阻碍,如伪影噪声、解析速度等。针对欧拉运动放大方法的现有问题,本文接着围绕欧拉运动放大的多类型改进方法展开分析讨论,分析各类改进方法的思路和改进效果及局限性,为欧拉运动放大方法在不同应用场景的降噪和性能提升提供思路,最后总结了基于运动放大的视觉测振应用领域及未来发展方向。

1 基于机器视觉的振动测量方法

基于机器视觉的振动测量,即结合数字相机与机器视觉技术的新型测量方法^[12-13],如利用单目红外远距离测量多振点及柔性结构模态检测^[14]、利用激光多普勒测振仪测量物体表面振动^[15]等,相比于传统振动测量方法如使用加速度传感器^[16]、LVDT 位移传感器等,具有多点测量、非接触式、不改变结构动力学特性等多种特点。根据分析方法的的不同,基于机器视觉的振动测量方法也有许多种,典型方法有三维数字图像相关法(digital image correlation, 3D DIC)、光流法(optical flow, OP)以及视频运动放大方法(motion magnification, MM)等。

1.1 三维数字图像相关测振法

数字图像相关法是最常用的传统机器视觉测振方法之一,通过跟踪以选定目标为中心的局部小图变形前后的位置变化来计算位移信息。但二维数字图像相关法局限在平面的面内位移,且对被测物体表面、摄像光轴、被测物体形变等都具有严格要求。在实际应用中,通过结合双目视觉原理和数字图像相关匹配技术,拓展形成了具有光路简单且抗干扰等优点的三位数字图像相关方法^[17-18]。此方法一般需要两个高精度相机进行数据采集,获取待测目标表面变形前后的数字散斑图像^[19],进而手动选取变形前感兴趣区域,最后搜索变形后图像中相关性最大区域,还原出物体表面的形貌和形变信息,计算振动位移信号,测量原理如图 1 所示。

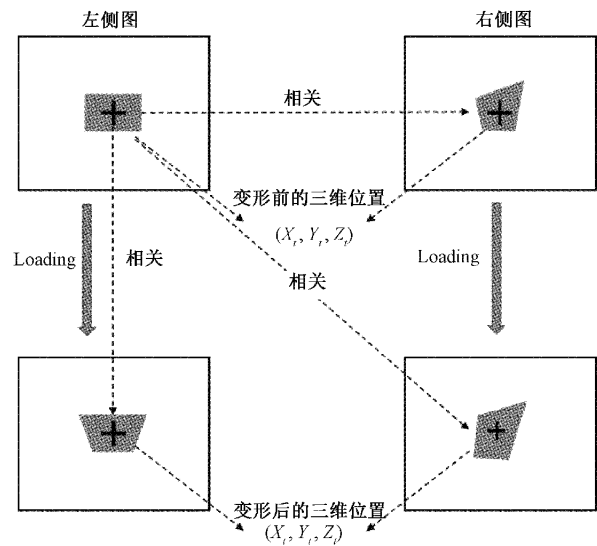


图 1 三维数字图像相关法测振原理^[17]

数字图像相关法可以提供高精度模态变形参数,但是该方法一般需要在被测结构表面设置标记点,因此处理比较耗时,且实时测量比较困难,对于各种环境适应性不强。

1.2 光流法测振法

光流即图像灰度模式的像素运动速度,表征二维图像灰度变化与景象中物体结构和运动的关系,光流法是利用这种图像灰度模式的像素运动估计物体运动的方法。其原理以经典 Lucas-Kanade 光流法为例,通过分析每一个像素点的运动场的变化,将具有特征运动的目标从背景中分离出来^[20]。利用光流法可以检测目标微小运动的速度及方向,实现目标跟踪^[21],同时可以处理旋转以及非刚体运动的问题^[22]。

目前光流法在目标分割、识别跟踪以及机器人导航等重要的计算机视觉和图像处理领域得到广泛的应用。Davis 等^[23]利用频闪显微镜视觉系统,结合光流技术提取 MEMS 的二维平面运动信息;光流法还可以用于放电谱分析,对于核电厂中变压器局部放电情况进行检测,合理诊断变压器的故障问题。

但是光流法容易受光流场与运动场不一致的影响,对于遮挡、阴影、噪声等因素敏感,场景的光照突变容易导致运动场测量时的误差。同时,光流场计算复杂,应用型和实时性较差。

1.3 视觉运动放大法

数字图像相关法和光流法都存在计算量大及对于亮度噪声敏感等问题,且对于极其微小的亚像素级运动性能表现较差。针对这个问题,一种改变视频中感兴趣区域的运动幅度和色彩亮度的技术为亚像素级的微小运动测量打开了新的思路,这就是运动放大技术。它可以将视频中微小色彩变化“放大”为肉眼可以察觉到的变化,将运动物体边缘亚像素级别的微小位移放大为像素级的运动^[24],进一步结合特征点追踪方法测量运动信息。

对于微小运动的放大,从分析视角来看,主要分为拉格朗日视角与欧拉视角两种,拉格朗日法聚焦流体质点的运动,需要对于特征点追踪,欧拉法则注重整个流场状态而非质点,通常通过观察固定图像位置上像素点的瞬时变化而分析运动情况。

视觉运动放大技术最早由美国的 MIT 的 Freeman 团队在 2005 年公开提出。Liu 等^[25]提出了基于拉格朗日的运动放大方法,对于视频中运动的光流进行分析,得到精确的运动估计,进而进行特征点跟踪、运动轨迹聚类以及密集光流插值和运动层分割、指定层放大,最后需要对视频逐帧渲染放大。拉格朗日运动放大方法只能对于运动放大,不能对于色彩处理,同时因为需要对于特征点或图像块运动轨迹精确跟踪估计,因此该方法计算复杂度较高,并且精度容易受到遮挡影响难以保证,视频中“伪影”和噪声干扰情况较为严重,最终放大效果也受限于运动层分割准确度。

不同于传统光流法和拉格朗日放大法,欧拉运动放大方法不使用运动估计的方法,而利用光流算法中光流恒定假设与微分近似法,基于像素点分析,从空间多尺度研究像素点,是目前应用最为广泛的运动放大方法。下面将详细介绍欧拉运动放大方法。

2 欧拉运动放大方法及其改进

基于欧拉视角的运动放大主要分为两大类:线性欧拉视频放大方法 (linear eulerian video magnification, EVM)^[26]与基于相位的欧拉视频放大方法 (phase-based video motion magnification, PVM)^[23],实质上基于相位的欧拉视频放大是对于线性欧拉视频放大方法的一种改进。

2.1 线性欧拉视频放大方法

线性欧拉视频放大方法最早基于欧拉视角分析微小运动方法流程如图 2 所示,先利用拉普拉斯或高斯金字塔对视频分解,再进行时域滤波选取感兴趣的频段,通过放大因子线性放大后重构输出视频,其算法的核心在线性放大一步。线性放大原理如图 2 所示,对于一维微弱运动 $f(x)$,其 t 时刻经过位移函数 $\delta(t)$ 作用, $f(x)$ 运动至 $f(x + \delta(t))$,将它一阶泰勒级数展开表示约为 $f(x) + \delta(t) \frac{\partial f(x)}{\partial x}$,其运动变化表示为 $B(t) = \delta(t) \frac{\partial f(x)}{\partial x}$,欧拉放大中将 $B(t)$ 采用放大因子 α 作用后,形成放大信号 $f(x) + (1 + \alpha)\delta(t) \frac{\partial f(x)}{\partial x}$,即 $f(x + (1 + \alpha)\delta(t))$ 。

该方法在实际放大操作时,放大倍数不可以超过上限,否则会造成很大误差,甚至视频剧烈失真,放大倍率与图像空间波长相关,其关系如图所示,当放大倍率超过上限后,运动放大效果将保持不变,但图像噪声可能会增加,图像质量下降后不利于后续特征提取,影响运动信息测量精度。

值得注意的是,如果最初将 RGB 三原色颜色空间构成的彩色视频转换到 YIQ 颜色空间,并采用高斯金字塔对视

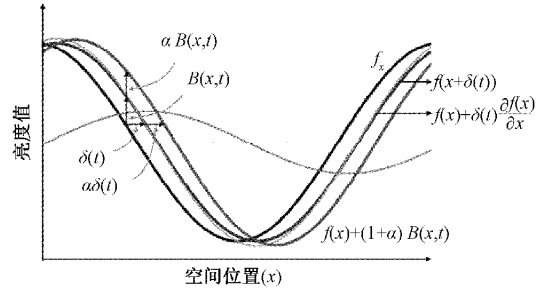


图 2 一维运动线性放大原理

频分解,对于彩色视频即可实现对颜色的放大。线性欧拉视频放大方法可以增强色彩显著度的特点,帮助它在医学研究领域备受关注。空间波长与放大因子的关系如图 3 所示。

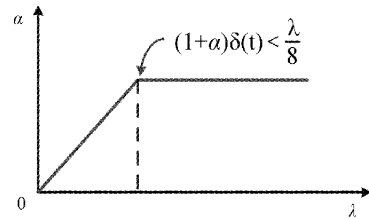


图 3 空间波长与放大因子的关系^[27]

线性欧拉视频放大方法与拉格朗日方法对比如表 1 所示。比较线性欧拉视频放大方法与拉格朗日方法,线性欧拉视频放大方法适于处理全局图像,且可以处理图像颜色变化。它通过对像素亮度的时空域联合处理,建立起了微小位移与像素亮度变化的映射关系。在放大中直接处理各像素点亮度值大小,因此对于微小运动与颜色变化都可以放大,但是同时因为直接处理像素值,会使得视频拍摄或编码的噪声干扰在像素值上的影响被放大,因而对于噪声较为敏感。

表 1 线性欧拉视频放大方法与拉格朗日方法对比

放大方法	拉格朗日放大方法	线性欧拉视频放大方法
放大思路	局部处理,特征点追踪	全局处理,像素点分析
特点	放大倍数不限制;计算量大,对特征点敏感	算法简单效率高;对噪声和大运动干扰敏感,放大倍数受限于基带空间频率
适用场景	仅放大运动	可放大运动和颜色,但不能处理大运动

2.2 预决策最优金字塔的微小运动放大

针对线性欧拉运动放大噪声严重的问题,王霞等^[28]提出了预决策金字塔层数的欧拉视频微小运动放大算法。该方法如图 4 中步骤(2)所示,关注于金字塔层数本身影响,在欧拉视频放大前预先通过实验,运动前景提取帧后,依据

黑色像素数目最大帧中非 0 像素点个数占比情况,选择放大视频的最优金字塔层数。

通过预先判断金字塔层数,此方法有效改善使用单一层数的金字塔进行欧拉视频放大的效果。可以发现,对于小幅运动视频,低金字塔层数放大效果更明显,但噪声仍较为严重;而较大幅运动则更适合高金字塔层数来提升放大效果,但层数过高反而不再放大。

2.3 基于图像序列的细微运动放大技术

针对欧拉线性运动放大容易放大噪声造成图像模糊不清的问题,另一种基于图像序列的细微运动放大方法(subtle motion magnification algorithm for image sequences, SMMA)^[29]通过 3 大步骤实现运动细节的清晰放大。如图 4 中步骤(3)所示,首先通过对输入帧进行空间分解、时间过滤得到新图像序列;其次通过对新图像序列颜色显著图与签名显著图分析,进行运动区域检测,获取准确微小运动区域;最终对于运动区域内像素提高清晰度,实现运动细节增强。在线性欧拉运动放大的基础上改进,更准确表征了微小运动,在客观量化指标上效果优良。

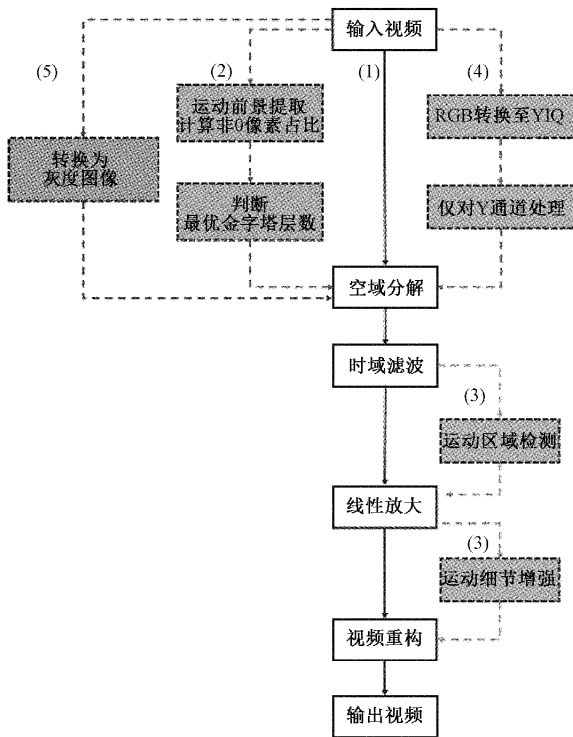


图 4 线性欧拉视频放大及几种改进方法框架

该方法中 3 大模块依次递进,更好的描述细微运动细节,减少了放大后的图像序列产生的瑕疵。通过与 EVM 对比发现,输出后图像序列在运动区域清晰度、平均梯度上均有了很大的提高。

2.4 线性欧拉视频放大的加速方法

进行颜色放大时,原始欧拉线性运动放大将 RGB 颜色空间转成到 YIQ 空间后,对 YIQ 3 个通道均进行分解、放

大、重建的处理方式十分耗时。一种提升放大速率的思路为选择单颜色通道进行处理,在保证处理效果良好的基础上,以达到快速放大微小运动的目的。首先将视频 RGB 颜色转换为 YIQ 颜色再继续处理,针对此过程,一种基于 Y 通道的欧拉视频放大在 I、Q 通道不变情况下仅对 Y 通道处理,流程如图 4 中步骤(4)所示。在放大效果、抗噪效果基本不变的情况下提高视频运动放大速度,理论上可以达到 60% 以上,此方法适用于绝大多数微小运动放大,且避免了混叠失真现象^[30-31]。

同理,一种基于灰度图像的微小运动放大方法在欧拉线性运动放大基础上,不进行 RGB 到 YIQ 色彩的空间变换,而是在放大前进行灰度转化,如图 4 中步骤(5)所示,避免了放大后彩色视频转换为灰度图造成的信息丢失问题,大大减小了误差,同时简化了运算,处理速度得到显著提升^[32]。

线性欧拉视频放大开创了从欧拉视角对于微小运动进行放大的先河,但放大过程中对噪声的放大也对最终视频质量有着较大影响,放大速度上由于 RGB 到 YIQ 的颜色变换也存在耗时问题。

针对上述问题,从线性欧拉视频放大的原理进行分析改进,在放大前决策最优金字塔层数的放大方法有效改善了放大效果,但噪声问题仍有待解决;基于图像序列的细微运动放大方法通过图像序列时空处理、区域检测与运动增强 3 大模块,大大减小放大后视频瑕疵,提高视频清晰度;而基于 Y 通道和灰度图像的放大方法,使得放大过程耗时降低,有效提升放大速度。

2.5 基于相位的欧拉视频放大方法

以上几种方法及改进主要是基于线性欧拉视频放大的思想,进行流程的精简或修改,统归于典型的线性欧拉视频放大方法。它们在改进思路各有不同,改进后处理的效果也不同,在应用中都还存在一些局限性各方法特点如表 2 所示。

不同于线性欧拉视频对于像素值本身进行处理,Wadhwa 等^[33]提出一种基于相位的运动放大技术,该方法对于线性欧拉视频放大技术的改进,采用复可控金字塔进行图像空间域分解,从而得到各个方向与尺度的振幅和相位信息,再进行时域带通滤波选取目标范围频段,通过放大相位实现对于微小运动放大。基于相位的视频放大算法的核心在于相位放大。对于一维时域微弱运动 $f(x)$ 转换到频域,对其傅里叶变换表示为:

$$f(x) = \sum_{\omega} A_{\omega} e^{i\phi_{\omega}} e^{-i\omega x} \quad (1)$$

其位移函数 $\delta(t)$, t 时刻 $f(x - \delta(t))$ 频域变换表示为:

$$f(x - \delta(t)) = \sum_{\omega} A_{\omega} e^{i(\phi_{\omega} + \omega\delta(t))} e^{-i\omega x} \quad (2)$$

两时刻的相位差为 $B_{\omega}(x, t) = \omega\delta(t)$, 对于微小运动,对应频率相位差放大 α 倍后,形成新的放大后信号为:

$$\sum_{\omega} A_{\omega} e^{i(\phi_{\omega} + \omega\delta(t))} e^{-i\omega x} e^{i\alpha\omega\delta(t)} = \sum_{\omega} A_{\omega} e^{i(\phi_{\omega} + (1+\alpha)\omega\delta(t))} e^{-i\omega x} \quad (3)$$

表 2 欧拉放大不同改进方法及特点

放大方法	改进优势	存在问题
预决策金字塔层数	预先决策最优效果金字塔层数,有效改善使用单一层数的金字塔进行欧拉视频放大的效果	小幅运动低金字塔层数放大更明显但噪声较严重;较大运动适于高金字塔层数但层数过高不再放大
SMMA	3大模块依次递进,更好描述细微运动细节,减少了放大后的图像序列产生的瑕疵	受 EVM 算法缺陷影响容易导致画面变形
Y-通道	提高视频运动放大速度理论达到 60% 以上,适用于绝大多数微小运动放大,避免混叠失真现象	运动放大实际提速有差异,存在不明显现象
灰度转化	避免了放大后彩色视频转换为灰度图造成的信息丢失问题,大大减小了误差	灰度图像失去颜色信息,不适于颜色放大
PVM	平移噪声而不放大,支持更大放大倍率,提高了抗噪性能	算法较复杂,速率较低,容易受 2π 相位阶跃限制产生伪影
Riesz	简化计算量,保证图像质量的同时实现了计算速度的大大提高	算法较 EVM 仍比较复杂
局部 Riesz	消除了方向的任意性,降低了过完整性	对于运动幅度要求高,处理对象不能大幅运动

即 $f(x + (1 + \alpha)\delta(t))$ 的频域表示。该方法在实际相位放大操作时,放大倍数同样有上限,其放大倍率与图像空间波长的关系为:

$$\alpha\delta(t) < \frac{\lambda}{4} \quad (4)$$

由于该方法对相位处理而不改变幅值,在放大信号同时不会放大噪声,只会对噪声进行平移,从而有效抑制了图像噪声,同时可以支持更大的放大倍数。但是采用复可控金字塔带来的巨大计算量也影响了运行效率,同时基于相位的处理容易受到 2π 相位周期变化限制,会产生伪影噪声影响图像质量。

针对计算量大的问题,Wadhwa 等^[34]提出一种新的紧凑图像金字塔表示法,即基于 Riesz 金字塔的快速 PVM 算法,该方法采用 Riesz 图像金字塔代替复可控金字塔,仅沿主导方向移动图像特征,允许实时实现基于相位的运动放大,在保证图像质量的同时实现了计算速度的大大提高,且计算量与线性欧拉视频放大方法接近。

之后,Takeda 提出了一种局部 Riesz 金字塔的新分解技术^[35],该方法只检测主导方向的局部相位变化,消除了方向的任意性,降低了过完整性,从而在保持与之前相当的放大效果下实现了更加高速处理。

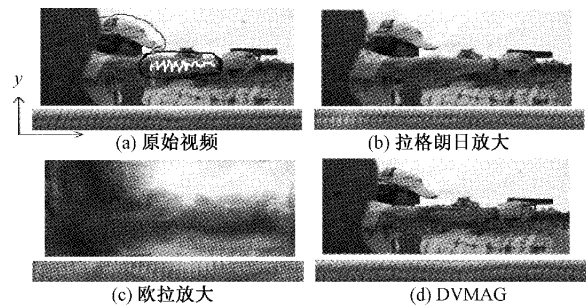
3 面向应用的运动放大方法改进

3.1 大运动干扰

通常微小运动与较大运动结合在一起,当背景为大运动时,基于欧拉视角的微小运动放大会受到影响,产生显著的伪影如光晕、涟漪,从而覆盖小运动。因此针对大运动下的微小运动放大,涌现出了许多改进方法。

Elgharib 等^[36]提出一种基于层的动态视频运动放大方法(dynamic video motion magnification, DVMAG),该方法结合拉格朗日思想与欧拉思想,需要人工选取感兴趣

区域,利用正则化参数运动模型降低目标区域的全局运动,利用层分解和铺垫处理微小运动与背景的边界,通过对前景层和蒙版应用欧拉视频放大技术,显著减少了伪影。在图 5 所示的开枪时人手臂上下移动的放大情况及手臂运动的时空切片,图 5(b)拉格朗日放大不能展示变化细节,图 5(c)欧拉放大结果严重模糊,图 5(d)DVMAG 方法显著放大了手臂随时间推移的运动。而 DVMAG 涉及到人工选择 ROI,容易产生误差,处理效率较低,在对运动层放大时,也可能出现边缘空洞等问题。

图 5 不同方法放大手臂振动^[36]

基于观察发现短时间内较大运动基本为线性运动且微小运动偏离该线性运动,因此一种基于拉普拉斯滤波的加速度因子放大算法(eulerian video acceleration magnification, EVAM)^[37]将放大一次项改为放大二次项,一次项即线性项,二次项即加速度项,放大二次项相比于一次项就可以很好抑制较大线性运动干扰,并且该方法仅需要欧拉方法放大,不需要光流法、时间对齐等,简化了放大过程。

同时,在 EVAM 的基础上,Xue 等^[38]提出了一种改进的基于多尺度自适应因子的欧拉加速度运动放大方法^[34],根据金字塔分量的空间频率自适应地选择相应放大因子,根据复可控金字塔确定不同尺度下的空间代表波长,再

根据空间波长设置不同尺度的放大系数,可以处理叠加在运动物体上的微小变化的放大。EVAM 和多尺度自适应因子放大相比欧拉相位放大更有效展示了物体振动情况,多尺度自适应因子放大相比 EVAM 结果更清晰,减轻了模糊失真现象。

Takeda 等^[39]提出一种新的 Jerk 感知的视频微小运动放大算法(jerk-aware eulerian video acceleration magnification),该方法关注 Jerk 的特征,即位移的三阶时间导数,表示单位时间内加速度变化率。利用该三次项,也就是加速度变化率进一步掩模加速度项,从而得到更加平滑的小运动数据。

如图 6 所示,在放大处理高尔夫挥杆过程时,Jerk 感知欧拉放大方法相比其他方法仅放大铁轴细微变形,而没有其他方法中由于球杆快速摆动引起的伪影。由于细微变化的 Jerk 值比快速大运动 Jerk 值低,在时间尺度上更平滑,因此利用 Jerk 感知可以通过把握平滑度的差异将细微运动与快速大运动分隔开,实现快速大运动中有效放大微小运动。

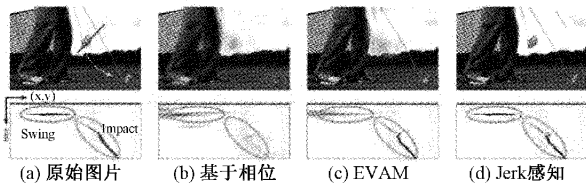


图 6 挥杆时球杆微小变化放大^[39]

针对上述方法可以看出,EVAM 解决了在线性大运动干扰下放大微小运动的问题,而 Jerk-aware EVAM 解决了在快速大运动干扰下放大微小运动的问题,DVMAG 将视频分层分隔大运动从而显著减少伪影,但是人工选区容易导致产生误差,分层放大容易产生边缘空洞,而多尺度自适应因子放大无需人工选区标注而提高视觉质量,但是多尺度放大方法也更加耗时,且仍对非线性运动处理能力较弱。

3.2 放大参数选取过程优化

通过 EVM 和 PVM 算法流程可知,在空域分解时金字塔层数的选择、时域滤波时滤波器类型、滤波频率、放大倍率等参数,直接影响放大效果及放大后视频噪声质量。通常 EVM 和 PVM 对于未知视频进行处理,需要根据先验条件人为选择带通滤波器及相应通频带参数,较为耗时且难以操作。

针对此问题,Sushma 等^[40]提出了一种半自动的视频微小运动放大方法(semi-automated magnification of subtle motion in video, SAM),利用视频前两帧中获取的信息自动确定放大倍率参数,但由于此方法仅用少量视频帧进行分析,信息量较小因而结果误差偏大。

针对此情况,雷林等人基于视频中微小运动信息得到功率谱,通过分析视频在低分辨率下频率响应,估计中心

频率,进而聚类分析并依据分布频带设计带通滤波参数^[41]。但由于该方法只能得到一组固定参数,信息不够准确且较为局限,更适合于单一频率或频率变化不大的视频放大。

为了对于多频率视频有效放大,一种基于 S 变换的微小运动自动检测及放大技术提出了新的改进^[42],利用 S 变换对不同时刻呈现不同频率的运动信号分析处理,从而得到随时间变化的动态频率值,根据动态频率设计滤波器参数,实现了变频率视频自动设计带通滤波器参数,同时可以在一定程度上抑制噪声干扰^[38]。

根据式(4)可知放大倍率的上限值与视频图像的空间波长相关,提出通过计算第一帧图像的空间频率,估计空间波长的大小,得到实际视频数据的放大倍率因子的上限范围,进一步通过限定通频带等参数约束,获得高质量的运动放大视频。

空间波长空间频率是一种图像质量指标,用来衡量图像中的整体活动水平^[43],对于 $M \times N$ 像素的图片,行频 RF 和列频 CF 可通过式(5)和(6):

$$RF = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{k=1}^{N-1} [F(j, k) - F(j, k-1)]^2} \quad (5)$$

$$CF = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{j=1}^{M-1} [F(j, k) - F(j-1, k)]^2} \quad (6)$$

空间频率与行频和列频的关系如式(8)所示,空间波长即可计算得到。

$$SF = \sqrt{RF^2 + CF^2} \quad (7)$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{SF} \quad (8)$$

该放大参数优化思路借助于标准振动台微振动实验验证。如图 7(a)所示,在一维标准振动台上振动轻质量块及靶标作一维正弦运动,振动频率可控。经单目高速视觉系统采集,目标及背景视频的空间波长约为 17 个像素,其单方向原始微小振动情况如图 7(b)所示。采用基于相位的视频放大方法,其放大倍率上限约为 4,如图 7(c)和图 7(d)所示,当放大倍率超过上限,视觉上显示不会继续提升放大效果,经运动信息提取后验证运动放大效果不具有显著性。经实验验证,计算实际应用时的空间频率可以快速锁定有效放大倍率,该方法优化了欧拉视频运动放大的参数选取过程,简化了运动放大方法的使用复杂性。

3.3 基于图像深度信息与深度学习的视频放大技术

传统 EVM 和 PVM 主要都基于欧拉视角的算法进行改进分析,而随着 RGB+D 相机的兴起,深度信息更容易获取,利用图像深度信息感知的视频放大算法(depth-aware motion magnification, DAMM)运用图像深度信息抵抗大运动干扰以及改善目标物遮挡问题,可以有效解决人工选择 ROI 造成的边缘泄露,实现对目标微小运动的放大^[44]。但是引入额外的图像深度信息,也带来了较大计算量。

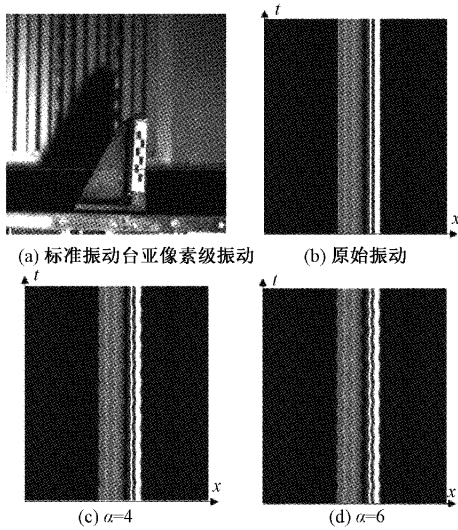


图 7 基于图像空间频率的运动放大优化实验验证

随着深度学习的快速发展, Hyun 等^[45] 在 2018 年 ECCV 会议中提出将视频运动放大方法与深度学习融合的方法。基于深度学习的微小视频运动放大方法 (learning-based video motion magnification) 通过设计由空间分解滤波器、放大器和重建滤波器 3 部分组成的网络^[46], 如图 8 所示, 使用两帧输入和放大的差值作为目标简化训练, 利用深度卷积神经网络学习得到空间域滤波器, 基于频率特性的时域滤波来选取感兴趣频段的微小运动进行放大, 实现了微小运动的高质量放大, 同时减少振动伪影现象, 具有良好抗噪性能, 但是也存在放大后视频时域连贯性降低等问题。

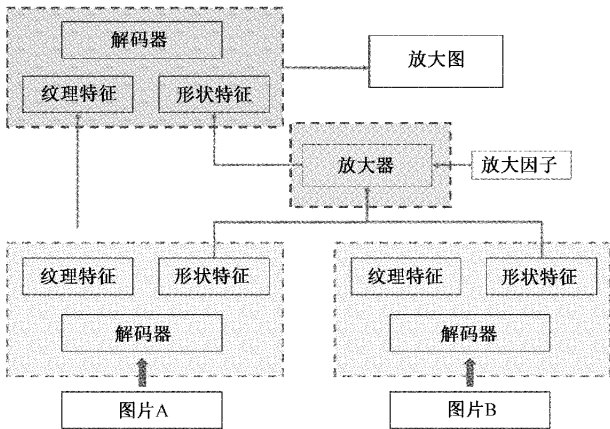


图 8 基于深度学习的微小运动放大方法框架^[46]

此外, 结合传统算法和课程学习的策略, 基于 SPNet 的视频运动放大方法^[47] 采用分层训练的策略, 将金字塔低分辨率层运动的信号参数与高分辨率层共享, 在学习过程中由底层逐渐往上, 实现了在更少振铃伪影现象下的高质量放大, 并保持了存在大幅度运动下的视频细节。

基于深度信息的放大方法充分利用相机深度信息, 对于大运动干扰有较好抵抗性。基于深度学习和 SPNet 的

放大方法处理时间上相比于传统微小运动放大方法更有优势, 相比之下 SPNet 方法成像质量更高。可以看出, 以上方法均以欧拉运动放大原理为核心, 通过增加深度信息描述、结合神经网络或深度学习等方式, 提升视频运动放大的质量, 后续通过形状特征和纹理特征的提取, 可以有效提高振动频率和幅度的测量精度, 是对欧拉运动放大方法有效的拓展研究。

4 结 论

基于机器视觉的运动放大有效实现了对于微小运动信息的分析, 有着广泛的应用前景, 但在实际应用中容易受到金字塔模型的 2π 相位限制, 超过部分会在新的视频中产生伪影, 从而影响最终结果。针对微幅振动测不准的问题, 以机器视觉技术为手段, 围绕欧拉运动放大的微小振动测量方法, 诸多学者以欧拉线性放大及相位运动放大原理为核心, 在降低放大伪影噪声、提高算法计算效率等方面拓展了多种加速增强质量的改进方法等。

欧拉运动放大方法适用于微幅运动, 在含有大运动干扰的情况下, 微小运动划分和滤波器环节的参数简化、滤波性能优化设计, 是进一步发展亟需解决的关键问题。放大方法在对大运动失效的同时, 大运动放大引入的图像伪影, 严重影响测量。同时, 欧拉运动放大算法原理上基于时空独立的假设, 分别设计独立的空域及时域滤波器来提取微小运动信息, 忽视了时空域的关联, 如何在金字塔分解后优化滤波器在时域以及空域中的兼容性, 可能对欧拉运动放大的方法有性能较大提升。

同时将深度学习与欧拉运动放大的融合方法的发展也在蓬勃发展。在不考虑时间成本的基础上, 通过深度学习方法进行大数据量的网络结构训练, 学习得到的滤波器更好得兼容线性时间滤波器, 时间表征更好地结合运动变化过程, 也是一个具有发展前景的方向。

参 考 文 献

- [1] 宋帅帅, 黄锋, 江燕斌. 基于机器视觉几何量测量技术研究进展分析[J]. 电子测量技术, 2021, 44(3): 22-26.
- [2] 唐寒冰, 巢渊, 刘文汇, 等. 基于机器视觉的大尺寸零件测量方法研究综述[J]. 电子测量技术, 2021, 44(17): 33-40.
- [3] 郑太雄, 江明哲, 冯明驰. 基于视觉的采摘机器人目标识别与定位方法研究综述[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(9): 28-51.
- [4] 刘子琦. 基于计算机视觉的高铁桥梁结构位移测量方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [5] 常浩. 基于机器视觉的柔性体振动测量系统研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- [6] 熊文, 程瑜. 基于高帧视频分析的桥梁振动与模态非接触识别算法[J]. 东南大学学报(自然科学版),

- 2020, 50(3): 433-439.
- [7] SARRAFI A, MAO Z, NIEZRECKI C, et al. Vibration-based damage detection in wind turbine blades using phase-based Motion Estimation and motion magnification [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2018, 421:300-318.
- [8] AL-NAJI A, CHAHL J. Contactless cardiac activity detection based on head motion magnification [J]. *International Journal of Image and Graphics*, 2017, 17(1).
- [9] 刘今越,刘浩,贾晓辉,等. 基于视觉的非接触呼吸频率自动检测方法[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(2): 51-58.
- [10] RÉTHORÉ J, MORESTIN F, LAFARGE L, et al. 3D displacement measurements using a single camera[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 57:20-27.
- [11] LEVENT S, OLCAY O. The effects of spatial offset, temporal offset and image speed on sensitivity to global motion in human amblyopia [J]. *Vision Research*, 2013, 86:59-65.
- [12] SAKAINO H. Camera-vision-based water level estimation[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(21): 7564-7565.
- [13] DARRAGH L, MYRA L, MARTINEZ D R J, et al. Development and field testing of a time-synchronized system for multi-point displacement calculation using low-cost wireless vision-based sensors [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(23):9744-9754.
- [14] 吴建霖,蒋理兴,李晨阳,等. 基于单目红外的远距离多测点振动测量方法[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(9): 255-263.
- [15] ROTHBERG S J, ALLEN M S, CASTELLINI P, et al. An international review of laser Doppler vibrometry: Making light work of vibration measurement[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 99: 11-22.
- [16] 朱峰,赵长德. 加速度计测量大振幅运动的一种低成本方法[J]. *仪器仪表学报*, 2001,(S1): 370-371.
- [17] 陈亚军,孙胜洁,季春明. 三维数字图像相关技术(3D DIC)在材料形变研究中的应用进展[J]. *航空材料学报*, 2017, 37(4): 90-100.
- [18] 陈凡秀,陈旭,谢辛,等. 多相机 3D-DIC 及其在高温变形测量中的应用[J]. *实验力学*, 2015, 30(2): 157-164.
- [19] 贾书海,乐开端,谭玉山. 便携式数字散斑测振仪研究[J]. *仪器仪表学报*, 2000,(4): 388-391.
- [20] 李成美,白宏阳,郭宏伟,等. 一种改进光流法的运动目标检测及跟踪算法[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(5):249-256.
- [21] 伍济钢,王刚,蒋勉,等. 光流点匹配跟踪的薄壁件振动模式测试方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2017, 31(6):850-857.
- [22] 尹爱军,张泉,戴宗贤,等. 离面振动光流分析方法研究[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(10): 8-23.
- [23] DAVIS C Q, FREEMAN D M. Using a light microscope to measure motions with nanometer accuracy [J]. *Optical Engineering*, 1998, 37(4): 1299-1304.
- [24] 袁博. 微小运动放大技术研究概述[J]. *现代工业经济和信息化*, 2016, 6(18): 66-67.
- [25] LIU C, TORRALBA A, FREEMAN W T, et al. Motion magnification [J]. *ACM Transactions on Graphics(TOG)*, 2005, 24(3):519-526.
- [26] WU H Y, RUBINSTEIN M, SHIH E, et al. Eulerian video magnification for revealing subtle changes in the world [J]. *ACM Transactions on Graphics(TOG)*, 2012, 31(4).
- [27] 米悦丰. 基于视频图像的微小运动放大算法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2020.
- [28] 王霞,付晓静,王楠,等. 预决策金字塔层数的欧拉视频微弱运动放大算法[J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(1): 114-118.
- [29] 訾玲玲,丛鑫. 一种图像序列的细微运动放大算法[J]. *小型微型计算机系统*, 2016, 37(5): 1066-1070.
- [30] 李乐鹏,雷林,孙水发,等. 视频微小运动放大的加速方法[J]. *计算机工程与应用*, 2015, 51(24):195-200,204.
- [31] 李乐鹏. 基于微小运动放大的视觉增强及其应用研究[D]. 宜昌:三峡大学, 2015.
- [32] 何永明,陈向阳. 视频微小运动放大的灰度图像方法[J]. *计算机与数字工程*, 2019, 47(8): 2022-2026,2043.
- [33] WADHWA N, RUBINSTEIN M, DURAND F, et al. Phase-based video motion processing[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2013, 32(4):1-10.
- [34] WADHWA N, RUBINSTEIN M, DURAND F, et al. Riesz pyramids for fast phase-based video magnification[C]. 2014 IEEE International Conference on Computational Photography(ICCP), IEEE, 2014: 1-10.
- [35] TAKEDA S, ISOGAI M, SHIMIZU S, et al. Local riesz pyramid for faster phase-based video magnification: Special section on picture coding and image media processing [J]. *IEICE Transactions on Information and Systems*, 2020, 103(10):2036-2046.

- [36] ELGHARIB M A, HEFEEDA M, DURAND F, et al. Video magnification in presence of large motions [C]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2015: 4119-4127.
- [37] ZHANG Y C, PINTEA S L, VAN GEMERT J C, et al. Video acceleration magnification [C]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017: 529-537.
- [38] XUE B, ZHENG S, XUE W. Multi-scale adaptive factors video acceleration magnification [J]. Signal Processing: Image Communication, 2019, 71:36-44.
- [39] TAKEDA S, OKAMI K, MIKAMI D, et al. Jerk-aware video acceleration magnification[C]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018: 1769-1777.
- [40] SUSHMA M, GUPTA A, SIVASWAMY J. Semi-automated magnification of small motions in videos[C]. International Conference on Pattern Recognition and Machine Intelligence. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013: 417-422.
- [41] 雷林, 李乐鹏, 李准, 等. 自动检测及放大视频中的微小运动[J]. 小型微型计算机系统, 2016, 37(9): 2120-2124.
- [42] 雷林, 李乐鹏, 杨敏, 等. 基于 S 变换的非平稳微小运动自动放大[J]. 计算机应用, 2017, 37(5):1460-1465.
- [43] ESKICIOGLU A M, FISHER P S. Image quality measures and their performance [J]. IEEE Transactions on Communications, 1995, 43 (12): 2959-2965.
- [44] KOOIJ J F P, VAN GEMERT J C. Depth-aware motion magnification [C]. European Conference on Computer Vision. Springer, Cham, 2016: 467-482.
- [45] OH T H, JAROENSRI R, KIM C, et al. Learning-based video motion magnification[C]. Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV), 2018: 633-648.
- [46] 张骁, 但志平, 刘龙文, 等. 视频运动放大方法研究[J]. 电脑编程技巧与维护, 2022, (2):144-146.
- [47] 周飞, 杜振龙. 基于 SPNet 的视频运动放大方法[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(12):3820-3824.

作者简介

朱美意, 博士, 主要研究方向为视觉振动测量、结构健康监测技术。

E-mail: myzhu1997@163.com