扰动测量环境中基于图像序列的模态参数识别

李 晶 程 伟

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对结构模态参数识别,提出了一种基于二维连续图像序列的识别方法.该方法以CCD相机采集的图像序列为基础,在待识别结构上选取一定数量的特征点,运用因子分解法将结构运动参数和外形信息分离开,得到各特征点的运动轨迹,通过实施特征系统实现算法(ERA, Eigen-system Realization Algorithm)识别出结构的模态参数.特别是当测量仪器,即CCD相机受到扰动时,能够从图像序列中分离扰动,得到结构自身的运动参数,保证较好的识别效果.以相机受扰动时,悬臂梁模型为例进行了仿真分析.将识别出的悬臂梁前5阶频率与ANSYS计算结果进行对比,结果吻合很好,对于工程中利用光学图像识别结构动态特性具有较高的参考价值.

关 键 词: 扰动; 图像序列; 因子分解法; 模态参数识别

中图分类号: TB 123

文献标识码: A 文章编号: 1001-5965(2009)09-1100-04

Modal parameter identification based on image streams under disturbance measurement environment

Li Jing Cheng Wei

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: To aim at structure modal parameter identification, a method based on a sequence of 2D images was proposed. Chose certain feature points from the object whose modal parameter need to be identified. Factorization method was employed on the image streams taken by CCD camera to solve structure from motion problem and obtain motion track of each point. Eigen-system realization algorithm (ERA) was used to identify modal parameter of structure. Especially when the measure equipment, that is CCD camera was disturbed, it can separate disturbance through image streams and get structure motion parameter, so that the identification result was ensured. A simulation model of cantilever beam under disturbed measurement environment was analyzed. It shows that the first five frequencies of the beam coordinating well with the ANSYS calculation result, which offers high significance to the dynamic characteristic identification using optic images in project programs.

Key words: disturbance; image streams; factorization method; modal parameter identification

传统的振动测试设备,如激光测振仪等,对环境要求比较高,一旦测振仪受到扰动,测试精度就会大大降低.而利用光学图像测量具有非接触、全场测量和高精度三大重要特点.非接触使得对被测物不用加任何限制,独立、客观地进行静态或动态测量.这使许多不能在被测物上附加传感器的测量成为可能,且更客观和直观[1].

另外,图像反映与视觉相关的信息,是客观世界的物体直接或间接作用于人眼而产生的视知觉实体.“图像”包含的信息量不仅有灰度,还有色彩;不仅有平面,还有立体等,其内容极为广泛.将光学图像引入到工程问题中,使之与力学问题结合,通过寻找合适有效的算法得到物体的运动信息和模态参数.如果这种方法能在静止环境甚至

收稿日期: 2009-07-24

基金项目: 航空科学基金资助项目(20071551016)

作者简介: 李 晶(1984-),女,甘肃兰州人,硕士生, lijing@ase.buaa.edu.cn

扰动测量环境中实现, 则不仅可以通过相机拍摄的图像序列解算桥梁等建筑物的模态参数, 为后续研究分析提供可靠的数据, 还可以将其应用于机载或舰载瞄准设备, 进行目标跟踪物体的运动分析等等.

1　理论基础

1.1　因子分解法

用图像辨识模态参数的关键问题是将图像中包含的物体外形信息和运动信息分离开. 文献[2-4]提出了一种因子分解法, 该方法忽略物体深度及各个图像在深度方向的变化, 采用正交投影模型, 将测量矩阵分解为外形矩阵和运动矩阵的乘积. 当恰当选取特征点时, 能获得很好的效果.

选取物体坐标系, 原点取在所有特征点的质心, 外形坐标的 x 轴和 y 轴分别沿着初始位置时相机传感器的行和列, z 轴沿相机光轴方向[5]. 物体和其投影图像间的关系如图 1所示.

由图 1可得, 第 F 帧图像中特征点 P 的位置向量 $\boldsymbol{w}_{FP}=(u_{FP}, v_{FP})^{\mathrm{T}}$, 而

$$\left.\begin{aligned} u_{FP} &= \boldsymbol{i}_F^{\mathrm{T}} s_P - p_F \\ v_{FP} &= \boldsymbol{j}_F^{\mathrm{T}} s_P - q_F \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

将各特征点的坐标组成测量矩阵 $\boldsymbol{W}$, 即

$$\boldsymbol{W}=\left[\begin{array}{cccc} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1P} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2P} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{F1} & u_{F2} & \cdots & u_{FP} \\ \hline v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1P} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2P} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{F1} & v_{F2} & \cdots & v_{FP} \end{array}\right] \tag{2}$$

又

$$\boldsymbol{W}=\boldsymbol{R}\boldsymbol{S}+\boldsymbol{t}\cdot\boldsymbol{1}^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

式中, $\boldsymbol{R}$ 为旋转矩阵; $\boldsymbol{S}$ 为外形矩阵; $\boldsymbol{t}$ 为平移向量. 而

$$\boldsymbol{R}=[\boldsymbol{i}_1^{\mathrm{T}} \cdots \boldsymbol{i}_F^{\mathrm{T}} \mid \boldsymbol{j}_1^{\mathrm{T}} \cdots \boldsymbol{j}_F^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{S}=[s_1 \cdots s_P] \tag{5}$$

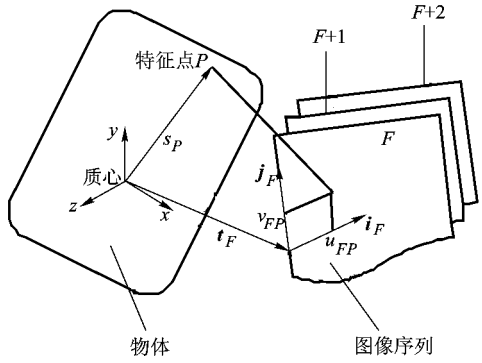
$$\boldsymbol{t}=[p_1 \cdots p_f \mid q_1 \cdots q_f]^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

$\boldsymbol{S}$ 的每一行分别表示每个特征点相对于质心的 x, y, z 坐标, 故行元素相加为 0, 即 $\boldsymbol{S}\cdot\boldsymbol{1}=[0\ \ 0\ \ 0]^{\mathrm{T}}$, 其中 $\boldsymbol{1}=(\underbrace{1, \cdots, 1}_{P})^{\mathrm{T}}$.

所以

$$\boldsymbol{W}\cdot\boldsymbol{1}=\boldsymbol{R}\boldsymbol{S}\cdot\boldsymbol{1}+\boldsymbol{t}\cdot\boldsymbol{1}^{\mathrm{T}}\cdot\boldsymbol{1}=\boldsymbol{t}P \tag{7}$$

$$\boldsymbol{t}=\frac{1}{P}\boldsymbol{W}\cdot\boldsymbol{1} \tag{8}$$



注: F为图像帧数; P为特征点数; u_{FP}, v_{FP}为第 F帧图像中的特征点 P在物体坐标系中的 x, y坐标; $\boldsymbol{i}_F$, $\boldsymbol{j}_F$ 为相机传感器行、列的方向, 且均为单位向量; $\boldsymbol{t}_F$ 为物体坐标系原点到第 F 帧图像中心的矢量, 由于只计入了沿成像平面的位移, 故平移向量 $\boldsymbol{t}$ 只含沿 $\boldsymbol{i}$, $\boldsymbol{j}$ 两个方向的分量 p 和 q, 即 $t=(p, q)$.

图 1　坐标系及投影关系

$$\left.\begin{aligned} p_F &= \frac{1}{P}\sum_{i=1}^{P} u_{Fi} \\ q_F &= \frac{1}{P}\sum_{i=1}^{P} v_{Fi} \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

至此, 得到平移向量 $\boldsymbol{t}$

令 $\boldsymbol{W}^{(\mathrm{R})}=\boldsymbol{W}-\boldsymbol{t}\cdot\boldsymbol{1}^{\mathrm{T}}$, 则

$$\boldsymbol{W}^{(\mathrm{R})}=\boldsymbol{R}\boldsymbol{S} \tag{10}$$

旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$ 有 3列, 外形矩阵 $\boldsymbol{S}$ 有 3行, 由矩阵秩的性质可知 $\mathrm{rank}\boldsymbol{W}^{(R)}\leqslant 3$, 即, $\boldsymbol{W}^{(R)}$ 至多在一个三维的列向量空间中展开. 而 $\boldsymbol{R}$ 是由 3个线性无关列向量组成的矩阵, 根据式(10), $\boldsymbol{R}$ 可作为该列向量空间的基向量.

对带有噪声的测量矩阵进行奇异值分解并施加约束条件即可获得旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$[6].

通过上述步骤, 可以得到运动物体的平移向量、旋转矩阵、以及运动矩阵, 也即获得了运动物体独立的运动信息和外形信息.

1.2　特征系统实现算法

特征系统实现算法是一种应用广泛的多输入多输出时域模态参数识别方法[7]. 它只需要很短的自由响应数据识别参数, 并且识别速度快, 对低频、密频、重频有很强的识别能力, 更重要的是能得到系统的最小实现, 便于控制应用, 目前在国外航空航天领域应用广泛[7-8]. 为得到最小实现, 系统的输入输出必须满足可控性和可观性要求. 对动力学系统而言, 可控和可观要求激励点和传感器布置点不在所研究模态的节点上. 当激励点或所有传感器均在某阶模态的节点上时, 该模态无法识别. 从力学角度解释, 当激励点处于节点上, 激励能量就不能输入该模态, 该模态运动就不能被激发出来; 另一方面, 传感器测量的响应是系统

响应的子集, 当所有传感器均处于某阶模态节点上 (其位移为 0), 在测量子集范围内不含该模态成分, 因此, 在这两种情况下, 会产生系统模态遗失的现象. 对于采样时间长度而言, 特征系统实现算法仅用半个周期的数据就可准确识别出系统的模态参数. 综合考虑采样频率、传感器数、Hankel矩阵排列方式、系统阶数等, 还可进一步减少数据点数.

特征系统实现算法的基本思路是: 根据单位脉冲响应函数 (或自由响应) 的离散时间序列, 构成广义的Hankel矩阵, 对它进行特定的线性变换和奇异值分解, 获得状态方程和观测方程中的系数矩阵 $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$ 和 $\boldsymbol{C}$, 得到固有频率和阻尼比, 分别由 $\boldsymbol{B}$ 和 $\boldsymbol{C}$ 得到模态贡献因子和振型.

2 算例分析

以扰动测量环境中的悬臂梁为例, 如图 2所示, 梁的长、宽、高分别为 100 cm, 5.5 cm, 0.68 cm, 材料参数为: 弹性模量 $E = 2.1 \times 10^{11}$ Pa, 密度 $\rho = 7\,800$ kg/m^3, 泊松比 $\mu = 0.3$

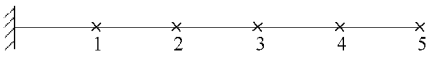


图 2 悬臂梁模型

假设相机所受扰动为每秒顺时针旋转 90°, 沿 x、y 方向分别平移 -5 cm. 则根据运动的相对性, 相机所受扰动可转化为相机静止时悬臂梁相对于相机所受的基础扰动, 扰动形式为每秒逆时针旋转 90°, 沿 x、y 方向分别平移 5 cm. 以下即用悬臂梁所受基础扰动来代替相机所受扰动, 则悬臂梁在基础扰动下自初始时刻至第 3 s的运动如图 3所示.

2.1 基础扰动的分离

任找一处于基础扰动中的矩形参照物, 长、宽均为 10 cm. 该参照物自身不做运动, 只受基础扰动作用. 在矩形参照物中取 4个点作为特征点, 此处选取 4个顶点, 以初始时矩形质心为坐标原点, 得到矩形参照物上特征点的运动, 如图 4所示.

通过因子分解法, 得到平移向量:

$$\boldsymbol{t} = [0 \quad 5 \quad 10 \quad 15 \quad 0 \quad 5 \quad 10 \quad 15]^{\mathrm{T}} \tag{11}$$

旋转矩阵:

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{12}$$

式 (12) 表示相机相对于矩形参照物每次顺时针旋转 90°, 由于运动的相对性, 则矩形相对于

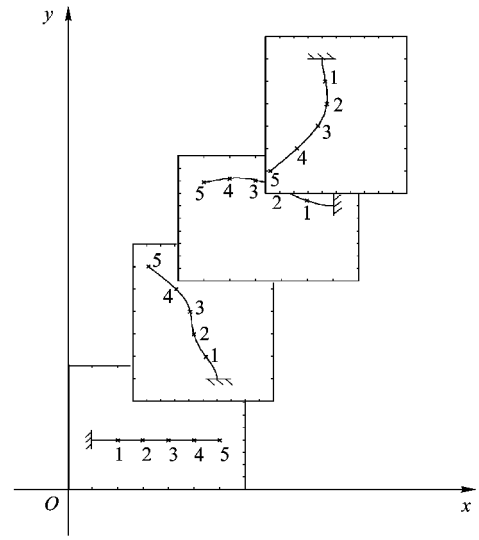
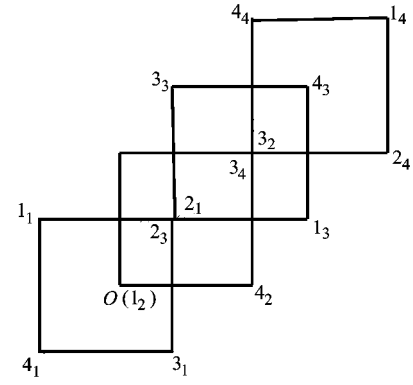


图 3 0~3 s时, 悬臂梁在基础扰动下的运动
(为使效果明显, 图中放大了平移量)



注: 图中下标 i(i=1, 2, 3, 4)表示第 i次运动后各特征点的位置.

图 4 矩形参照物上特征点运动示意图

相机的运动为每次逆时针旋转 90°. 由于每幅图的时间间隔为 1 s, 故可得矩形的旋转速度为逆时针 90(°)/s, 此即为基础扰动的旋转分量; 平移分量根据式 (11) 和时间间隔即可获得.

2.2 悬臂梁前 5阶频率识别

将悬臂梁等分为 5段, 除固支端外, 对其余 5个等分点进行编号, 且每个等分点用红色“×”标识. 设相机分辨率为 100帧/s, 拍摄时间为 5 s. 首先在 1点处加一脉冲激励, 取前 0.5 s数据进行分析, 得到悬臂梁的包括初始位置在内的响应图形共 51帧. 提取出每帧中标识点的像素坐标, 转换为以梁质心为原点的物理坐标. 通过因子分解法分别得到每个特征点从 0~0.5 s内每隔 0.01 s的 51个运动轨迹, 通过对应时刻位移的矢量运算, 从该运动轨迹中分离掉已经得到的基础扰动, 得到每个特征点在无扰动情况下的运动轨迹[9]. 将这些轨迹拟合成曲线, 得到 1点处施加脉冲激励时各特征点的响应曲线如图 5所示.

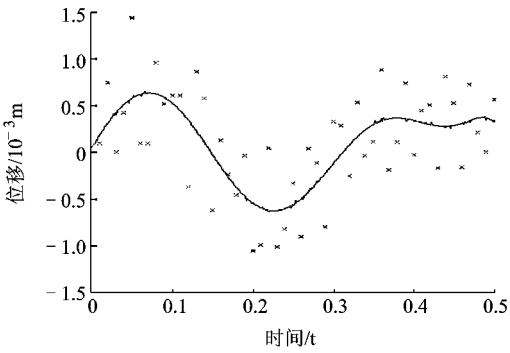


图 5　1点施加脉冲激励时各特征点的响应曲线

同理,分别在 2,3,4,5点施加脉冲激励,也可以得到各特征点的响应曲线.加密拟合曲线上的采样点,从初始时刻开始,以采样频率为 0.001 s进行数据重采集[10].通过特征系统实现算法对所有数据进行处理,得到该悬臂梁的前 5阶频率分别为 5.695 4 Hz,35.574 3 Hz,97.187 1 Hz,177.223 0 Hz,331.712 8 Hz.为了验证算法的可靠性,将该悬臂梁模型输入 ANSYS有限元分析软件中进行计算,得其前 5阶频率分别为 5.697 5 Hz,35.721 0 Hz,100.320 0 Hz,198.150 0 Hz,328.830 0 Hz,结果分析如表 1所示.

表 1　悬臂梁前五阶频率计算结果比较

方法	图像法计算结果	ANSYS计算结果	相对误差/%
第 1阶频率/Hz	5.695 4	5.697 5	0.037
第 2阶频率/Hz	35.574 3	35.721 0	0.411
第 3阶频率/Hz	97.187 1	100.320 0	3.123
第 4阶频率/Hz	177.223 0	198.150 0	6.524
第 5阶频率/Hz	331.712 8	328.830 0	8.428

可见,悬臂梁模型的频率计算相对误差随阶次升高而增大,但前 5阶计算误差都保持在 10%以内.出现这一结果的原因首先是相机分辨率较低,导致响应拟合曲线精度较低,随阶次升高,这一影响逐渐明显.另外,标识的特征点数太少,因而不能充分代表整个梁结构的运动形态,对于高阶运动,由于运动形态更为复杂,因此影响也更为明显.

至此,就识别出了扰动测量条件下,即相机在拍摄时存在抖动的情况下悬臂梁的模态参数.

3　结　论

本文提出了一种利用物体的图像序列进行模态参数识别的方法.并以悬臂梁为算例,使其处于扰动测量环境中,对其运动进行仿真来识别梁的振动频率.通过前 5阶频率的识别以及与 ANSYS计算结果的比对,发现在选取合适的特征点和相机分辨率时,低阶情况下,该方法还是很可靠的.另外,该方法也适用于扰动形式,并且在理论上可以直接推广到其他较复杂结构,但此时由于结构复杂,故需要高分辨率的相机,同时选取足够多的能够充分代表结构运动形态的特征点,才能进一步提高计算精度,获得理想的效果.

参考文献 (**References**)

[1] 汤立波. 高分辨率机载 SAR地面/海面运动目标成像技术研究[D]. 北京:中国科学院电子研究所, 2006
Tang Libo. Imaging techniques of ground/sea moving targets for high resolution airborne SAR[D]. Beijing: Institute of Eletronics, Chinese Academy of Sciences, 2006(in Chinese)

[2] Tomasi C. Shape and motion from image streams[D]. Pittsburgh: School of Computer Science, Carnegie Mellon University, 1991

[3] Kanade T, Morris D D. Factorization methods for structure from motion[J]. Philosophical Transactions, 1998, 356(1740): 1153-1173

[4] Tomasi C, Kanade T. Shape and motion from image stream under orthography: a factorization method[J]. International Journal of Computer Vision, 1992, 9(2): 137-154

[5] 杜歆, 周围, 朱云芳, 等. 基于单目视觉的障碍物检测[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(6): 913-917
Du Xin, Zhou Wei, Zhu Yunfang, et al. Obstacle detection based on single view vision[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2008, 42(6): 913-917(in Chinese)

[6] 聂守平, 魏晓燕. 数字图像的奇异值分解[J]. 南京师范大学学报(自然科学版), 2001, 24(1): 59-61
Nie Shouping, Wei Xiaoyan. Singular value decomposition of digital image[J]. Journal of Nanjing Normal University(Natural Science), 2002, 24(1): 59-61(in Chinese)

[7] Juang J N, Pappa R S. An eigensystem realization algorithm (ERA) for modal parameter identification and model reduction[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1985, 8(5): 620-627

[8] Ho B L, Kalman R E. Effective construction of linear state variable models from input/output data[C]//Proceedings of the Third Annual Allerton Conference on Circuit and System Theory. Monticello, Illinois: Allerton House, 1965: 449-459

[9] 胡建军, 赵文光, 文银平, 等. 用图像处理技术进行结构动态位移监测的研究[J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2002, 19(4): 34-37
Hu Jianjun, Zhao Wenguang, Wen Yinping, et al. Research of structure dynamic displacement surveying by means of image processing technology[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Editon, 2002, 19(4): 34-37(in Chinese)

[10] 王济, 胡晓. MATLAB在振动信号处理中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 知识产权出版社, 2006
Wang Ji, Hu Xiao. Application of MATLAB in vibration signal processing[M]. Beijing: China Water Power Press, Intellectual Property Press, 2006(in Chinese)

(责任编辑:李　晶)