

基于双目视觉的振动测量及控制^{*}

邱志成, 汪先锋

(华南理工大学机械与汽车工程学院 广州, 510641)

摘要 针对柔性板的低频振动问题, 研究了一种基于双目视觉测量其低频振动和反馈的控制方法。采用视觉传感器采集柔性板振动过程中的图像序列, 通过图像处理的方法分析图像序列, 从而得到柔性板的振动信息。以此信息作为控制反馈信号, 采用最小控制合成算法 (minimal control synthesis, 简称 MCS) 抑制柔性板的振动。在相同的条件下, 比较 MCS 算法和比例微分 (proportion differentiation, 简称 PD) 算法的控制效果。实验结果验证了基于双目视觉测量和 MCS 算法的可行性, 且 MCS 算法的控制效果要优于 PD 算法。

关键词 压电柔性板; 振动控制; 双目视觉; 最小控制合成算法; 图像处理; 立体匹配

中图分类号 TH113.1

引言

随着经济的飞速发展, 航天事业也得到了新的发展。航天器的结构不断趋于大型化、柔性化和低刚度。柔性结构具有阻尼小、质量轻和模态频率低等特点, 在受到干扰时, 容易激起持续的、以低频为主的振动^[1]。如果不对此振动进行控制, 会使结构产生疲劳损伤, 影响航天器的指向精度和寿命, 甚至会使航天器失稳, 造成毁灭性的灾难, 因此必须测量和控制柔性结构的振动^[2]。

振动测量可采用压电陶瓷传感器^[3]、加速度计传感器和陀螺仪传感器等接触式测量方式, 其缺点是传感器接触柔性结构, 增加结构的质量和约束, 改变了结构的动态性能, 产生负载效应。振动测量可采用激光位移传感器、光电位置传感器和机器视觉传感器等非接触式测量方式, 避免负载效应。激光位移传感器只能进行单点测量, 机器视觉传感器能够进行多点测量^[4-7]。Avitabile 等^[4]提出了一种用视觉来测量结构振动的方法。Olaszek^[5]在桥梁表面设置了一些特征明显的标记, 使用视觉传感器对其进行测量, 并分析了桥梁的相关性能。邱志成等^[6]提出了采用单目视觉测量柔性结构振动和反馈控制的方法, 并通过实验验证了其可行性。徐秀秀等^[7]提出了一种将相机固定在柔性臂上、在柔性臂上安装光源标记的视觉测量方法, 并进行了实验研究。

单目视觉测量结构振动时, 必须保证结构振动的方向在摄像机成像面内, 所以单目视觉无法获取结构的面外位移。笔者使用两个视觉传感器来测量压电柔性板的低频振动, 通过控制算法抑制其振动。在柔性板上布设了 9 个圆形标识, 通过左、右摄像机同步采集包含圆形标识的两幅图像, 对图像进行处理来获取圆形标识圆心的振动信息。利用获取的振动信息反馈调节控制算法, 将控制信息输出到压电驱动器上来抑制柔性板的振动。

1 实验系统

实验系统为柔性悬臂板振动主动控制系统, 主要由以下几个部分组成: 柔性悬臂板主体、工业相机、镜头、光源、云台、滑轨、端子板 (含有数模 (digital analog, 简称 D/A) 转换模块和模数 (analog digital, 简称 A/D) 转换模块)、压电陶瓷驱动器、电压放大器、固高运动控制卡和计算机等。图 1 为整个系统的示意图。

柔性板通过机械夹持装置固定一端, 形成柔性悬臂板。压电陶瓷驱动器 I 由 8 片压电陶瓷片构成, 每面 4 片且并联连接, 分别粘贴在柔性板靠近固定端 10 mm 处, 在宽度方向上距离板边缘的距离为 50 mm, 姿态角为 0° 对称粘贴, 主要是用来抑制柔性悬臂板的一阶弯曲振动。压电陶瓷片传感器粘贴在柔性板靠近固定端纵向中线处, 姿态角为 0° 对称粘

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (51775190, 51175181)
收稿日期: 2016-05-25; 修回日期: 2016-08-15

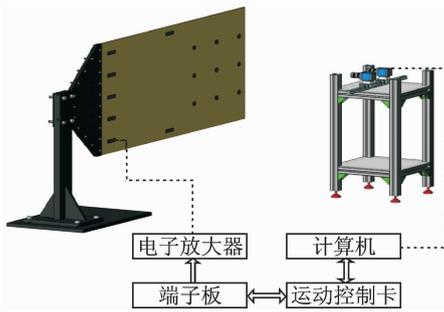


图1 实验系统示意图

Fig. 1 The schematic diagram of experiment system

贴,每面1片且并联连接,主要用来检测柔性板的振动信息。在本实验中没有采用它来检测振动信息。压电陶瓷片驱动器 II 由4片压电陶瓷片构成,每面2片且并联连接,分别粘贴在柔性板长度方向中部,宽度方向边缘位置的两面,姿态角为 0° 对称粘贴,主要用来抑制柔性板的扭转振动。

圆形标识是布设在柔性板上的特征,共布设了9个大小相等的圆形标识,半径为10 mm且呈三行三列分布。中间行的圆心通过柔性板的纵向中心线,第1行和第3行关于中间行对称分布,第1列和第3列关于中间列对称分布。长度方向两个圆心之间的距离为150 mm,高度方向两个圆心之间的距离为125 mm,且第3列圆的圆心距离柔性板自由端边缘距离为30 mm。相机支架是由型材构建而成的一个安装相机的装置,分为上下两层,第2层铝板上安装了滑轨且可以上下移动,以便调整相机高度。机器视觉传感器安装在球状云台上,可以通过云台来 360° 的旋转调整相机的姿态。云台安装在滑轨的滑块上,可以通过滑动滑块来调节左、右相机之间的水平距离。通过旋转云台和滑动滑块保证左、右相机处于同一水平位置上。相机支架放置在柔性板的正对面处,且离柔性板有一定距离,以保证圆形标识区域在拍摄范围内,从而更好地拍摄圆形标识。

2 双目视觉测量柔性板振动的原理

2.1 平行式双目视觉模型

如图2所示,双目视觉测量基于视差原理,利用空间点在左、右两个摄像机成像面上对应点之间的像素差值,反算出空间点的三维坐标值。

在平行式双目视觉模型中,左、右摄像机相互平行,坐标系的原点为 O_l 和 O_r ,分别在各自的光心

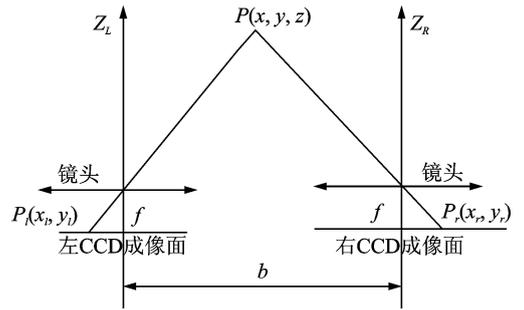


图2 平行式双目视觉的三维测量数学模型

Fig. 2 The mathematical model of three dimensional measurement of parallel binocular vision

处,左、右摄像机坐标系原点之间的水平距离为 b ,称为基线。以两个坐标系原点的水平连线方向为其 X_c 轴的方向,以垂直方向为其各自的 Z_c 轴, Y_c 轴垂直于 $X_c Z_c$ 平面,符合右手定则且相互平行。

设空间某点 P 在两个摄像机成像平面上的投影点分别为 P_l 和 P_r ,其坐标分别为 (x_l, y_l) 和 (x_r, y_r) 。由图(2)中的三角几何关系可得

$$\begin{cases} x_l = f \frac{x_w}{z_w} \\ x_r = f \frac{(x_w - b)}{z_w} \\ y_l = y_r = f \frac{y_w}{z_w} \end{cases} \quad (1)$$

其中: (x_l, y_l) 为 P_l 的坐标; (x_r, y_r) 为 P_r 的坐标; (x_w, y_w, z_w) 为 P 的三维坐标; f 为相机的焦距; b 为左右相机之间的水平距离。

由式(1)可以求出 x_w , y_w 和 z_w 的表达式为

$$\begin{cases} x_w = \frac{bx_l}{x_l - x_r} \\ y_w = \frac{by_l}{x_l - x_r} \\ z_w = \frac{bf}{x_l - x_r} \end{cases} \quad (2)$$

已知

$$x_l - x_r = (u_l - u_r) dx \quad (3)$$

将式(3)代入式(2),得到如下表达式

$$\begin{cases} x_w = \frac{b(u_l - u_0)}{u_l - u_r} \\ y_w = \frac{bf_x(v_l - v_0)}{f_y(u_l - u_r)} \\ z_w = \frac{bf_x}{u_l - u_r} \end{cases} \quad (4)$$

其中: (u_0, v_0) 为图像的主点坐标; (u_l, v_l) 为 P_l 的像素坐标; u_r 为 P_r 的横轴像素坐标值; f_x 为 f/dx ; f_y 为 f/dy 。

令 $d = u_l - u_r$, 则 d 为点 P 在左、右摄像机图像中的视差。由式(4)可知,只要知道摄像机的内参 u_o, v_o, f_x, f_y 以及视差值 d , 就可以唯一求出 P 点的三维坐标。

2.2 双目视觉系统的标定

为了获取客观世界物点的几何信息和图像中对应点之间的关系,建立物像之间的几何模型。必须准确知道相机的内参 u_o, v_o, f_x, f_y 以及相机外参,得到相机内、外参数的过程称为摄像机标定。

采用式(4)计算空间点的三维坐标之前,必须对双目视觉系统进行标定。首先,对左、右相机各自进行单独标定,分别得到左、右相机的内外参数;其次,利用得到的参数标定整个双目视觉系统,得到整个系统的结构参数^[8]旋转矩阵 R 和平移矢量 t 。

设空间任意一点 P 在世界坐标系,左、右相机坐标系中的坐标分别为 X_w, X_l 和 X_r , 则有

$$\begin{cases} X_l = R_l X_w + t_l \\ X_r = R_r X_w + t_r \end{cases} \quad (5)$$

其中: R_l, t_l 分别为左相机的旋转矩阵和平移向量; R_r, t_r 分别为右相机的旋转矩阵和平移向量。

由式(5)得出 X_l 和 X_r 之间的关系式为

$$X_l = R_l R_r^{-1} X_r + t_l - R_l R_r^{-1} t_r \quad (6)$$

令 $R = R_l R_r^{-1}, t = t_l - R_l R_r^{-1} t_r$, 得到左、右相机之间的相对位置关系

$$X_l = R X_r + t \quad (7)$$

实验采用文献[9]的方法对双目视觉系统进行标定,并利用 Matlab 中的标定工具箱进行标定。

2.3 柔性板振动信息的提取

双目视觉系统标定完成后,将同步采集的左、右图像对采用标定得到的结构参数进行图像校正,再通过立体匹配的方法找到左、右图像对中的匹配点,从而得到正确的视差值。采用式(4)求出柔性板上特征点的三维坐标,计算出柔性板各个时刻的位移,提取出柔性板的振动信息。

假设在初始时刻 T_0 时,点 P_0 的三维坐标为 (x_0, y_0, z_0) , 由于柔性板的振动, T_i 时刻点 P_i 的三维坐标为 (x_i, y_i, z_i) 。设 T_i 时刻点 P_i 的面外位移为 S_z 、面内 x 轴方向的位移为 S_x , 面内 y 轴方向的位移为 S_y , 则面内、外位移的表达式为

$$\begin{cases} S_x = x_i - x_0 \\ S_y = y_i - y_0 \\ S_z = z_i - z_0 \end{cases} \quad (8)$$

可见,柔性板上特征点的振动信息是通过该点

三维坐标的变化来反映的,而该点的三维坐标是采用式(4),根据不同场景中的视差来提取的。

3 图像处理

在双目视觉测量柔性板的振动信息中,最关键的问题是特征点的匹配问题。在选取了合适的特征后,要为图像特征的匹配找到最有利的约束,从而使特征点的匹配更精确、误差更小。

在双目视觉测量中,为了精确反映测量对象的运动情况,常在测量对象上布设一些具有明显特征的标记,其形状有十字形、圆形和三角形等。相比于其他形状的标记,圆形具有圆心坐标容易获取、图像处理方法简单等优点。如图 1 中的圆形标识所示,笔者在柔性板上布设了 9 个圆形标识。实验首先提取圆形标识的圆心坐标,并将圆心作为匹配的特征点;其次,完成特征点的匹配,求出特征点的视差值;最后,采用式(4)求出圆心的三维坐标,采用式(8)求出柔性板的振动信息。图 3 为图像处理的整个流程图。



图 3 双目视觉测量流程图

Fig. 3 The flow diagram of binocular vision measurement

3.1 极线校正

由于安装误差和制造误差等因素的存在,平行式双目视觉模型的条件很难满足。即使看上去两个相机是平行的,成像面也不一定在同一平面上,因此需要对采集的图像对做极线校正。极线校正可以使两幅图像的极线互相平行^[10],就好像产生了虚拟的平行式立体视觉模式^[11]。

极线校正的过程就是把双目立体视觉系统的极点位置移到无穷远处的过程。如图 4 所示,极线校正就是对两幅图像进行一次平面射影变换,对应极点被映射到无穷远处,使得两幅图像对应极线处于

同一水平线上,也就是把成像面从 Π_{i0} 和 Π_{o0} 变换到 Π_{i1} 和 Π_{o1} 的过程,此时极线互相平行。

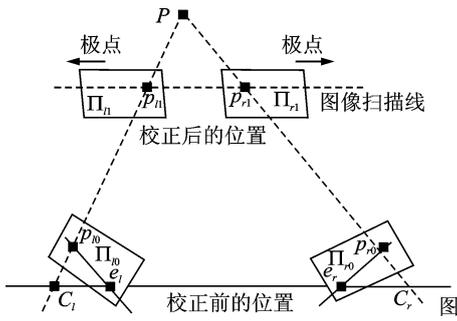


图4 极线校正过程示意图

Fig. 4 The Schematic diagram of the process of epipolar rectification

3.2 特征提取

由于测试环境中存在许多干扰因素,使拍摄到的图像与真实画面有所差异,因此在对图像进行特征提取前,要对图像做一定的预处理,使其尽量符合真实画面。在笔者的实验环境中,对图像影响最大的是噪声,因此做如下处理:a.对图像进行滤波消噪;b.对滤波消噪后的图像进行分割,分割出背景(柔性板)与前景(圆形标识);c.提取圆形标识的圆心坐标作为特征点用来完成立体匹配。

Canny 边缘检测算子是一种将滤波与边缘检测结合在一起的边缘算子,其实现过程如下:a.采用高斯滤波器消除图像中的噪声;b.计算图像像素的梯度;c.对梯度幅值进行非极大值抑制;d.设置两个阈值来检测和连接边缘。实验采用 Canny 完成滤波消噪和图像分割等任务。经过 Canny 边缘分割后,得到了包含圆形标识的二值图像,提取二值图像中圆形标识的轮廓,再计算轮廓的图像矩,利用图像矩求出圆形标识的圆心坐标。实验通过 Canny 边缘算子、提取轮廓和计算轮廓图像矩等方法来识别、定位柔性板上的圆形标识,并提取圆心坐标作为特征点,为匹配提供了条件。

3.3 立体匹配

双目视觉是根据视差原理来恢复空间物体的几何形状,也是根据视差原理来恢复特征点的三维坐标。因此,对图像提取合适的特征点后就要对特征点进行匹配,从而构建场景的视差图,根据视差信息与投影模型恢复出整个空间的三维信息。

由于测试环境中存在许多因素的影响,左图像中的特征点,在右图像中可能存在多个相似的候选点。因此,常用一些约束条件来筛选图像中的特征

点,从而提高匹配效率,得到精确度比较高的匹配点^[12]。

实验中只提取了9个圆心作为特征点,因此只需要完成9个特征点的匹配。由于圆形标识布设的规则性、匹配点数量少以及控制的实时性,笔者直接利用约束条件来完成圆心之间的匹配。圆心的匹配采用对称性测试来验证,对称性测试就是将匹配算法应用于从左图像到右图像,同样也应用于从右图像到左图像,而匹配结果不变。实验中的对称性测试主要分两步来完成:a.在左图像中选一个圆心作为特征点,根据约束条件及其几何位置关系,在右图像中定位与其匹配的圆心;b.用步骤a中找到的圆心作为特征点,根据其几何位置关系和约束条件,在左图像中定位与其匹配的圆心,发现此圆心就是步骤a中选取的圆心。找到左、右图像中匹配的圆心后,利用匹配的圆心坐标相减,得到视差值。采用式(4)求出柔性板上对应圆心的三维坐标,再采用式(8)求出柔性板上对应圆心处的振动位移信息。

4 MCS 算法原理

最小控制合成算法由英国的 Stoten 等于 1990 年首次提出^[13-16]。MCS 算法是基于超稳定理论提出的,并且已经被证明具有很好的稳定性和鲁棒性。MCS 算法框图如图 5 所示,整个算法的核心是追踪参考模型的输出,使受控对象的输出接近参考模型的输出。

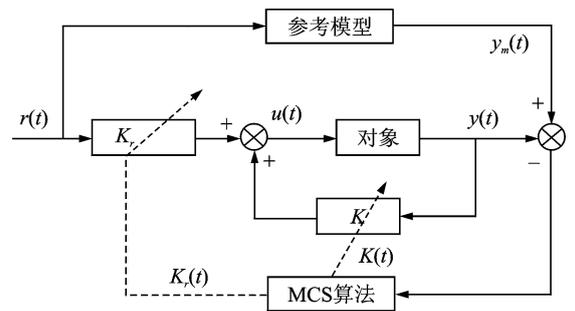


图5 MCS 自适应算法的控制原理图

Fig. 5 The principle diagram of MCS adaptive control algorithm

图5中的参考模型状态方程为

$$\dot{\mathbf{X}}_m(t) = \mathbf{A}_m \mathbf{X}_m(t) + \mathbf{B}_m r(t) \quad (9)$$

其中: $\mathbf{X}_m(t) = [y_m(t), \dot{y}_m(t)]^T$; $\mathbf{A}_m, \mathbf{B}_m$ 为理想的闭环响应特征决定的参数; $r(t)$ 为参考输入信息。

图5中MCS算法的控制律为

$$u(t) = \mathbf{K}(t) \mathbf{X}(t) + K_r(t)r(t) \quad (10)$$

其中: $\mathbf{X}(t) = [y(t), \dot{y}(t)]^T$; $\mathbf{K}(t), K_r(t)$ 为自适应

增益,一般情况下,初始值为0。

$\mathbf{K}(t), K_r(t)$ 可以通过下式得到

$$\mathbf{K}(t) = \int_0^t \alpha \mathbf{Y}_e(\tau) \mathbf{X}^T(\tau) d\tau + \beta \mathbf{Y}_e(t) \mathbf{X}^T(t) \quad (11)$$

$$K_r(t) = \int_0^t \alpha \mathbf{Y}_e(\tau) r(\tau) d\tau + \beta \mathbf{Y}_e(t) r(t) \quad (12)$$

其中: α, β 为正的加权数值; $\mathbf{Y}_e(t)$ 为输出误差矢量。

$\mathbf{Y}_e(t)$ 可以通过下式得到

$$\mathbf{Y}_e(t) = \mathbf{C}_e(t) \mathbf{X}_e(t) \quad (13)$$

其中: $\mathbf{X}_e(t)$ 为状态误差矢量; $\mathbf{C}_e(t)$ 为输出误差矩阵。

$\mathbf{X}_e(t), \mathbf{C}_e$ 可通过下式得到

$$\mathbf{X}_e(t) = \mathbf{X}_m(t) - \mathbf{X}(t) \quad (14)$$

$$\mathbf{C}_e = [0 \quad 1] \mathbf{P} \quad (15)$$

其中: \mathbf{P} 为正定对称阵。

\mathbf{P} 可由下式得到

$$\mathbf{P} \mathbf{A}_m + \mathbf{A}_m^T \mathbf{P} = -\mathbf{Q} \quad (16)$$

其中: \mathbf{Q} 为严格正实矩阵。

5 实验

大型柔性结构具有阻尼小、质量轻和模态频率低等特点,在受到干扰时容易激起持续的、以低频为主的振动。因此,对柔性结构进行振动控制时主要抑制其低频主导模态振动。实验中采用的柔性板的一阶频率约为 0.933 Hz,且相机的帧率设为 30 帧/s,即控制采样频率为 30 Hz。本次实验主要针对柔性板的第 1 阶模态振动进行主动控制。

当柔性板振动时,相机以 30 帧/s 的频率拍摄柔性板运动过程中的图像,这些图像集包含了柔性板的振动信息。对这些序列图像进行处理,就可以获取柔性板的振动信息。获取的振动信息作为反馈信息来调节控制算法,产生控制信息。控制信息经 D/A 转换成模拟量,再经电压放大器放大后,输入到压电驱动器来抑制柔性板振动。

实验中使用两个视觉传感器来测量柔性板的振动信息。采用 MCS 算法和 PD 算法抑制柔性板的振动,并比较两者的效果。如图 1 所示,在该实验装置中,柔性板的材料选用环氧树脂材料薄板,几何尺寸为 1 000 mm×500 mm×2 mm,即水平方向长度为 1 000 mm,竖直方向长度为 500 mm,厚度为 2 mm。环氧树脂的弹性模量为 34.64 GPa,密度为 1 840 kg/m³。压电陶瓷片的结构尺寸为 50 mm×

15 mm×1 mm,弹性模量为 63 GPa,压电应变常数为 $d_{31} = -166 \times 10^{-12}$ m/V。实验中用的电压放大器可以将 D/A 转换后的(-5~5 V 电压信号放大到-260~260 V 的高电压信号,驱动压电驱动器控制柔性板的振动。相机采样频率设为 30 Hz,型号为 DFK 21BU04,通过 USB 接口与计算机连接。镜头型号为 M1614-MP2。实验中采用两个环形 LED 光源,灯光颜色为白色。从柔性板的左右两侧、倾斜 45°照射圆形标识区域,使整个区域受光照均匀,从而提高拍摄的质量,利于后期提取图像特征。计算机作为整个系统的核心,负责图像处理算法和控制算法的运行以及各个模块之间的通信。实验采用 OPENCV 的函数库进行图像处理,采用 C++ 语言编写控制算法的程序和操作界面,实时显示振动信息和控制信息的曲线。

实验中利用双目立体视觉测量系统测量柔性板的振动,柔性板不受控制时,其自由振动的位移如图 6 所示。

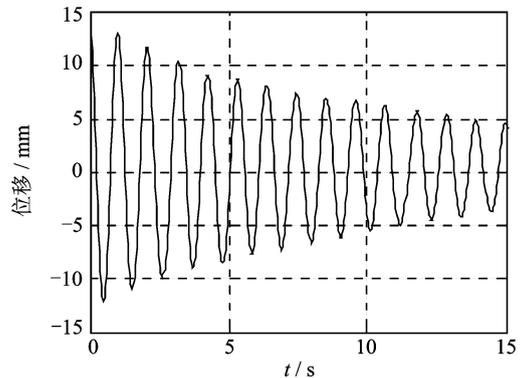


图 6 柔性板自由振动的位移曲线图

Fig. 6 The diagram of free vibration of flexible plate

采用 PD 算法对柔性板进行主动控制,其时域响应曲线和控制电压变化曲线分别如图 7,8 所示。

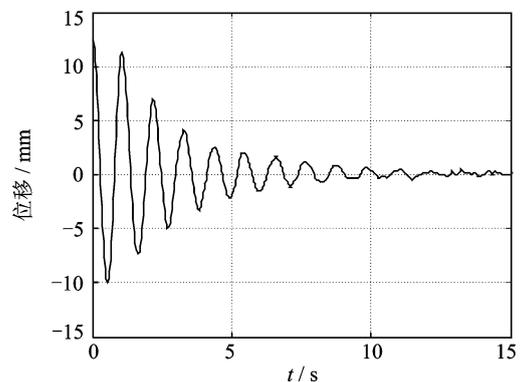


图 7 PD 控制的时域响应图

Fig. 7 The time domain response under PD control

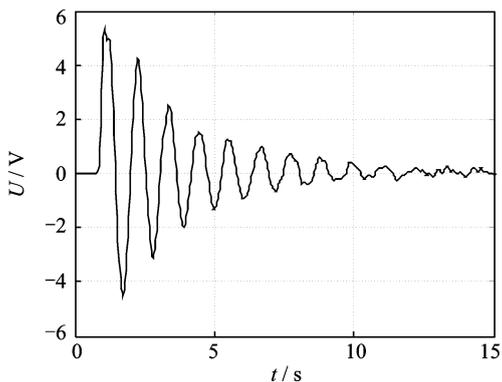


图 8 PD 控制电压的曲线图

Fig. 8 The diagram of PD control voltage

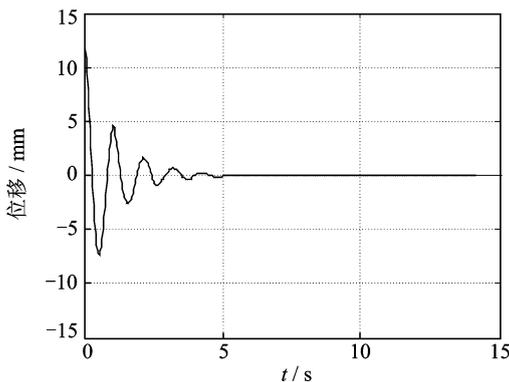


图 11 参考模型输出

Fig. 11 The output of reference model

采用 MCS 算法对柔性板振动进行控制,控制时振动响应曲线和控制电压曲线分别如图 9, 10 所示。

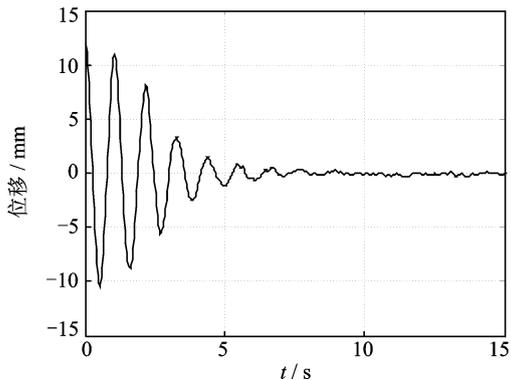


图 9 MCS 控制的时域响应图

Fig. 9 The time domain response under MCS control

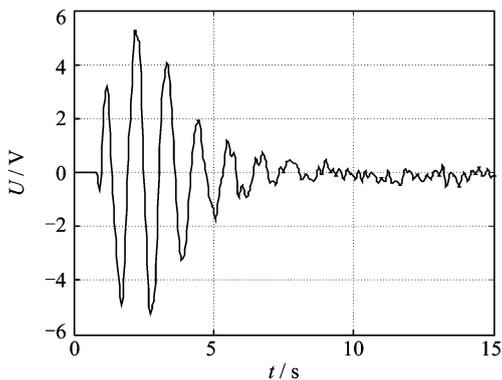


图 10 MCS 控制电压的曲线图

Fig. 10 The diagram of MCS control voltage

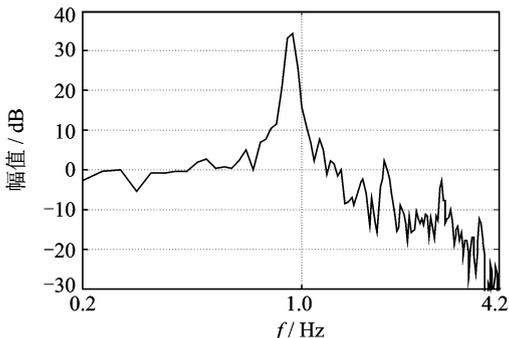
MCS 算法的参考输出曲线如图 11 所示。图 11 为给定的参考模型输出,其振动信号大概在振动 4~5 个周期内衰减,符合人们的期望性能。参考模型的输出表达式为

$$y_m(t) = e^{-\xi\omega_n t} A \sin(\omega_d t + \psi) \quad (17)$$

其中: A, ψ 为施加控制时,根据振动信息在线辨识

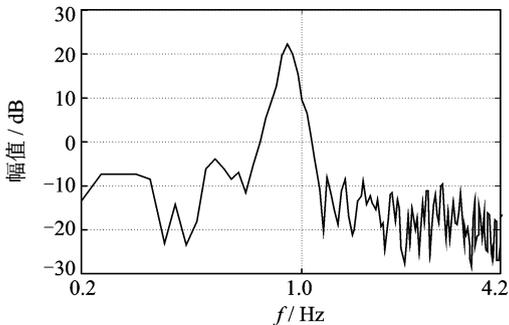
出来的振幅和相位。

柔性板自由振动时的频率响应特性如图 12(a)



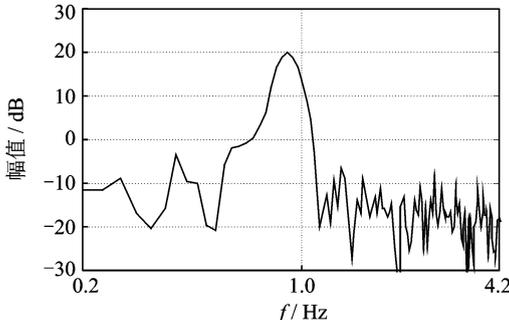
(a) 未控制时的频率响应图

(a) The frequency response without control



(b) PD 控制时的频率响应图

(b) The frequency response of PD control



(c) MCS 控制时的频率响应图

(c) The frequency response of MCS control

图 12 频率响应图

Fig. 12 The frequency response

所示。从图 12(a)中可知,柔性板的第 1 阶振动模态频率为 0.933 Hz,幅值为 34.31 dB。图 12(b)为 PD 算法控制下柔性板振动时的频率响应特性图,其第 1 阶振动模态的幅值为 22.29 dB。图 12(c)为 MCS 算法控制下柔性板振动时的频率响应特性图,其第 1 阶振动模态的幅值为 20.12 dB。

将图 7 和图 9 进行对比分析可知:在大幅值时,PD 算法和 MCS 算法的控制效果差不多;在小幅值残余振动时,MCS 算法的控制效果要优于 PD 算法。例如,在控制的第 5 s 以后,图 7 中的振动信号仍然有比较大的振幅,而图 9 中的振动幅值较小且很快被完全抑制。将图 12(a)、图 12(b)和图 12(c)进行对比分析可知,PD 算法和 MCS 算法都能抑制柔性板的振动,并且 PD 算法能使振动幅值降低 12.02 dB,MCS 算法能使振动幅值降低 14.19 dB。因此,在本实验中采用 MCS 算法的控制效果要优于 PD 算法。

MCS 算法控制律 $u(t)$ 中的 $\mathbf{K}(t)$ 为一个二维行向量,其有两个分量分别为 $K_1(t)$ 和 $K_2(t)$,矢量形式为 $\mathbf{K}(t)=[k_1(t),k_2(t)]$ 。实验中这两个参数的自适应调整过程记录曲线图 13(a)和图 13(b)分

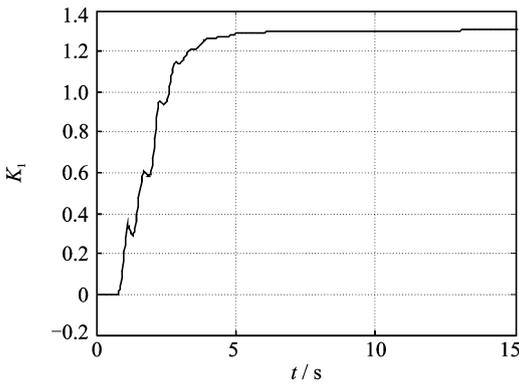
别为 $K_1(t)$ 和 $K_2(t)$ 根据误差自适应调整的过程。从图 13 可知,控制参数随着振动幅值的减小、随着自适应调节逐渐增大,最后达到稳态值。这样对小振幅值的残余振动控制量就会自适应增大变化,从而快速抑制小振幅值残余振动。这就是 MCS 控制算法对小振幅值残余振动快速抑制的原因。

6 结束语

研究了一种双目视觉测量柔性板振动和反馈控制的方法,并进行了理论分析和实验研究。采用双目视觉测量(其测量精度为 0.1mm,满足一阶弯曲振动实验要求),通过图像处理算法得到柔性板的弯曲振动信息。实验过程中将双目视觉测量得到的位移信息作为反馈信号,采用 MCS 算法和 PD 算法抑制柔性板的弯曲振动。实验结果验证了双目视觉测量柔性板振动的可行性,并验证了 MCS 算法对柔性板振动的控制效果优于 PD 算法的控制效果。

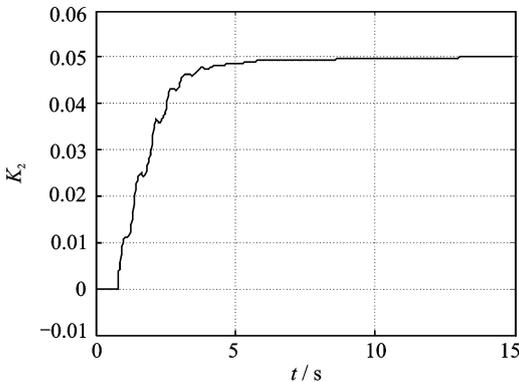
参 考 文 献

- [1] 李东旭. 挠性航天器结构动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 51-61.
- [2] Hurlebaus S, Gaul L. Smart structure dynamics[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(2): 255-281.
- [3] 刘泊, 郭建英, 孙永全. 压电陶瓷微位移驱动器建模与控制[J]. 光学精密工程, 2013, 21(6): 1503-1509. Liu Bo, Guo Jianying, Sun Yongquan. The modeling and control of piezoelectric ceramic micro displacement actuator[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(6): 1503-1509. (in Chinese)
- [4] Avitabile P, Niezrecki C, Helfrick M, et al. Noncontact measurement techniques for model correlation[J]. Sound and Vibration, 2010, 44(1): 8-13.
- [5] Olaszek P. Investigation of the dynamic characteristic of bridge structures using a computer vision method [J]. Measurement, 1999, 25(3): 227-236.
- [6] 邱志成, 张祥通. 基于视觉的柔性结构振动测量及其控制[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(1): 11-16. Qiu Zhicheng, Zhang Xiangtong. Vibration measurement and control of flexible structure based on machine vision [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(1): 11-16. (in Chinese)
- [7] 徐秀秀, 郭毓, 余臻, 等. 基于机器视觉的柔性臂振动



(a) K_1 的自适应调整

(a) Adaptive adjustment of K_1



(b) K_2 的自适应调整

(b) Adaptive adjustment of K_2

图 13 控制参数的自适应调整过程

Fig. 13 Adaptive adjustment process of control parameters

- 测量研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(1):129-132.
- Xu Xiuxiu, Guo Yu, Yu Zhen, et al. Vibration measurement of flexible arm based on machine vision[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2013, 41(1): 129-132. (in Chinese)
- [8] 刘金颂, 原思聪, 张庆阳, 等. 双目立体视觉中的摄像机标定技术研究[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(6):237-239.
- Liu Jinsong, Yuan Sicong, Zhang Qingyang, et al. Experimental study on camera calibration technique of binocular stereo vision[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(6): 237-239. (in Chinese)
- [9] Zhang Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [10] Hartley R I. Theory and practice of projective rectification[J]. International Journal of Computer Vision, 1999, 35(2): 115-127.
- [11] Fusiello A, Trucco E, Verri A. A compact algorithm for rectification of stereo pairs[J]. Machine Vision and Applications, 2000, 12(1): 16-22.
- [12] Smith S M, Brady J M. SUSAN-a new approach to low level image processing[J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 23(1):45-78.
- [13] Stoten D P, Benchoubane H. Empirical studies of an MRAC algorithm with minimal controller synthesis [J]. International Journal of Control, 1990, 51(4): 823-849.
- [14] Stoten D P, Benchoubane H. Robustness of a minimal controller synthesis algorithm[J]. International Journal of Control, 1990, 51(4): 851-861.
- [15] Stoten D P, Gomez E G. Adaptive control of shaking tables using the minimal controller synthesis algorithm [J]. Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2001, 359 (1786): 1697-1723.
- [16] Benchoubane H, Stoten D P. The decentralized minimal controller synthesis algorithm [J]. International Journal of Control, 1992, 56(4): 967-983.



第一作者简介:邱志成,男,1973年10月生,教授、博士生导师。主要研究方向为柔性结构的振动主动控制及机器人控制等。曾发表《基于视觉的柔性结构振动测量及其控制》(《振动、测试与诊断》2012年第32卷第1期)等论文。
E-mail: zhchqiu@scut.edu.cn