

阵列可视化噪声源检测中的声-光偏离校准方法研究

钱正莲^{1,2}, 杨亦春², 滕鹏晓², 韩宝坤¹, 王昌田¹

(1. 山东科技大学机械电子工程学院, 山东青岛 266510; 2. 中国科学院声学研究所噪声与振动重点实验室, 北京 100190)

摘 要: 针对现有的阵列声成像的声-光偏离校准复杂性的问题, 研究了一种传声器阵列声像图和视频图的偏离校准方法, 该方法针对声-光偏离(平移、旋转和缩放)基本问题, 推导出了校准偏离的公式. 设计了一个声-光复合校准器, 通过提取视频图像的光源中心坐标和声像图的声源中心坐标, 得到一个校验的声-光坐标偏离值. 根据不同位置的五次实验, 得到五个校验的偏离值, 再利用本文建立的校验模型计算出五个修正量, 将这些修正量带入传声器阵列的声成像算法中即可实现传声器阵列的声-光偏离校准. 实验结果表明该方法的误差度为 0.12° , 在允许的 0.2° 范围之内, 可以作为传声器阵列声像图和视频图偏离校准的一般方法.

关键词: 传声器阵列; 声像图; 视频图; 偏离; 校准方法

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)10-2092-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.10.35

Study of Calibration Method of Acoustic & Video Image Deviation in Microphone Array's Visualized Noise Identification

QIAN Zheng-lian^{1,2}, YANG Yi-chun², TENG Peng-xiao², HAN Bao-kun¹, WANG Chang-tian¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Key Laboratory of Noise and Vibration Research, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

Abstract: In order to reduce the complexity of the issue of acoustic and video image calibration. A kind of calibration method of the deviation between acoustic image and video image with microphone array is studied. The formulation of calibrating the deviation is deduced based on the basic problem(translation, rotation and scaling)of the acoustic image and video image. A compound sound-light calibrator is designed to achieve a value of the coordinate deviation of acoustic and video image. By repeating the experiment at five different positions, five group deviated coordinates are achieved. Five correction values are obtained depend on the calibrated modal in this paper. The calibration of the deviation between the sound and light will be accomplished by adding the calibration value into the Microphone array acoustic imaging algorithm. The experimental result shows that the error is 0.12° , which is in the range of allowance error(0.2°). This calibration method is could be as a general method to calibrate acoustic image and video image.

Key words: microphone array; acoustic image; video image; deviation; calibration method

1 引言

传统的噪声源检测方法^[1,2]有很多种, 包括主观评价法、近场测量法、分别运行法、选择隔离法、振速测量法、噪声信号分析法、声强测量法等等, 这些方法虽然原理比较简单, 但是都有很大的自身局限性, 比如说表面振速测量法^[3], 能反映噪声源的强弱, 但是不能直接反映出声源的位置, 需要根据振动结果进一步分析. 声强法能准确识别低速运动物体的噪声源, 但是不能用于高速运动的噪声源的测量, 并且测量仪器非常昂贵. 除此

之外, 这些传统的噪声源检测得不到可视化的噪声源图像分布. 20 世纪 80 年代可视化的噪声源检测方法得到了广泛的推广和应用, 它使用传声器阵列采集声场的空间信息, 然后利用阵列处理技术对声场进行重构, 可以直观准确地确定声源的分布、声压级大小和频谱特性. 可视化的噪声源检测方法是噪声源的声场分布(简称声像图)和噪声源实际图像(简称视频图)叠加, 从而直观、方便地得到环境中的噪声源的分布情况^[4], 德国的“Camera Acoustic”公司首先提出了“声学照相机”的概念, 并将其广泛应用于汽车、火车、飞机等场合的噪声源

测量中. 丹麦的 B&K^[5] 公司利用不同的传声器阵列对高频发动机、大型起重机以及风洞内的汽车等设备的噪声源进行了有效的可视化. 2001 年, 波音公司的研究人员为了解决客机的啸叫问题, 在飞机跑道上布置数百个传声器组成螺旋阵列, 用于测量飞机在起飞和降落过程中的噪声, 最后设计师根据噪声源的分布情况, 重新设计了机翼结构, 消除了啸叫噪声. 2007 年, 美国马里兰大学的 ZhiyunLi^[6] 提出了一种时域快速球谐波束形成算法, 利用 64 阵元的半球阵列进行了声源定位实验研究, 发展了 3D 声场的可视化. 2008 年 GFAI 公司的 Gunnar Heilmann^[7] 使用 48 阵元和 120 阵元内嵌单个摄像头的球形阵列对汽车驾驶员座舱和飞机机舱的噪声源进行了测量. Cho 和 Roan 于 2009 年将波束形成技术用于近场声源的定位和声成像^[8].

近年来国内很多大学和科研机构也致力于声场可视化的研究, 上海交大的蒋伟康^[9] 利用传声器阵列的波束形成算法得到声像进行噪声源识别的基础上, 对声像进行图像处理, 进而用于机械故障诊断. 西北工业大学的乔渭阳^[10] 利用 111 个传声器组成的平面阵列对飞机进场着陆噪声进行了测量. 合肥工业大学的于飞、陈剑^[11,12] 等人突破近场声全息 (NAH) 的应用局限, 提出了单全息面以及双全息面的声场空间分离技术. 清华大学的郝鹏、杨殿阁、郑四发、连小珉^[13] 等人提出了一种基于声源特征的传递路径声全息方法, 并应用该方法对汽车噪声源进行了分解, 结果表明该方法能有效识别并分离出运动物体的噪声源. 文献^[14, 15] 通过传声器阵列检测声源信号并结合波叠加法实现声场的精确测量定位和可视化.

传声器阵列已经得到了越来越广泛的应用, 然而在实际使用中, 安装在传声器阵列上的摄像头因为固定夹具的加工误差和安装误差等原因导致摄像头的中轴线不能准确沿着阵列的正 z 轴方向. 这会导致视频图和声像图不重合, 因此无法定位噪声源. 之前解决这个问题的方法就是机械调整摄像头使得它的轴线沿着阵列的正 z 轴方向, 这是一个复杂的工程, 带有很大的盲目性, 不仅浪费了大量的时间, 而且影响了传声器阵列的整体美观性. 目前, 国际上并没有任何一家单位或者企业提出快速精确解决这一问题的方案.

本文利用自主研发的校准器, 并且开发了一种用于声像校准的方法, 实验表明该方法的精确度极高, 可以作为声像校准的一般方法.

2 声像校验方法

2.1 声-光校验模型

该校准器的中心部位有一个小型声源, 能发出声源级达到一定强度 (94dB) 且单频声源声波, 声波频率

典型值取 1kHz. 周围有 4 个点光源, 均匀分布于正四边形顶点的位置. 利用摄像头对该校准器拍照中间部位声源位置的图像就是视频图; 利用传声器阵列对该声源定位得到的声能量图像就是声像图.

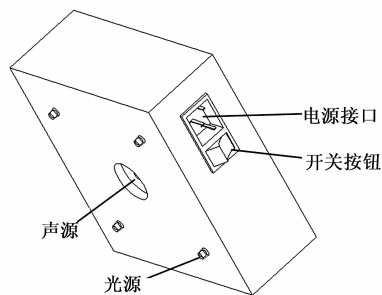


图1 校准器的外观图

假设 m 个视频图中心点坐标:

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} V_{x1} & V_{x2} & \cdots & V_{xm} \\ V_{y1} & V_{y2} & \cdots & V_{ym} \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

和 m 个声像图中心点坐标:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{x1} & S_{x2} & \cdots & S_{xm} \\ S_{y1} & S_{y1} & \cdots & S_{ym} \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

当声像图和视频图不重合时, 假设是摄像头发生了偏离 (包括平移、旋转和缩放), 可以调整声场的扫描范围使它和摄像头的扫描范围重合, 这时声像图和视频图也就重合. 下面就研究这种方法的原理.

声场扫描和摄像头扫描理论上均为球面扫面, 鉴于摄像头的视角有限 (本次使用的摄像头横向视角 $\theta_x = 60^\circ$, 纵向视角 $\theta_y = 47^\circ$), 为了使声像扫描角度和摄像头视角一致, 所以最终的声像扫描为锥面区域. 而对于高频声源 (本次使用的声源频率为 2750Hz) 采用远场平面波模型, 在设定声源距离的情况下, 扫描面是平面, 如图 2 所示.

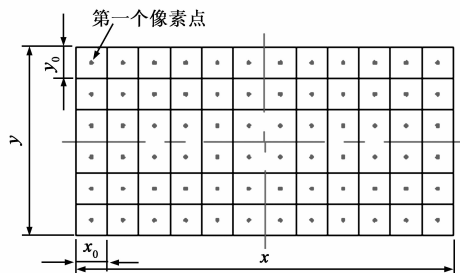


图2 传声器阵列的声场扫描范围以及像素点

假设整个声场扫描范围横向是 x , 纵向是 y , 扫描点是全部网格的中心点 (俗称像素点). 取整个网格的中心点为笛卡尔坐标的原点, 因此各个扫描点的坐标如下:

$$\begin{aligned} x_{\text{scan}} &= -0.5 * x + (i + 0.5) * x_0 \\ y_{\text{scan}} &= -0.5 * y + (j + 0.5) * y_0 \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $0 \leq i \leq x/x_0 - 1$, $0 \leq j \leq y/y_0 - 1$; x_{scan} 是横向扫描像素点坐标; y_{scan} 是纵向扫描像素点坐标。

①假设摄像头只发生平移,且横向平移角度为 $\Delta\theta_x$,纵向为 $\Delta\theta_y$ 。

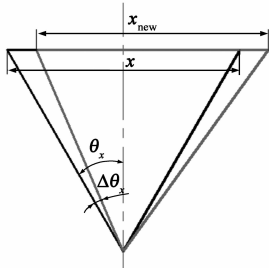


图3 横向扫描范围变化示意图

那么新的扫描范围变成 x_{new} 和 y_{new} :

$$\begin{aligned} x_{\text{new}} &= \mathbf{Z} * (\tan(\theta_x - \Delta\theta_x) + \tan(\theta_x + \Delta\theta_x)) \\ y_{\text{new}} &= \mathbf{Z} * (\tan(\theta_y - \Delta\theta_y) + \tan(\theta_y + \Delta\theta_y)) \end{aligned} \quad (4)$$

其中 \mathbf{Z} 是声源与阵列的距离。

将式(3)的 x 和 y 变换成 x_{new} 和 y_{new} , 即得到新的扫描点。

②当摄像头只有旋转的时候,设旋转角度为 θ ,那么旋转后的扫描范围变成:

$$\begin{bmatrix} x_{\text{new}} & y_{\text{new}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

将式(3)的 x 和 y 变换成 x_{new} 和 y_{new} , 即得到新的扫描点。

③当摄像头变动使得声像图只有缩放的时候,设横向缩放比例为 α_x ,纵向缩放比例为 α_y ,那么缩放后的扫描范围变成:

$$\begin{bmatrix} x_{\text{new}} & y_{\text{new}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 \\ 0 & \alpha_y \end{bmatrix} \quad (6)$$

将式(3)的 x 和 y 变换成 x_{new} 和 y_{new} , 即得到新的扫描点。

最复杂的情况是以上三种情况的组合,根据叠加原理,将三者相加即得到新的扫描点。

对应的计算公式如下:

$$\mathbf{V} = \mathbf{S}\boldsymbol{\alpha} + \mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\varphi} + \Delta \quad (7)$$

其中,

$$\boldsymbol{\alpha} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 \\ 0 & \alpha_y \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\boldsymbol{\varphi} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Delta &= (\Delta x_1, \Delta x_2) \\ &= (\mathbf{Z} * (\tan(\theta_x - \Delta\theta_x) + \tan(\theta_x + \Delta\theta_x)) \\ &= (\mathbf{Z} * (\tan(\theta_y - \Delta\theta_y) + \tan(\theta_y + \Delta\theta_y))) \end{aligned} \quad (10)$$

其中

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} z_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & z_2 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & z_m \end{bmatrix} \quad (11)$$

将式(8)~(11)代入式(7)得到完整的声-光校验公式如式(12):

$$\begin{bmatrix} V_{x1} & V_{y1} \\ V_{x2} & V_{y2} \\ \cdots & \cdots \\ V_{xm} & V_{ym} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{x1} & S_{y1} \\ S_{x2} & S_{y2} \\ \cdots & \cdots \\ S_{xm} & S_{ym} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 \\ 0 & \alpha_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{x1} & S_{y1} \\ S_{x2} & S_{y2} \\ \cdots & \cdots \\ S_{xm} & S_{ym} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} + \mathbf{Z} \cdot \begin{bmatrix} \tan(\theta_x - \Delta\theta_x) + \tan(\theta_x + \Delta\theta_x) & \tan(\theta_y - \Delta\theta_y) + \tan(\theta_y + \Delta\theta_y) \\ \tan(\theta_x - \Delta\theta_x) + \tan(\theta_x + \Delta\theta_x) & \tan(\theta_y - \Delta\theta_y) + \tan(\theta_y + \Delta\theta_y) \\ \cdots & \cdots \\ \tan(\theta_x - \Delta\theta_x) + \tan(\theta_x + \Delta\theta_x) & \tan(\theta_y - \Delta\theta_y) + \tan(\theta_y + \Delta\theta_y) \end{bmatrix} \quad (12)$$

等式中含有 6 个未知参数:偏移量 $\Delta\theta_x, \Delta\theta_y$; 旋转角度 θ ; 缩放因子 α_x, α_y ; 声源距离 \mathbf{Z} 。而声源距离 \mathbf{Z} 可以通过波束形成算法搜索得到。其他几个未知量要在已知视频图和声像图坐标的情况下通过求解方程(12)得出。

2.2 波束形成算法精确测定声源距离

由上节可知该声源模型为远场平面波模型。在阵列信号处理中引入快拍模型,一个快拍就是对信号的一次采样^[16,17]。假设阵列共有 M 个阵元,每个阵元接收到 N 次快拍信号,那么第 m 个传声器接收到的信号为: $p_m(1), p_m(2), \dots, p_m(N)$ 。延时求和波束形成的输出可以写成矢量形式为:

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{v}_k^H(\mathbf{k})\mathbf{p}(n) \quad (13)$$

其中 $\mathbf{v}_k(\mathbf{k})$ 是阵列流型矢量,平面波的阵列流型矢量如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_k(\mathbf{k}) &= [\exp(-j\omega\mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{k}/c), \\ &\exp(-j\omega\mathbf{r}_2 \cdot \mathbf{k}/c) \cdots, \\ &\exp(-j\omega\mathbf{r}_M \cdot \mathbf{k}/c)] \end{aligned} \quad (14)$$

其中 $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_M$ 为传声器阵列的阵元位置坐标, \mathbf{k} 是扫描方向的方向向量。当快拍数 N 趋向于无穷大时,阵列输出功率为:

$$\begin{aligned} P &= E\{\mathbf{y}(n)\mathbf{y}^H(n)\} \\ &= \mathbf{v}_k^H(\mathbf{k}) \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{p}(n)\mathbf{p}^H(n) \right) \mathbf{v}_k(\mathbf{k}) \\ &= \mathbf{v}_k^H(\mathbf{k}) \mathbf{R}_{xx} \mathbf{v}_k(\mathbf{k}) \end{aligned} \quad (15)$$

其中 \mathbf{R}_{xx} 为阵列接收信号的协方差矩阵:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{xx} &= \frac{1}{N} \mathbf{p}(n)\mathbf{p}^H(n) \\ &= \mathbf{A}(\boldsymbol{\Psi}) \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{p}(n)\mathbf{p}^H(n) \right) \mathbf{A}^H(\boldsymbol{\Psi}) \\ &\quad + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{n}(n)\mathbf{n}^H(n) \end{aligned}$$

$$= \mathbf{A}(\Psi) \mathbf{R}_{pp} \mathbf{A}^H(\Psi) + \mathbf{R}_{nn} \quad (16)$$

对于远场平面波模型,改变阵列流行矢量(16)中的 k 值,当输出功率 P 最大时,扫描方向和来波方向一致,这样就找出了声源的位置.

在已知声源坐标 (x, y) 的情况下,对 z 设置一定的范围,利用波束形成算法在空间进行扫描,寻找能量(输出功率)最大的位置对应的坐标就是声源在空间的实际的 z 坐标.避免了传统的用尺子量取距离的方式产生的误差,方便了校准过程的进行.

3 实验研究

声学所研制的校准器的中心点是单频声源,四个点光源分布在四个角.

3.1 实验现场布置

试验现场的布置图如图 4.

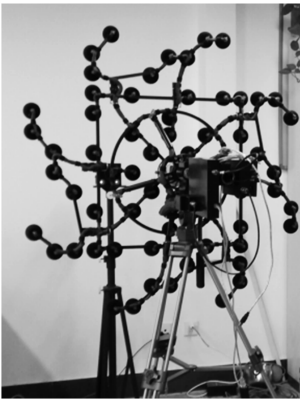


图4 实验现场照片

将校准器放在固定的支撑杆上,选取白色的墙壁为背景,分别将校准器放在五个不同位置拍摄五组图片.选取其中一组图片如图 5 所示,图 5(a)是将校准器的电源按钮打开,在软件中将声压最低值调到 180dB.图 5(b)和图 5(a)在相同位置,在软件中将声压的最小值调到 0dB 的声像图.



图5 同一个位置的校准器状态图

3.2 实验步骤

(1)以图 5(a)为例,利用 matlab 的阈值图像处理,获得白色光源外的所有红色像素点坐标,如图 6 所示,再将这些坐标点平均,即得到实际声源(即视频图)坐标.同理可以求得其他四个位置视频图的坐标,如表 1 所示.



图6 图像处理图5(a)寻找视频中心点坐标

表 1 五个不同位置视频图中心的横、纵坐标

坐标	v_x	v_y
序 号		
1	120.0701	422.0894
2	75.5951	106.7734
3	624.2485	109.2375
4	637.9943	400.3679
5	364.9588	259.4765

因此 5 个不同位置视频图像中心点的坐标矩阵向量为:

$$\mathbf{V} = [v_{x1}, v_{y1}; v_{x2}, v_{y2}; v_{x3}, v_{y3}; v_{x4}, v_{y4}; v_{x5}, v_{y5}]$$

(2)选取同一组图像,利用图像处理的减法,例如使用图 5(b)减去图 5(a),再将背景设置为白色,即得到声像图,如图 7(a)所示;对图 7(a)使用图像阈值处理的方法,寻找红色像素中心点的图像和坐标,如图 7(b)所示,然后对这些坐标取平均值,即找到声像图中心点的坐标.同理可以求得其他四个位置的声像图中心点的坐标,如表 2 所示.

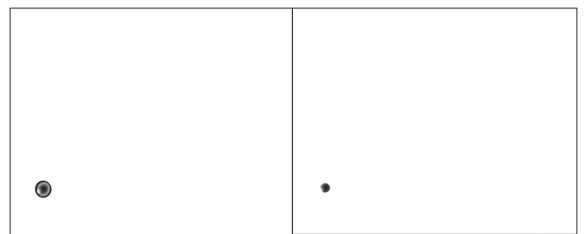


图7

表 2 五个不同位置声像图中心的横、纵坐标

坐标	S_x	S_y
序 号		
1	84.0215	459.2367
2	60.4518	123.3195
3	590.0298	148.2546
4	598.3461	434.1543
5	339.3842	318.4256

因此求得 5 个位置声像图中心点坐标矩阵向量为:

$$\mathbf{S} = [s_{x1}, s_{y1}; s_{x2}, s_{y2}; s_{x3}, s_{y3}; s_{x4}, s_{y4}; s_{x5}, s_{y5}].$$

(3) 将第(1)(2)步得到的视频图和声像图坐标, 使用第 2.2 节的波束形成算法搜索上述五个位置的声源的 z 坐标. 为了验证算法的精确度, 本实验用尺子测出声源位置在 1.1m 左右, 对 z 坐标的搜索结果如图 8 所示.

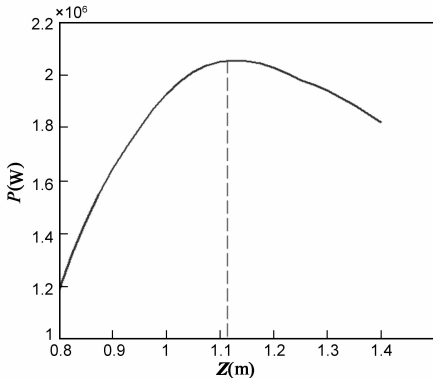


图8 声源在1.1m使用2.2节算法测出的距离与声功率的关系

从图 8 可以看出实际算出的声功率最大的点对应的距离为 1.125m, 与尺子测量的距离相比的误差为 $\frac{1.125 - 1.1}{1.125} \times 100\% = 2.22\%$, 为了更加精确地计算, 使用计算出的对应声功率最大的距离作为式(11)中的距离 Z .

(4) 将第(1)~(3)步得到的坐标带入式(16)中, 利用 matlab 对方程求解, 得到校准后的声像坐标如表 3 所示.

表 3 校准后五个不同位置声像图中心的横、纵坐标

坐标 序号	S_{cx}	S_{cy}
1	120.3257	422.8413
2	75.4215	106.4300
3	622.1576	435.3125
4	630.4321	108.2546
5	362.3219	262.1542

因此求得校准后的声像中心点坐标为 $\mathbf{S} = [s_{cx1}, s_{cy1}; s_{cx2}, s_{cy2}; s_{cx3}, s_{cy3}; s_{cx4}, s_{cy4}; s_{cx5}, s_{cy5}]$.

利用式(16)求得最优解为 $\alpha_x = 0.03$, $\alpha_y = 0.06$, $\Delta\theta_x = 5.1^\circ$, $\Delta\theta_y = 7.5^\circ$, $\theta = 0.2^\circ$. 将此最优解带入传声器阵列计算程序中, 再次定位得出的声像图如图 9 所示.

3.3 误差分析

利用 Matlab 仿真算法得到校准后的声像图和原声像图的位置.

图 10 是用 Matlab 仿真得到的校准前后的声像图和

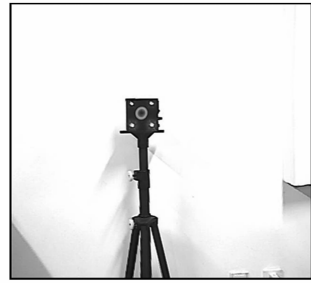


图9 经过上述校准算法后的声像图

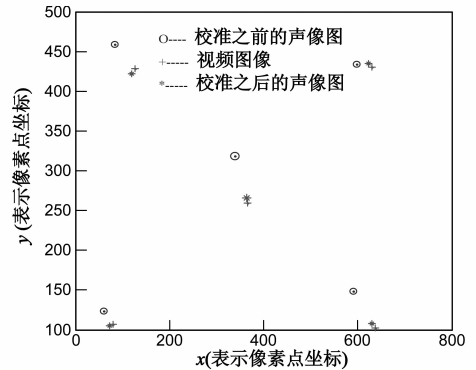


图10 校准前、后的声像图和视频图坐标

视频图, 以图 5 所在的位置为例, 声像图和视频图误差如下:

X 方向的误差为:

$$\Delta_x = \frac{v_{x2} - s_{cx2}}{v_{x2}} = \frac{75.5951 - 75.4215}{75.5951} = 0.0023 \quad (17)$$

y 方向的误差为:

$$\Delta_y = \frac{v_{y2} - s_{cy2}}{v_{y2}} = \frac{106.7734 - 106.4300}{106.7734} = 0.0032 \quad (18)$$

其中偏离最大的误差度约为 0.032m, 当纵向距离约为 1.125m 时, 可以计算出横向误差允许范围角度为 0.12° ; 而声成像的角分辨率为 0.2° , 因为 $0.12^\circ < 0.2^\circ$, 该校准误差在声成像误差允许范围内. 所以该方法是一种切实可行的声成像校准方法.

4 结论

利用传声器阵列进行可视化噪声源监测时, 常常会因为摄像头的安装误差或者夹具的制造误差, 导致声像图和视频图不重合, 因此不能准确找出噪声源的位置, 使用自主研发的校准器, 借助本文提出的校准算法可以方便快捷的对声像图和视频图校准, 实验表明该方法的误差度约为 0.12° , 可以作为可视化噪声源检测中校准声像图和视频图的一般方法.

参考文献

[1] 赵芳芳. 波束形成方法在噪声源识别应用中的仿真和实

- 验研究[D].上海:上海交通大学,2007,02.
- [2] 张金圈.基于波束形成技术的噪声源识别与声场可视化研究[D].安徽合肥:合肥工业大学,2010,04.
- [3] 孙长江.基于 Beamforming 的阵列噪声源识别仿真和算法研究[D].北京:北京交通大学,2008,06.
- [4] 刘哲.噪声测量中的多声源成像分离检测关键技术研究[M].北京:中国科学院声学研究所,2010,06.
- [5] Christensen J J. Beamforming—technical review [J]. B&K Sound & Vibration Measurement A/S, 2004, (1): 22 – 23, 60 – 92.
- [6] Li Zhiyun, Duraiswami Ramani. Fast time-domain spherical microphone array beamforming[A]. IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics [C]. New Paltz, NY: IEEE, 2007. 155 – 158.
- [7] Gunnar Heilmann, Kevin Hildebrandt, Dirk Döbler, Ralf Schröder. 3D beam forming measurements using 3D-microphone arrays[J]. Aero Test America, 2008, 30(3): 3 – 6.
- [8] Yong Thung Cho, Michael J Roan. Adaptive near-field beamforming techniques for sound source imaging[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2009, 125(2): 944 – 957.
- [9] 侯俊剑, 蒋伟康.基于声成像模式识别的故障诊断方法的研究[J].振动与冲击, 2010, 29(8): 22 – 26.
- [10] 乔渭阳, Ulf Michel. 二维传声器阵列测量技术及其对飞机进场着陆过程噪声的实验研究[J].声学学报, 2001, 26(2): 161 – 168.
- QIAO Weiyang, Ulf Michel. A study on landing aircraft noise based on the fly-over measurements with a planar microphone array [J]. Acta Acustica, 2001, 26(2): 161 – 168. (in Chinese)
- [11] 于飞, 陈剑, 李卫兵, 陈心昭. 分离声场技术及其在近场声全息中的应用[J].物理学报, 2005, 54(2): 769 – 797.
- Yu Fei, Chen Jian, Li Wei-Bing, Chen Xin-Zhao. Sound field separation technique and its applications in near-field acoustic holography[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(2): 769 – 797. (in Chinese)
- [12] 于飞, 陈剑, 陈心昭. 双全息面分离声场技术及其在声全息中的应用[J].声学学报, 2003, 28(5): 385 – 389.
- Yu Fei, Chen Jian, Chen Xinzhaoh. Sound field separation technique with double holographic planes and its applications in acoustic holography [J]. Acta Acustica, 2003, 28(5): 385 – 389. (in Chinese)
- [13] 郝鹏, 郑四发, 杨殿阁, 连小珉, 李克强. 运动物体噪声场分解的传递路径声全息方法[J].振动与工程学报, 2010, 23(6): 591 – 595.
- HAO Peng, ZHENG Si-fa, YANG Dian-ge, LIAN Xiao-min, LI Ke-qiang. Decomposition of noise radiation using acoustics holograph for transfer path[J]. Journal of Vibration Engineering, 2010, 23(6): 591 – 595. (in Chinese)
- [14] 刘哲, 陈日林, 滕鹏晓, 杨亦春. 基于平面传声器阵列的声源定位系统的研究[J].声学技术, 2011, 30(2): 123 – 128.
- LIU Zhe, CHEN Ri-lin, TENG Peng-xiao, YANG Yi-Chun. Sound source localization system based on planar microphone array[J]. Technical Acoustics, 2011, 30(2): 123 – 128. (in Chinese)
- [15] 李加庆, 陈进, 张桂才, 陈少林, 刘先锋. 基于波叠加的噪声源识别方法[J].上海交通大学学报, 2006, 40(1): 124 – 128.
- LI Jia-qing, CHEN Jin, ZHANG Gui-cai, CHEN Shao-lin, LIU Xian-feng. A noise source identification technique based on wave superposition method[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(1): 124 – 128. (in Chinese)
- [16] 孙超. 水下多传感器阵列信号处理[M]. 西安: 西北工业大学出版, 2007. 26, 77, 80.
- [17] (美)第斯(Tree, H. L. V.)著; 汤俊等译. 最优阵列处理技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008. 20, 32, 45, 46.

作者简介



钱正莲 女, 1987年12月出生于安徽蚌埠. 2010年本科毕业于山东科技大学机械电子工程系, 同年因学习成绩优异被保送山东科技大学攻读动力机械及工程专业硕士, 2011年进入中国科学院声学研究所继续攻读硕士学位, 现为联合培养硕士生, 主要从事传声器阵列方面的理论研究.

E-mail: qianzhenglian1987@163.com



杨亦春 男, 1966年7月出生于湖南岳阳, 教授、博士生导师. 1983年~1990年在华东工学院获工学学士和硕士学位, 2000年获南京理工大学博士学位, 2000年~2002年在中国科学院攻读博士后, 现任中国科学院声学研究所研究员, 主要从事传声器阵列声成像、次声数字化仪、地震波探测方面的研究工作.

E-mail: yychun@mail.ioa.ac.cn