

# 哼唱搜索中一种基于 DTW 的 旋律相似度算法

· 算法研究 ·

叶晓勇, 刘 夙, 张贻雄, 郑灵翔

(厦门大学 通信工程系, 福建 厦门 361005)

**【摘要】** 哼唱搜索由于其用户要求低, 应用方便, 易于普及的特点, 是当前音乐搜索应用中的主流方式, 而旋律的相似度计算是哼唱搜索中直接影响搜索排名结果的关键技术。动态时间规整作为度量时间序列相似性的经典方法, 是旋律相似度计算的主要方法之一。根据哼唱搜索的特点, 提出了一种基于 DTW 的旋律相似度算法, 实验结果表明, 该算法进一步提高了哼唱搜索结果的精准度。

**【关键词】** 哼唱搜索; 旋律相似度计算; 动态时间规整

**【中图分类号】** TN912

**【文献标志码】** A

**Melody Similarity Algorithm Based on DTW Applied in Query by Humming System**

YE Xiaoyong, LIU Su, ZHANG Yixiong, ZHENG Lingxiang

(Department of Communication Engineering, Xiamen University, Xiamen Fujian 361005, China)

**【Abstract】** Query by humming is the most popular method used in music research applications for its features of user-friendly and easy to popularize. Melody similarity calculation is the key technology in query by humming which would decide the result of retrieval directly. Dynamic time warping, as a classic method used for time based on sequence similarity measuring, is also one of the most important methods applied in melody similarity calculation. A melody similarity algorithm based on DTW is provided. The experimental results show that great improvements have been achieved by this algorithm in accuracy of the result of query by humming.

**【Key words】** query by humming; melody similarity calculate; Dynamic Time Warping (DTW)

## 1 引言

随着现代信息技术, 特别是多媒体技术和移动终端技术的迅速发展和普及, 音乐搜索成为人们日益关注的热点。相对于传统的基于文本的音乐搜索方式, 哼唱搜索更关注了音乐本身, 同时又贴近用户习惯, 十分容易普及, 因此哼唱搜索成为主流的音乐搜索方式。就在近期, 腾讯 SOSO 也上线了哼唱搜索, Google 最新的 Android 4.1 Jelly Bean 系统也内置了哼唱搜索应用<sup>[1]</sup>, 体现了广大科技公司对于哼唱搜索的关注度。

在哼唱搜索中, 旋律的相似度计算是其重要的关键技术, 直接决定了搜索排名结果。相似度算法有多种, 例如: 传输距离算法(EMD)<sup>[2-3]</sup>, 欧氏距离法<sup>[4]</sup>, 动态时间规整(DTW)<sup>[5]</sup>等, 算法复杂度和准确度也都各不相同。本文提出一种基于 DTW 的相似度算法, 在盛大开源哼唱搜索系统 Snda Hummingv0.2 进行实验, 相比于该系统使用的原 DTW 算法, 改进的 DTW 算法试图进一步提高搜索准

确度。

## 2 哼唱搜索

哼唱搜索的主要步骤包括: 特征提取、音乐特征库、旋律相似度计算。在哼唱搜索中, 首先是特征提取, 特征提取是提取哼唱信号中的特征信息, 主要包括基音序列特征或者音符序列特征, 提取基音序列特征计算粒度更细, 因此精准度会更高。然后是旋律的相似度计算, 此计算可用于计算哼唱特征与音乐特征库匹配模板之间的相似度。本文工作基于盛大开源哼唱搜索系统 Snda Hummingv0.2, 它采用的音乐特征库是由 MIDI 文件包含的旋律信息构建, 同时它的相似度计算包括 EMD 算法和 DTW 算法, 其中 EMD 算法可以描述为解决线性规划的问题<sup>[6]</sup>, 复杂度较小, 用于第一次大数据量的搜索, 输出候选结果交给 DTW 算法, DTW 算法对 EMD 算法提供的候选结果进行二次搜索后, 给出最终的排名结果。哼唱搜索流程如图 1 所示。

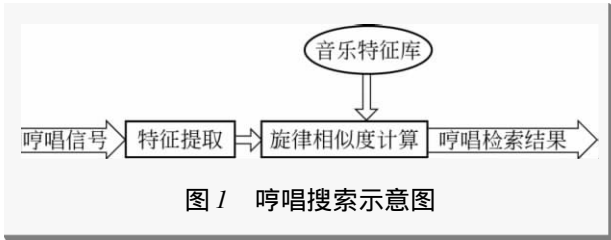


图1 哼唱搜索示意图

### 3 旋律相似度计算

在旋律的相似度计算中,有两种经典的用于度量时间序列相似性的方法分别是:欧氏距离和动态时间规整。但由于不同人哼唱旋律的速度快慢不同,因此哼唱与匹配模板之间的时间轴有偏差,如果使用基于欧氏距离的计算会产生很大的误差,而动态时间规整(DTW)可以克服这方面的不足。它可以将时间轴作扭曲或弯折,使得特征对正,这种非线性的弯曲算法可以获得很高的匹配精度<sup>[7]</sup>。

#### 3.1 DTW 算法

从哼唱搜索的角度来说明 DTW 算法原理。假设哼唱序列  $X$  总共有  $N$  帧,音乐特征库匹配模板序列  $Y$  有  $M$  帧,以两个序列为坐标轴建立一个二维直角坐标系,通过这些表示帧号的整数坐标画出一个网格图,如图 2 所示。其中每个网格的交叉点都代表了  $X$  序列  $Y$  序列中某两帧的交汇,也就是说如果路径通过该交叉点,则说明  $X$  序列中某一帧与  $Y$  序列中的某一帧就是相互对应的,相当于实现了一个时间轴的非线性弯曲,在这个交叉点就可以计算得到两帧之间的相似度。DTW 算法就是得到一条最优的路径,该路径下每个交叉点计算得到的相似度累计是最小的。

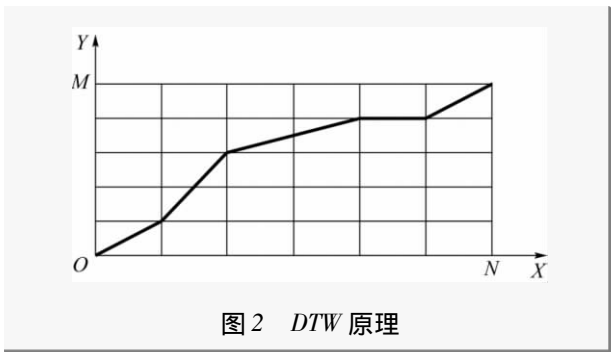


图2 DTW 原理

在最优路径下,两序列之间的相似度累计是最小的,DTW 算法为了求得这个最优路径,采用 DP(Dynamic Programming, 动态规划)的方法,所谓动态规划,其基本思想就是将原有的问题分解为相似的子问题,通过求解子问题得到原问题的解,它是一个用于

求解包含重叠子问题的最优化解决方法<sup>[4]</sup>。在这里为了求得最优路径,将最优路径分为一系列子问题。如果搜索路径的方式约束如图 3 所示。

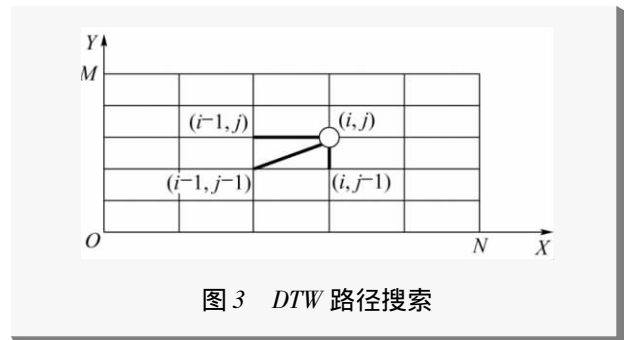


图3 DTW 路径搜索

假设某一点最优路径为  $D(i, j)$ , 则它上个交叉点有三种可能的选择,最优路径分别为  $D(i-1, j)$ ,  $D(i-1, j-1)$ ,  $D(i, j-1)$ 。最优路径  $D(i, j)$  是其上个交叉点的最优路径及其他到达  $(i, j)$  的代价函数之和中的最小值,因此可以得到最优路径  $D(i, j)$  的递归公式

$$D(i, j) = \min \begin{cases} D(i-1, j) + d_{i-1, j} \\ D(i-1, j-1) + d_{i-1, j-1} \\ D(i, j-1) + d_{i, j-1} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $d_{i-1, j}$  为代价函数。代价函数用于确定序列中时间对齐的两点之间的相似度,代价越小,相似性越高。代价函数通过比较音乐特征库匹配模板与哼唱特征提取到的特征信息得到。基本的哼唱特征提取可以提取出音高特征信息,而匹配模板由 MIDI 文件特征信息组成,因此也可以容易地得到音高信息。这样,哼唱序列的表示方式  $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_N\}$ , 其中  $x_i$  为哼唱旋律序列中第  $i$  帧的音高,  $1 \leq i \leq N$ ; 音乐特征库匹配模板序列为  $Y = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_M\}$ 。代价函数可表示为

$$d_{i-1, j} = |x_i| \quad (2)$$

$$d_{i-1, j-1} = |x_i - y_j| \quad (3)$$

$$d_{i, j-1} = |y_j| \quad (4)$$

#### 3.2 改进的 DTW 算法

以上 DTW 算法是盛大开源哼唱搜索系统 Snda Hummingv0.2 使用的相似度算法之一,但是通过测试发现基于上述 DTW 的相似度算法并没有使得最终排名结果达到非常理想的效果。具体分析发现该 DTW 在路径搜索中并没有充分考虑到哼唱的实际特性。首先人们哼唱必定有快慢变化,并不能完全按照标准模板的方式进行,搜索路径的约束不能仅仅限于三点。其次进一步分析可以得出在哼唱的过程中,每个

哼唱的部分的先后次序一定是不会颠倒的。哼唱一定是按照顺序进行的,而且哼唱的速率也不至于太快或者太慢。这些哼唱的特性都可以在路径搜索过程中通过路径的斜率来表示,因此可以对斜率做一些限制。最后为了防止算法漫无目的的搜索而平白增加搜索的复杂度,一些路径不需要添加,综合考虑得出新的合适的搜索路径约束,如图4所示。



图4 DTW搜索路径的改进

对于代价函数的设定,虽然以音高作为特征信息计算其代价函数的方式简单且容易理解,同时音高也是音乐最显著的特征之一,通过音高信息计算DTW的代价有一定的正确性,但是进一步分析音乐特征中显著的不仅仅是音高特征,音长信息也是显著特征之一。对于匹配模板,由于音乐特征库中由MIDI文件特征信息组成,可以非常容易地直接提取到音长信息。同时哼唱特征的提取中,已经提取到基音周期,基音周期相同或相近的帧数可以作为音长信息。因此考虑音高结合音长的特征序列,更能充分地表现音乐特征,使用新的旋律序列表示方式为

$$X' = \{(x_1 \quad tx_1) \ (x_2 \quad tx_2) \ (x_3 \quad tx_3) \ \dots \ (x_N \quad tx_N)\} \quad (5)$$

$$Y' = \{(y_1 \quad ty_1) \ (y_2 \quad ty_2) \ (y_3 \quad ty_3) \ \dots \ (y_N \quad ty_N)\} \quad (6)$$

其中  $tx_i$ 、 $ty_j$  为音长信息。新的代价函数表示音高信息与音长信息之积定义为

$$d_{i-1,j} = |x_i| \times tx_i \quad (7)$$

$$d_{i-1,j-1} = |x_i - y_j| \times |tx_i - ty_j| \quad (8)$$

$$d_{i,j-1} = |y_j| \times ty_j \quad (9)$$

$$d_{i-2,j-1} = |x_{i-1} - y_j| \times |tx_{i-1} - ty_j| \quad (10)$$

$$d_{i-1,j-2} = |x_i - y_{j-1}| \times |tx_i - ty_{j-1}| \quad (11)$$

## 4 实验结果

实验是基于盛大开源哼唱搜索系统 Snda Hummingv0.2 上实现并测试该算法。其中特征提取部分使用的是基于基音序列的特征提取方式,相似度计算部分首先使用了EMD算法进行了一次相似度的搜索,得到相似度前20名的候选序列。这20名候选序列将作为本文提出的基于DTW的相似度搜索算法的输入进

行二次高精度搜索。测试中共邀请了4名测试者,选取了4首测试歌曲,其中2首为男声歌曲,2首为女声歌曲。实验结果对原DTW算法和本文改进后DTW算法的搜索排名结果做了比较,排名数字表示演唱曲目在20个候选曲目中的名次,具体如表1所示。

表1 相似度计算结果

Snd Hummingv0.2		原相似度计算 (EMD + DTW)	本文相似度计算 (EMD + 本文 DTW)	
男声	《十年》	测试者 1	2	1
		测试者 2	9	2
		测试者 3	2	2
		测试者 4	3	1
	《只要你过得比我好》	测试者 1	8	4
		测试者 2	17	19
		测试者 3	18	13
		测试者 4	9	9
女声	《八月桂花遍地开》	测试者 1	18	2
		测试者 2	12	2
		测试者 3	17	3
		测试者 4	6	1
	《外婆的澎湖湾》	测试者 1	2	1
		测试者 2	7	1
		测试者 3	3	1
		测试者 4	14	1

测试结果显示,对于不同的测试歌曲,大部分都有一个明显的排名提升效果,很多测试结果直接提升到排名首位,这也表明了本文基于DTW的相似度搜索算法达到了一个预期的搜索效果。同时对于测试者个人而言,不同的个人,大部分有了提升的效果。这也证明了该哼唱搜索与音乐歌曲、哼唱个人并无相关性,算法的效果提升具有通用特性。

## 5 小结

本文提出了一种基于DTW的相似度算法,用于提高哼唱搜索最终结果的精度,在最后的测试结果中,达到了一个非常明显的效果,这部分工作主要体现在搜索的精确度方面,而对于搜索的时间度方面,并未对算法的时间复杂度进行深入的分析和改进,今后可以对时间性能进行进一步的研究工作。

参考文献

[1] UGMBBC. Android 4.1 Jelly Bean 增加哼歌搜索 widget

(下转第43页)

图5表明重构面在声源深度位置时,声场响应的最大值对应的 $XOY$ 平面上的坐标与声源的 $X, Y$ 坐标一致,即该方法在不同声源深度位置时,都能准确地识别定位声源的 $X, Y$ 坐标;然而,随着声源深度的增大,该方法的空间分辨率会逐渐变差。

## 4 讨论与结论

基于球面波波束形成理论,在声源深度未知的前提下,提出了平面阵列结合波束形成理论识别定位声源深度的方法,并模拟计算了声源的声场分布图。仿真计算结果验证了该方法的有效性。得出结论如下:(1)平面阵列结合波束形成方法能够识别定位三维声源。(2)随着声源距离的增大,该方法的空间分辨率会逐渐降低。

本方法研究的下一步工作是通过实验验证该方法的有效性,同时研究该方法在多声源识别时,声源深度对多声源识别定位的空间分辨率的影响,及其抗噪声和干扰的能力,以便确定该方法的适用范围。

### 参考文献

- [1] PARTHY A, VAN SCHAICK S C J A A. Acoustic holography with a concentric rigid and open spherical microphone array [C]// Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. [S. l.]: IEEE Press, 2009, 1(5): 2173-2176.
- [2] CHRISTENSEN J J, HALD J. Beamforming [J]. B&K Technical Review 2004(1): 1-31.
- [3] 刘月婵. TRM 声聚焦波束形成的噪声源定位技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [4] 褚志刚, 杨洋. 近场波束形成声源识别的改进算法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 178-183.
- [5] KENNEDY R A, ABHAYAPALA T D, WARD D B. Broad-band nearfield beamforming using a radial beampattern transformation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1998, 46(8): 2147-2156.
- [6] DHANANTWARI A C, STERGIPOPOULOS S, SONG L, et al. An efficient 3D beamformer implementation for real-time 4D ultrasound systems deploying planar array probes [J]. IEEE Ultrasonics Symposium 2004, 2: 1421-1424.
- [7] WASHBURN K B, FRAZER T, KUNIO J. Correlating noise sources identified by beamforming with sound power measurements [C]// SAE Technical Paper. [S. l.]: SAE, 2005.
- [8] TSHILIDZI M, JACO J, GUILLAUME N. Advanced beamforming techniques for acoustic source localization [C]// IEEE Africon Conference. [S. l.]: IEEE Press, 2009.
- [9] NEHORAI M A, HO K-C, TAN B T G. Minimum-Noise-Variance Beamformer with an electromagnetic vector sensor [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1999, 47(3): 601-618.
- [10] 梅东挺, 李春晓. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [11] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [12] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [13] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [14] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [15] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [16] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [17] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [18] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [19] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [20] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [21] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [22] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [23] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [24] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [25] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [26] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [27] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [28] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [29] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [30] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [31] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [32] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [33] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [34] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [35] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [36] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [37] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [38] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [39] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [40] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [41] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [42] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [43] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [44] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [45] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [46] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [47] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [48] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [49] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [50] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [51] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [52] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [53] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [54] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [55] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [56] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [57] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [58] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [59] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [60] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [61] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [62] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [63] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [64] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [65] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [66] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [67] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [68] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [69] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [70] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [71] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [72] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [73] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [74] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [75] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [76] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [77] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [78] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [79] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [80] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [81] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [82] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [83] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [84] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [85] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [86] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [87] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [88] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [89] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [90] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [91] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [92] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [93] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [94] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [95] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [96] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [97] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [98] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [99] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.
- [100] 李春晓, 梅东挺. 基于平面阵列的声源定位方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(10): 10-13.

(上接第38页)

[EB/OL]. [2012-07-01]. <http://www.cnbeta.com/articles/194894.htm>.

- [2] XIAO Qingmei, TSUGE S, KITA K. Music retrieval method based on filter-bank feature and earth mover's distance [C]//Seventh International Conference on Natural Computation. [S. l.]: IEEE Press, 2011: 1845-1849.
- [3] COHEN S, GUIBASM L. The earth mover's distance under transformation sets [C]// Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision. [S. l.]: IEEE Press, 1999: 1076-1083.
- [4] 李永健. 基于DTW和HMM的语音识别算法仿真及软件设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- [5] 苏昊, 王民, 李宝. 一种改进的DTW语音识别系统[J]. 中国西部科技, 2011, 10(1): 38-39.
- [6] RUBNER Y, TOMASI C, GUIBAS L J. A metric for distributions with applications to image databases [C]//Proceed-

### 作者简介

梅东挺 硕士研究生, 主要研究方向为球面波波束形成;  
李春晓 博士, 主要研究方向为水声信号处理, 水声学(海洋领域)。

[责任编辑] 闫雯雯

[收稿日期] 2012-10-26

ings of the 1998 IEEE International Conference on Computer Vision. [S. l.]: IEEE Press, 1998: 59-66.

- [7] 翁颖钧, 朱仲英. 基于动态时间弯曲的时序数据聚类算法的研究[J]. 计算机仿真, 2004, 21(3): 37-41.
- [8] 王亮. 基于矢量量化技术和DTW算法的说话人识别系统的实验研究[D]. 山东: 山东科技大学, 2008.
- [9] 蒋嵘, 李得毅. 基于形态表示的时间序列相似性搜索[J]. 计算机研究与发展, 2000, 37(5): 601-605.

### 作者简介

叶晓勇 硕士研究生, 主要研究方向为嵌入式系统及图像处理;  
刘凤 硕士研究生, 主要研究方向为视频编解码及集成电路设计;  
张贻雄 助理教授, 主要研究方向为嵌入式及图形处理;  
郑翔翎 高级工程师, 主要研究方向为嵌入式系统, 模式识别及网络通信。

[责任编辑] 彭燕

[收稿日期] 2012-10-15