

矢量的线上投影表示法

田 斌¹, 易克初¹, 孙民贵²

(1. 西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室, 西安 710071; 2. 美国匹兹堡大学电子工程系, PA15260, USA)

摘 要: 本文提出一种矢量压缩编码新方法——线上投影法。它将输入矢量用它在某条空间直线上的投影近似表示, 而用决定这条直线的两个参考点的序号和一个反映该投影点相对于两参考点位置的比例因子作为编码。由于一个大小为 N 的矢量量化码书中的码字可以确定 $N(N-1)/2$ 条直线, 因此这种方法可用较小的码书获得很高的编码精度。理论分析和实验结果表明: 码书大小为 N 的线上投影法的编码精度与码书大小为 N^2 的矢量量化法相当, 并且明显优于用两个大小为 N 的码书构成的两级矢量量化法, 而其码书生成和编码过程的计算复杂度均远远低于后者。它将是矢量信号高精度压缩编码的一种强有力的手段。

关键词: 矢量量化; 信源编码; 矢量投影

中图分类号: TN911.21, TN912.3

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2000) 10-0012-05

Vector Representation Based on Projection of Point on a Line

TIAN Bin¹, YI Ke-chu², SUN Min-gui²

(1. National Key Lab. on ISN, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. Dept of Electrical Eng., University of Pittsburgh, PA15260, USA)

Abstract: This paper proposes a novel method for vector coding, which approximately represents a vector with its orthogonal projection on a straight line. It encodes every vector with 3 codes, where two are used to represent two reference points to determine a straight line, and the third one is used to describe the location of the projection point. Since a N -sized vector quantization (VQ) codebook can determine $N(N-1)/2$ different straight lines, the new method can encode vectors with very high coding accuracy based on a rather small codebook. Theoretical analysis and experimental results suggest that its coding accuracy based on a N -sized codebook of size N^2 is comparable with that of VQ coding based on a N^2 -sized codebook, and much better than multi-stage VQ based on two codebooks of size N , while its computational complexity is much lower than the latter ones under equivalent accuracy obtained. The method would be a powerful tool for vector coding with high accuracy requirement.

Key words: VQ; source coding; vector projection

1 引言

矢量量化 (VQ) 是一种在语音信号处理与图像编码中广泛应用的高效信源编码技术^[1,2], 但目前的应用主要限制于压缩比要求很高而又允许产生较大失真的场合。要想单纯用 VQ 获得很高的编码精度, 就需要设计非常大的码书, 而这存在两方面的困难: (1) 码书设计的计算复杂度急剧增加; (2) 编码搜索过程的计算复杂度也随码书的增大而急剧增加, 不能实时或准实时实现。因此, VQ 在许多潜力本来很大的场合的应用受到很大限制。例如: 在语音识别和语音编码中, LPC (linear prediction coefficient, 线性预测系数)、MFCC (Mel-frequency cepstrum coefficient, MEL 频率倒谱系数) 等语音特征参数的压缩表示, 本来是矢量量化最能发挥优势的场合, 因为其失真测度已证明与人的主观感觉吻合得相当好。但由于精度要求高

而只能采用逐维标量量化, 这样 10~14 维的矢量就需要 40 比特以上。假如能进行 20 比特的 VQ 编码, 其主观效果应该更好。然而 20 比特码长的码书大小是 1,048,576, 其实现是无法想象的。尽管近年来研究出了许多种快速搜索算法^[3~6]和码书设计快速算法^[7~10], 但其搜索速度的提高或码书设计时间的节省最多也不超过一个数量级, 且往往以增加空间复杂度为代价。

本文提出的矢量线上投影法, 将输入矢量用它在某条直线上的投影近似表示。用两个参考点表示那条直线, 用一个比例因子描述这个投影点相对于两个参考点的位置, 即一组三元参数构成一个矢量的编码。因为一个 K 维矢量的数字表示, 实际上是以其端点的坐标值 $[v_1, v_2, \dots, v_K]$ 表示的, 因此, 一个 K 维矢量可以看作是 K 维空间中的一个点, 其几何表示

就是以该点为端点,以坐标原点为起点的向量.因此,一个大小为 N 的码书对应着 N 个点.如果不存在三点共线的情况,那么这 N 个点可以确定 $N(N-1)/2$ 条不同的空间直线.将待编码的矢量 X 的端点投影到这 $N(N-1)/2$ 条直线上,并找出其中离 X 最近的一个投影点以便近似表示 X ,这当然比 VQ 方法从 N 个码矢中挑选一个离它最近的码矢来表示的精度要高得多.本文不仅用两组实验计算结果证实了这种新方法优于常规 VQ,也优于多级 VQ,并且通过理论分析证明它之所以具有这样优良性能的必然性.文中详细介绍了与这种方法相应的码书设计算法和编码译码过程,并提供了能说明问题的若干实验数据和图表.

2 矢量的线上投影表示法基本原理

为了叙述方便,先建立一点预备知识——关于 K 维空间中点到直线的距离和投影.

定理:设有 k 维欧基里德空间中三个点: $X, A, B \in R^k$, 并设点 X 在直线 AB 上的投影为 X' , 如图 1 所示,则有

$$d^2(X, X') = d^2(A, X) - \frac{[d^2(A, X) + d^2(A, B) - d^2(X, B)]^2}{4 \times d^2(A, B)} \quad (1)$$

其中 $d(\cdot, \cdot)$ 表示两点之间的 K 维欧基里德距离.

证明:这个定理在二维情况下就是平面三角中的余弦定理.对于 $k=3$ 以上的高维情况,由公理“两点决定一条直线,三点决定一个平面”可知:只要将这个 k 维坐标系进行旋转和平移,使 A, B, X 三点处于某两条新坐标轴所决定的坐标平面上,也就有余弦定理成立了.由于坐标旋转平移时任何两点之间的距离保持不变,所以新坐标之下这四点之间的距离值可以在老坐标之下算得,即有式(1)成立.定理证毕.

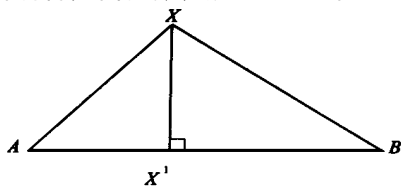


图 1 点到直线的距离和投影

矢量的线上投影表示法利用上述定理,把一个 k 维矢量 X 用它在某条空间直线 AB 上的正交投影 X' 近似表示.显然,只要 A, B 已知,并知道 X 对于 A 和 B 的相对位置,就可以准确求出 X' .例如:如果 X 在 A, B 两点之间或 AB 的延长线上,设距离比

$$r = d(X, A) / d(A, B) \quad (2)$$

则可用线性插值法求得:

$$X = (1 - r)A + rB \quad (3)$$

如果 X 在 BA 的延长线上,则 r 应该取负值.因此无论 X 是在 A, B 两点之间还是 A, B 两点之外,都可以用一般式表示 r ,即

$$r = (X - A) / (B - A) \quad (4)$$

为了有效的进行编码,这里的 A 和 B 可以从一个大小为 N 的码书中取,即

$$A, B \in YB_N = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_N | Y_i \in R^k\} \quad (5)$$

设码矢 A, B 的下标分别为 a 和 b ,则 X 可用一个三元参数组 (a, b, r) 精确地表示.因此,矢量 X 的投影表示(即编码过程),本质上是由 k 维空间向一个三元参数组 (a, b, r) 的映射:

$$(a, b, r) = Q(X) \quad (6)$$

其中 a, b 为两个码矢序号.译码过程则相反,是将符号 (a, b, r) 映射成一个 k 维矢量 X .译码过程除了用码书查表由 a 和 b 得到 A 和 B 之外,就是用式(3)计算.这个过程非常简单.下面重点讨论编码部分.

3 线上投影表示法的码书设计

码书生成方法可以采用传统的 LBG 算法^[1],但是, VQ 码书设计算法是基于使训练集内矢量的平均量化失真最小的准则,而不是基于线上投影表示达到最优,因此本文提出一种专门的两步算法:

(1) 首先采用 LBG 算法生成一个较大(大小为 M)的码书^[1,2] $YB_M = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_M | Y_i \in R^k\}$ 通常 M 不必选得太大,比如为 $2N$, 这里 N 为期望的码书大小.

(2) 采用如下的贪心算法从 YB_M 挑出 N 个码矢构成矢量线上投影表示法的码书,这个过程是由两个码矢开始,一个一个地逐步增加的.开始是采用全搜索算法从 M 个码矢中挑出两个,即初始化:

$$PS = \{Y_i, Y_j\} = \arg \min_{Y_i, Y_j \in YB_M} d(Y_k, L(Y_i, Y_j)) \quad (7)$$

其中 $d(X, L(A, B))$ 为点 X 到直线 AB 的距离,可由式(1)得到.然后增加一个码矢,直到码书大小达到 N ,即

FOR $l=3$ TO N DO

PS = PS + Y_o ;

$$\text{其中, } Y_o = \arg \min_{Y_o \in YB_M} \min_{Y_i, Y_j \in PS} d(Y_k, L(Y_i, Y_j)) \quad (8)$$

这种算法的复杂度可简单分析如下:计算式(7)的复杂度,大小为 M 码书可决定 $M(M-1)/2$ 条直线,从中挑出一条(即两个码矢),需要进行 $(M-2)M(M-1)/2$ 次点到直线的距离计算.如果预先计算出任意两个码矢的距离的平方后,再用式(1)计算一次点到直线的距离平方,就只需 6 次算术运算,即 3 次加,2 次乘,1 次比特移位.因此,其复杂度为 $O(6(M-2)M(M-1)/2) = O(M^3)$.这里 $O(\cdot)$ 表示算术运算次数的数量级.

计算式(8)时,对每一矢量保留它到 PS 集决定的直线的最小距离,这样,每增加一个矢量,剩余矢量到由于新增加一点而新增加的 $|PS|$ 个直线的距离.因此,复杂度为 $O(6 \sum_{i=2}^{N-1} i \cdot (M-i-1)) = O(MN^2)$.

4 线上投影表示的编码算法

编码算法为一搜索过程.假定码书 $YB_N = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_N | Y_i \in R^k\}$, 对任一矢量 X , 利用式(1)求出 X 到 $N(N-1)/2$ 条直线的距离,假定系统保留各个码字之间的距离平方 $d^2(Y_i, Y_j)$ $i, j=1, 2, 3, \dots, N, i \neq j$.只要求出 X 到 N 个码字的距离

平方 $d^2(X, Y_j) j=1, 2, 3, \dots, N$, 采用上面的符号约定, 便有

$$(a, b) = \arg \min_{i,j=1,2,3,\dots,N,i} d(X, L(Y_i, Y_j)) = \arg \min_{i,j=1,2,\dots,N,i} \int d^2(Y_j, X) - [d^2(Y_j, X) + d^2(Y_i, Y_j) - d^2(Y_i, X)]^2 / 4 \times d^2(Y_i, Y_j) \quad (9)$$

$$\text{因为, } \cos XY_a Y_b = \frac{d^2(Y_a, X) + d^2(Y_a, Y_b) - d^2(Y_b, X)}{2d(Y_a, X) \cdot d(Y_a, Y_b)} \quad (10)$$

设 X 在 $Y_a Y_b$ 所在直线上的投影为 X , 则向量 $X Y_a$ 与 $Y_a Y_b$ 要么同向, 要么反向, 其比为

$$\begin{aligned} r &= d(Y_a, X) \cos XY_a Y_b / d(Y_a, Y_b) \\ &= d(Y_a, X) \times \frac{d^2(Y_a, X) + d^2(Y_a, Y_b) - d^2(Y_b, X)}{2d(Y_a, X) \cdot d(Y_a, Y_b)} \\ &= \frac{d^2(Y_a, X) + d^2(Y_a, Y_b) - d^2(Y_b, X)}{2 \times d(Y_a, Y_b)} \quad (11) \end{aligned}$$

编码算法的复杂度主要是计算式(9), 此式每一次搜索的计算量只有 6 次算术运算. 显然小于码书为 N^2 的 VQ 编码搜索的复杂度. 稍微用一点技巧还可使搜索复杂度进一步降低.

5 矢量线上投影表示法精度的理论分析

实验结果表明(见图 3): 基于 N 个码字的线上投影法的量化精度可以和大小为 N^2 的 VQ 相当, 下面用一个简化模型给出其数学分析, 说明它具有这样的性能必然性.

先考虑码书大小为 N^2 的 VQ 情况: 设矢量维数为 m , 假定每个胞腔都是边长为 1 的 m 维超正方体, 那么这 N^2 个超立方体可以堆积成边长为 $N^{2/m}$ 的 m 维超正方体区域, 其总体积为 N^2 . 由于每个码字矢量都位于胞腔的中心, 因此最大量化误差为

$$D_{\max} = \sqrt{m}/2 \quad (12)$$

将其中一个单位超立方体的型心置于原点, 这个单位超立方体在第一象限的体积为:

$$V = 1/2^m \quad (13)$$

假定矢量在空间中均匀分布, 平均量化方差则为:

$$G_{\text{avg}} = \frac{0.5}{0} dx_1 \frac{0.5}{0} dx_2 \dots \frac{0.5}{0} dx_m / V = m/12 \quad (14)$$

再考虑码书大小为 N 的线上投影法: 如果考虑量化误差与上述 VQ 相当, 可以用一高度为 $N^{2/m}$ 柱体作为胞腔, 其“横断面”为 $(m-1)$ 维的超立方体, 其中轴即为投影线. 这个超立方体“横断面”, 无论是考虑最大误差相当还是考虑均方误差相当, 其边长都是 $\sqrt{m/(m-1)}$, 其体积为

$$V_1 = N^{2/m} (\sqrt{m/(m-1)})^{m-1} \quad (m > 1) \quad (15)$$

此时, 边长总大于 1. 这种柱体型胞腔覆盖整个量化区域 N^2 体积所需柱体个数为:

$$n_1 = N^2 / V_1 = N^{2-2/m} \left(\frac{m-1}{m} \right)^{\frac{1-m}{2}} \quad m > 1 \quad (16)$$

显然, $n_1 < N^2$. 而基于 N 个码字的线上投影法可以形成 $(N-1)N/2$ 个柱形体胞腔, 尽管它不能象前面想象的那样整齐地铺设, 可是它可以有很大的冗余覆盖, 其冗余覆盖倍数为:

$$k_1 = ((N-1)N/2) / n_1 = \frac{(N-1)N^{2/m-1} \left(\frac{m}{m-1} \right)^{(m-1)/2}}{2} \quad (17)$$

表 1 VQ(N^2) 与线上投影表示(N) 精度相当时参数推算表

m	N	D_{\max}	D_{avg}	n_1	k_1
2	16	.707	.167	11.31	12.02
2	32	.707	.167	22.63	23.33
2	64	.707	.167	45.25	45.96
3	32	.866	.25	67.73	7.796
3	64	.866	.25	170.67	12.19
3	128	.866	.25	430.05	19.20
4	32	1	.333	117.58	4.49
4	64	1	.333	332.55	6.25
4	128	1	.333	940.60	8.78
4	256	1	.333	2660.43	12.36
5	32	1.12	.417	163.84	3.22
5	64	1.12	.417	496.67	4.18
5	128	1.12	.417	1505.62	5.48
5	256	1.12	.417	4564.19	7.21
5	512	1.12	.417	13836.04	9.49
6	32	1.22	.5	204.47	2.58
6	64	1.22	.5	649.15	3.20
6	128	1.22	.5	2060.93	4.01
6	256	1.22	.5	6543.05	5.03
6	512	1.22	.5	20772.89	6.32
6	1024	1.22	.5	65949.80	7.96

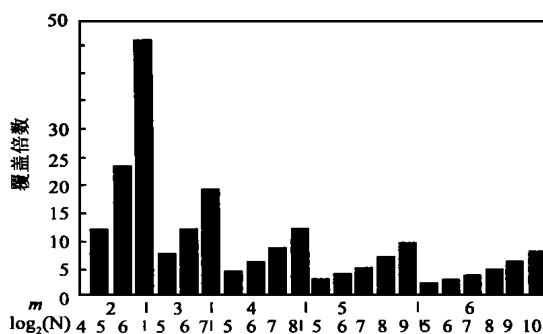


图 2 覆盖倍数 (k_1) 与矢量维数 (m)、码书大小 (N) 的关系直方图

当 N 足够大时, k_1 是大于 1 的数. 现在对 m, N 取不同值时计算各个参数的值列于表 1, 其中 Q_{\max} 和 G_{avg} 分别为最大量化失真和均方量化失真; 同时将 k_1 的部分直方图列于图 2, 表 1 和图 2 一方面可用于验证上述推导的正确性, 另一方面, 使我们对其冗余覆盖情况有个数量概念. 由以上分析和计算, 可以得到如下结论:

- (1) 冗余覆盖倍数随维数的增加而降低, 随 N 的增大而提高 (近似正比于 $N^{2/m}$), 其值很容易保证大于 1.
- (2) k_1 的值越大, 说明柱体的横断面可以更小, 即用线上投影表示矢量时的实际逼近误差可以更小.
- (3) 虽然这个推导是从最简单, 有规则的情况出发的, 但对于一般情况是有参考价值的. 在一般情况下, 参考点附近的

冗余覆盖倍数为 N , 它可以使参考点周围许多矢量的量化误差大大减小, 甚至比 N^2 大小码书的 VQ 的量化误差还要小。码书大小为 N 的线上投影法的量化误差比采用两个大小为 N 的码书构成的两级 VQ 的小, 也就不难理解了, 因为它用 N 个柱体划分参考点附近的区域, 每个分划都是一条线的邻域, 而两级 VQ 是用 N 个常规 VQ 胞腔划分同样的区域, 其分划是点的邻域。

(4) 虽然冗余覆盖倍数总是大于 1, 但由于实际分布不均匀, 柱体排列不规则, 因此可能这些假想的柱体横断面不够大, 将不能完全覆盖全空间, 但设想适当增大其横断面, 总可以覆盖全空间。

线上投影法之所以能有如此高的量化精度, 是因为基于 N 个码矢的码书, 可形成 $N(N-1)/2$ 条直线, 线上的每一点都可看作是一个码矢, 于是形成一个非常巨大的虚拟码书, 从而使量化失真大幅度减小。

6 实验结果

6.1 脑电图(EEG)数据压缩实验

采用 EEG 数字信号作线上投影表示法的压缩实验。由于脑电图数据缺乏模型假设, 不便像语音或者图像数据那样采用参数编码法压缩。首先对 EEG 信号作差分运算, 然后将每个 64 维矢量看作 8 个 8 维矢量, 分别进行矢量量化和线上投影矢量表示, 线上投影矢量表示的比例因子采用二字节量化表示。图 3 给出了不同码书大小下的信噪比, 并同时给出 VQ 和两级 VQ (两级码书大小相同) 的情况。码书形成分别采用 LBG 算法 (OLP-lbg) 和第三节提到的二步算法 (OLP-greedy), 训练集和测试集均为 294976 (36872 \times 8 维) 个数据。从图中可以看出:

(1) 无论采用 LBG 算法, 还是文中提出的算法形成线上投影表示码书, 基于 N 个码字的线上投影表示法, 均能与 N^2 大小的码书的 VQ 相当, 高于采用两个大小为 N 的码书构成的两级 VQ 的编码精度。

(2) 由 3.4 节的推证, 此时的码书 (N) 形成的复杂度和编码复杂度都要比相应的 VQ (N^2) 小得多。特别地, 当训练矢量

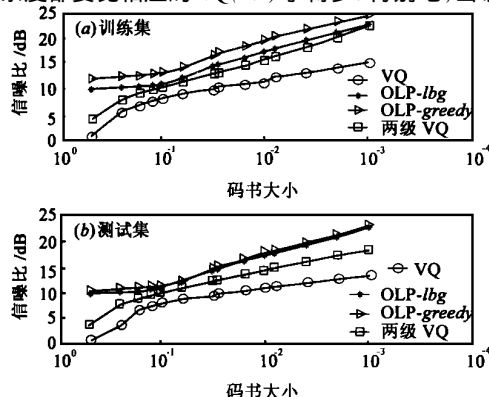


图 3 线上投影表示法(OLP)用于压缩 EEG 数据的性能与 VQ 和两级 VQ 的对比(其中 OLP-lbg 和 OLP-greedy 分别表示采用 LBG 算法和第三节中的二步算法形成码书的情况)

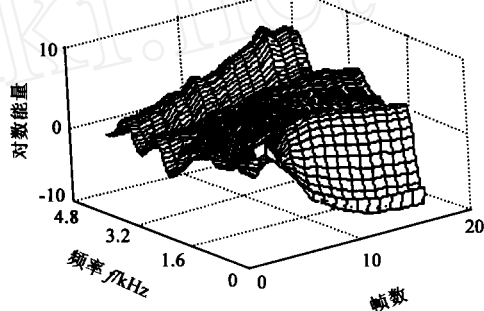
不足以形成大码书或者大码书的生成复杂度不能接受而又需要较高精度表示, 线上投影表示法更有 VQ 不可比拟的优点。

(3) VQ 对训练集内的表示均优于训练集外的表示 (两级 VQ 也有类似的结论), 而将同样的码书用于线上投影法时, 训练集内外则基本相同, 这说明一般 VQ 码书中有较强的线性相关性没有被充分利用。

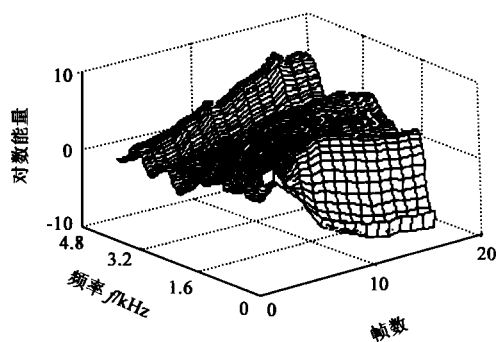
(4) 采用本文提出的二步算法得到的码书比采用 LBG 算法形成码书进行线上投影表示的性能要好, 这说明新码书中更好地利用了线性相关性。

6.2 语音特征矢量 MFCC 压缩编码表示实验

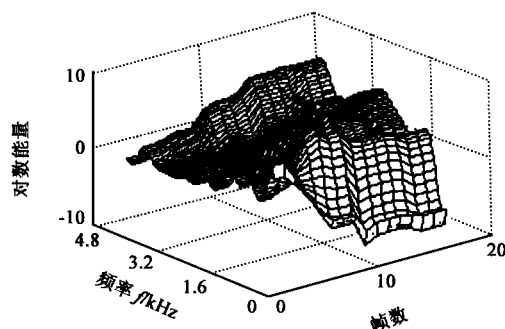
第二个实验采用语音特征矢量 MFCC 进行压缩编码表示, 矢量维数为 14 维, 训练矢量样本数为 188593 个, 采用码书大小为 $N=256$ 的线上投影法进行压缩表示, 其译码恢复的矢量与原矢量之间的误差能量已相当小。用信噪比表示, 训练



(a) Xuan 的谱图



(b) Xuan 的线上表示恢复谱图



(c) Xuan 的 VQ 恢复谱图

图 4 汉语音节“xuan”的 MFCC 参数 DCT 谱图对比

序列内矢量和训练序列外矢量分别为 21.8193dB, 和 20.4440dB. 这个结果应该与码书大小为 65,536 的 VQ 编码相当,可是要设计这么大的码书,估计在 300MHz 奔腾 PC 机上至少需要运行 5 万小时以上,自然不易实现. 由于量化误差引起它们所对应的动态频谱包络的误差,见图 4,256 点的线上投影法只引起很小的失真,而经 256 点 VQ 编码、译码后的谱包络出现了明显的失真,这恐怕就是为什么在语音编码和语音识别中人们一般不用 VQ 来压缩表示这样的特征矢量的根本原因. 而现在用线上投影法,可以轻而易举地获得 $4 \times 14/4 = 14$ 倍的压缩比. 从此不难看出本文所提方法的应用潜力是很大的.

7 结论

本文提出一种新的矢量表示方法,它用一个矢量在一个大小为 N 的矢量量化码书所决定的 $N(N-1)/2$ 条直线之一上的投影来近似表示该矢量. 理论分析和实验都证明了该方法在码书大小为 N 时的获得的编译码信噪比与码书大小为 N^2 的 VQ 相当. 它能有效地克服 VQ 方法在计算复杂度和编码精度方面的局限性. 为高维矢量的高精度压缩编码提供了一种强有力的手段.

至于这种新方法的编码效率或说压缩比问题,采用三元参数组进行编码,其压缩比自然比常规 VQ 要低一些. 但是由于这三个码元的概率分布都是极不均匀的,特别是比例因子 r ,其取值绝大部分都集中于 0 附近,完全可以采用 Huffman 码大幅度压缩其比特率,因此实际的数据压缩倍数仍然可与常规 VQ 相比拟. 当然,它的突出优点是能做到常规 VQ 无法做到的事. 与标量量化相比,它能以更高的压缩比达到更好的编码效果. 根据以上结果,有理由预言,这种新的编码方法至少可以在语音编码、语音识别等应用中取得很好的效果.

参考文献:

- [1] R. M. Gray. Vector quantization [J]. IEEE Acoustic, Speech, Signal Processing Mag., 1984, 1(4): 4 - 29.
- [2] 胡征,杨有为. 矢量量化原理与应用 [M]. 西安:西北电讯工程学院出版社,1988.
- [3] Lee Chang-hsing, Chen Ling-hwei. High-speed closest codeword search algorithms for vector quantization [J]. Signal Processing, 1995, 43(3): 323 - 331.
- [4] Lee Chang-hsing, Chen Ling-hwei. Fast search algorithm for vector quantization using mean pyramids of codewords [J]. IEEE Transactions on Communications, 1995, 43(4): 1697 - 1702.
- [5] LeBlanc-WP, Bhattacharya-B, Mahmoud-SA, Cupermar-V. Efficient search and design procedures for robust multi-stage VQ of LPC parameters for 4 kb/s speech coding [J]. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, 1993, 1(4): 373 - 385.
- [6] S. J. Baek, B. Jeon, K. M. Sung. A fast encoding algorithm for vector quantization [J]. IEEE Signal Processing Letters, 1997, 4(12): 325 - 327.
- [7] Zhu-Ce, Po-Lai Man. Minimax partial distortion competitive learning for optimal codebook design [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1998, 7(10): 1400 - 1409.
- [8] Katsavounidis-Iannis, Kuo-C-C-J, Zhang-Zhen. Fast generalized Lloyd iteration for VQ codebook design [C]. Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Bellingham, WA, USA., 1995 (2418): 76 - 87.
- [9] Cheng-S-M, Lo-K-T. Fast clustering process for vector quantisation codebook design [J]. Electronics Letters, 1996, 32(4): 311 - 312.
- [10] Cheng-S-M, Lo-K-T, Li-K-C. Efficient LBG initialisation method for image vector quantisation [J]. Electronics Letters, 1995, 31(19): 1654 - 1656.

作者简介:



田斌 分别于 1992 年, 1995 年获得西安电子科技大学计算机系学士、硕士学位. 2000 年 3 月获西安电子科技大学通信与信息系统博士学位, 现任电子科技大学综合业务网国家重点实验室副教授. 目前感兴趣的研究领域为语音识别、语音编码、通信信号处理及电子商务. 发表学术论文 10 余篇. Email: btian@mail.xidian.edu.cn.



易克初 1967 年毕业于华中理工大学无线电技术专业, 后来分别在中国科技大学和西安电子科技大学获硕士和博士学位, 并在英美做高访各一年, 现为西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室教授、博士生导师. 目前感兴趣的领域有语音处理、卫星通信、电子商务. Email: kchy@xidian.edu.cn