

哈德码变换域等均值等方差最近邻矢量量化码字搜索算法

姜守达, 陆哲明, 裴 慧

(哈尔滨工业大学自动化测试与控制研究所, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要: 本文提出一种基于哈德码变换的等均值等方差最近邻 (HTEENNS) 快速矢量量化码字搜索算法. 在编码前, 该算法预先计算每个码字的哈德码变换, 然后根据各码字哈德码变换的第一维系数大小的升序排列对码字进行排序. 在编码过程中, 首先计算输入矢量的哈德码变换和方差, 然后选取与输入矢量哈德码变换的第一维系数最近的码字作为初始匹配码字, 然后利用两条有效的删除准则在该码字附近进行上下搜索与输入矢量最近的码字. 测试结果表明, 本文算法比等均值最近邻搜索算法 (ENNS)、等均值等方差最近邻搜索 (EENNS) 算法和哈德码变换域部分失真搜索算法等算法有效得多.

关键词: 矢量量化; 码字搜索; 快速编码; 哈德码变换

中图分类号: TN919.31 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 09-1543-03

Equal-Average Equal-Variance Nearest Neighbor Search Algorithm Based on Hadamard Transform

JIANG Shou-da, LU Zhe-ming, PEI Hui

(Department of Automatic Test and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract: A fast VQ encoding algorithm, Hadamard transform (HT) based equal-average equal-variance nearest neighbor codeword search algorithm (HTEENNS), is presented. Before the search process, all codewords in the codebook are Hadamard-transformed and sorted in the ascending order of their first elements. During the search process, we firstly perform the HT on the input vector and calculate its variance, and initialize the current closest codeword of the input vector to be the codeword whose Hadamard-transformed first element is nearest to the input vector's, and secondly two efficient elimination criteria are used to find the nearest codeword to the input vector using the up-down search mechanism near the initial best-match codeword. Experimental results demonstrate that the performance of the proposed algorithm is much better than that of the ENNS, EENNS, and Hadamard transform based PDS algorithms.

Key words: vector quantization; codeword search; fast encoding; Hadamard transform

1 引言

矢量量化 (Vector Quantization, VQ) 技术^[1,2]已经广泛地应用于语音编码和图像压缩系统中. 矢量量化过程可以定义为从 k 维欧几里德空间 \mathbf{R}^k 到其一个有限子集 \mathbf{C} 的一个映射, 即 $Q: \mathbf{R}^k \rightarrow \mathbf{C}$, 其中 $\mathbf{C} = \{y_0, y_1, \dots, y_{N-1} \mid y_i \in \mathbf{R}^k\}$ 称为码书, N 为码书长度. 该映射满足: $Q(x) = y_p$, 其中 $x = (x_0, x_1, \dots, x_{k-1})$, $y_p = (y_{p0}, y_{p1}, \dots, y_{p(k-1)})$ 并满足

$$d(x, y_p) = \min_{0 \leq i \leq N-1} d(x, y_i) \quad (1)$$

其中 $d(x, y_i)$ 为矢量 x 与码字 y_i 之间的失真测度, 常用的失真测度为欧氏距离的平方, 其表达式为

$$d(x, y_i) = \sum_{l=0}^{k-1} (x_l - y_{il})^2 \quad (2)$$

在矢量量化编码阶段, 需要为每个输入矢量 x 在预先设计好的码书 \mathbf{C} 中进行一个最近邻码字搜索过程. 穷尽搜索 (Full Search, FS) 算法可以用来搜索输入矢量的最近码字. 假定采用平方误差测度来衡量输入矢量 x 与码字 y_i 之间的失

真, 那么最近邻码字搜索的目的是找到满足式 (1) 的码字 y_p . 为了找到输入矢量 x 的最近码字, 穷尽搜索算法需要 kN 次乘法, $(2k-1)N$ 次加法和 N 次比较. 当矢量维数 k 和码书大小 N 增加时, 计算量将快速增长. 因此, 如何减少计算负担已经变成 VQ 编码中的一个重点研究问题. 为此近年来文献中提出了各种快速矢量量化编码算法, 这些算法可以分为两类: 一类是基于特殊码书结构的快速算法. 这类算法依赖于码书结构而在编码时只搜索较小的子码书, 如分类矢量量化和树搜索矢量量化等; 第二类算法不依赖码书, 这类算法通常采用一些码字排除准则以减少计算量, 如部分失真搜索算法 (Partial Distortion Search, PDS)^[3]、双测试算法 (Double Test Algorithm, DTA)^[4]、等均值最近邻搜索算法 (Equal-Average Nearest Neighbor Search, ENNS)^[5]、范数排序搜索算法 (Norm-Ordered Search, NOS)^[6]、等均值等方差最近邻搜索算法 (Equal-Average Equal-variance Nearest Neighbor Search, EENNS)^[7] 和最近提出的哈德码变换域部分失真搜索算法 (Hadamard-Transform based PDS, HTPDS)^[8]、哈德码变换域范数排序搜索算法^[9]、基于子矢量

技术的搜索算法^[10], 均值等方差等范数最近邻搜索算法 (Equal-average Equal-variance Equal-norm Nearest Neighbor Search, EEENNS)^[11], 快速范数排序搜索算法^[12]等等. 对于第二类算法来说, 一种有效的码字搜索算法的必须具备良好的初始匹配码字、合理的码字搜索顺序和强有力的码字删除准则. 显然, 如果码字搜索开始于一个跟输入矢量比较接近的码字, 随后的候选码字将很容易检验和排除从而最大限度地节省计算量. 另一方面, 搜索范围和顺序决定了需要检测码字的最少数目, 它在码字搜索算法中是至关重要的. 本文首先回顾一下几种相关的码字搜索算法, 然后提出本文算法, 并用图像编码为例对这些算法进行仿真, 最后给出结论.

2 先前的一些码字搜索算法

2.1 部分失真搜索算法 (PDS)

PDS 算法^[3]是一种简单有效的最近邻搜索算法. 它的基本思想是: 在计算某个码字与输入矢量之间的失真测度的过程中始终判断累加的部分失真是否已经超过目前的最小失真, 一旦超出则终止该码字与输入矢量之间的失真计算. 其基本原理如下:

定理 1 假定目前最小失真为 $d_{\min} = d(x, y_p)$, $0 \leq p \leq N - 1$, $0 \leq s \leq k - 1$, 若

$$\sum_{l=0}^s (x_l - y_{il})^2 \geq d_{\min} \quad (3)$$

则 $d(x, y_i) \geq d(x, y_p)$.

PDS 常常用于许多快速搜索算法的最后一步, 以排除其它方法已经没法排除的码字.

2.2 等均值最近邻搜索算法 (ENNS)

k 维矢量 x 的均值定义为 $m_x = \left(\sum_{l=0}^{k-1} x_l \right) / k$, 容易证明如下均值不等式删除准则:

定理 2 假定目前最小失真为 $d_{\min} = d(x, y_p)$, m_i 为码字 y_i 的均值, 若 $|m_i - m_x| \geq \sqrt{d_{\min}/k}$

则 $d(x, y_i) \geq d(x, y_p)$.

基于定理 2 的最近邻搜索算法在文献 [5] 中称为等均值最近邻搜索算法 (ENNS).

2.3 等均值等方差最近邻搜索算法 (EENNS)

等均值等方差最近邻码字搜索算法^[7]在运用均值不等式删除准则的同时采用了如下的方差不等式删除准则:

定理 3 设当前的最小失真为 $d_{\min} = d(x, y_p)$, v_i 为码字 y_i 的方差. 若 $|v_i - v_x| \geq \sqrt{d_{\min}}$

则 $d(x, y_i) \geq d(x, y_p)$.

3 本文算法

令 H_n 为 $2^n \times 2^n$ 的哈德码矩阵, 其元素属于集合 $\{1, -1\}$. 假定以下所有矢量为 k 维矢量, $k = 2^n$ ($n > 0$), 则可得到以下基本定义和性质:

$$(1) H_1 = \begin{Bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{Bmatrix}, H_{n+1} = \begin{Bmatrix} H_n & H_n \\ H_n & -H_n \end{Bmatrix};$$

(2) 矢量 x 的哈德码变换矢量 X 可定义为 $X = H_n x$;

(3) $X_0 = S_x$, 这里 X_0 为矢量 x 的第一维分量;

(4) 定义范数 $x = \sum_{i=0}^{k-1} x_i^2$, 则 $X = k \cdot x$;

(5) $d(X, Y_i) = k \cdot d(x, y_i)$.

因此在哈德码域中搜索最近邻码字与空间(时)域中搜索最近邻码字是等价的. 此外, 哈德码变换不需要乘法运算. v_x 为矢量 x 的方差. 定义哈德码变换域方差 $V_x = \sqrt{X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_{k-1}^2}$. 本文对定理 3 作了一些改进, 可得出如下删除准则:

定理 4 假定目前最小失真为 $D_{\min} = d(X, Y_p)$, V_i 为码字 y_i 哈德码变换矢量 Y_i 的方差, Y_{i0} 为哈德码变换域码字矢量 Y_i 的第一维分量, 若

$$|V_i - V_x| \geq \sqrt{D_{\min}} \quad (6)$$

则 $d(x, y_i) \geq d(x, y_p)$. 同时, 若

$$|X_0 - Y_{i0}| \geq \sqrt{D_{\min}} \quad (7)$$

则 $d(x, y_i) \geq d(x, y_p)$.

证明 由 $v_x^2 = \sum_{i=0}^{k-1} (x_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=0}^{k-1} x_i^2 - k\bar{x}^2 = x - k\bar{x}^2$

$$= \frac{X}{k} - \frac{X_0^2}{k} = \frac{X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_{k-1}^2}{k} \quad \text{导出}$$

$$V_x = v_x \sqrt{k} \quad (8)$$

$$\text{同理可得} \quad V_i = v_i \sqrt{k} \quad (9)$$

另一方面, 由 $m_x = \left(\sum_{l=0}^{k-1} x_l \right) / k = X_0 / k$ 可导出

$$X_0 = m_x \cdot k \quad (10)$$

$$\text{同理可得} \quad Y_{i0} = m_i \cdot k \quad (11)$$

若 $|V_i - V_x| \geq \sqrt{D_{\min}}$, 则由式(8)、(9)可得 $|v_i - v_x| \geq \sqrt{d_{\min}}$, 从而根据定理 3, 可得 $d(x, y_i) \geq d(x, y_p)$. 若 $|X_0 - Y_{i0}| \geq \sqrt{D_{\min}}$, 则由式(10)、(11), 可得 $|m_i - m_x| \geq \sqrt{d_{\min}/k}$, 从而根据定理 2, 可得 $d(x, y_i) \geq d(x, y_p)$. 证毕.

如果对式(6)、(7)作适当变形, 令 $V_{\max} = V_x + \sqrt{D_{\min}}$, $V_{\min} = V_x - \sqrt{D_{\min}}$, $Y_{\max 0} = X_0 + \sqrt{D_{\min}}$, $Y_{\min 0} = X_0 - \sqrt{D_{\min}}$. 则定理 4 可描述为: 若 $Y_{i0} \geq Y_{\max 0}$ 或 $Y_{i0} \leq Y_{\min 0}$, 则 $d(x, y_i) \geq d(x, y_p)$; 同时若 $V_i \geq V_{\max}$ 或 $V_i \leq V_{\min}$, 则 $d(x, y_i) \geq d(x, y_p)$.

HTEENNS 算法在开始搜索前需要离线计算每个码字的哈德码变换和各码字哈德码变换矢量的方差 V_i , 其中 $i = 0, 1, \dots, N - 1$, 然后按各码字哈德码变换的第一维系数大小对码书进行升序(或降序)排列. 在编码阶段, 需要在线计算输入矢量 x 的哈德码变换和其哈德码变换矢量的方差, 通过二分查找法在码书中搜索与输入矢量哈德码变换的第一维系数 X_0 最近的哈德码变换矢量的第一维系数 y_{p0} 所对应的码字 y_p , 并将该码字作为初始匹配码字. 算法采用上下搜索法, 即在码字 y_p 附近进行上下搜索, 一旦某个方向上的码字的哈德码变换的第一维系数满足 $Y_{i0} \geq Y_{\max 0}$ 或 $Y_{i0} \leq Y_{\min 0}$, 则码字 y_i 可以删除, 而且此后该方向的搜索彻底停止而只在另一方向上进行搜索; 否则, 如果 $V_i \geq V_{\max}$ 或 $V_i \leq V_{\min}$, 码字 y_i 也可以删除, 转另一方向进行搜索. 如果不能排除, 则采用 PDS 技术计算失真测度(如果 $d_{\min} > d(y_i, x)$, 则更新 d_{\min}), 而转另一方向进行搜索. 如果两个方向的搜索均停止, 则算法结束.

测试结果表明,在使用大码书大分块的情况下,本文算法比等均值最近邻搜索算法(ENNS)和等均值等方差最近邻搜索(EENNS)算法有效得多。

4 仿真实验

为了验证算法的效果,本文首先用 512×512 的 256 灰度的标准图像作为训练图像用 LBG 算法^[2]产生四种码书,码书大小为 $N=512$ 或 $N=1024$,而矢量维数为 $k=8 \times 8=64$ 或 $k=16 \times 16=256$ 。然后用这些码书对 512×512 的 256 灰度的“Lena”和“Peppers”图像进行编码。为了比较,本文对穷尽搜索(FS)、部分失真算法(PDS)、双测试算法(DTA)、范数排序搜索算法(NOS)、等均值最近邻搜索算法(ENNS)^[6]、等均值等方差最近邻搜索算法(EENNS)^[7]和哈德码域部分失真搜索算法^[8](HTPDS)均作了相应测试。所有测试在 Pentium 计算机上进行,编码时间的测试结果如表 1 所示(单位为秒)。编码平均计算量的测试结果如表 2 所示(单位为失真计算次数/输入矢量)。从表中可以看出,对于不同大小的码书和不同的矢量维数,本文算法都是最有效的。

表 1 各算法的编码时间比较

算法	$N=1024$		$N=512$	
	$k=16 \times 16$	$k=8 \times 8$	$k=16 \times 16$	$k=8 \times 8$
FS	31.505	31.595	15.693	15.833
PDS	4.025	3.856	2.574	2.323
DTA	3.425	3.315	2.223	1.973
NOS	1.322	1.612	1.081	0.971
ENNS	1.282	0.931	1.021	0.641
EENNS	1.222	0.791	1.011	0.581
HTPDS	1.001	0.841	0.881	0.631
HTEENNS	0.931	0.701	0.811	0.551

表 2 各算法的编码平均计算量比较

算法	$N=1024$		$N=512$	
	$k=16 \times 16$	$k=8 \times 8$	$k=16 \times 16$	$k=8 \times 8$
FS	1024	1024	512	512
PDS	112.249	99.620	71.389	60.579
DTA	102.328	69.014	65.217	62.618
NOS	74.191	81.115	61.284	49.886
ENNS	34.755	24.026	27.702	16.581
EENNS	29.023	17.639	23.939	12.958
HTPDS	18.217	15.229	15.351	10.788
HTEENNS	16.907	12.297	14.821	9.395

5 结论

本文提出了一种哈德码变换域等均值等方差最近邻矢量量化码字搜索算法。该算法利用了哈德码变换域矢量的两个特征量:均值和方差,以排除更多的不匹配码字而节省失真计算量。仿真结果表明,本文的 HTEENNS 算法比 ENNS 算法、EENNS 算法和 HTPDS 算法有效。

参考文献:

- [1] A Gersho, R M Gray. Vector Quantization and Signal Compression [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [2] YLinde, A Buzo, R M Gray. An algorithm for vector quantizer design [J]. IEEE Trans, 1980, COM-28(1): 84 - 95.
- [3] C D Bei, R M Gray. An improvement of the minimum distortion encod-

ing algorithm for vector quantization [J]. IEEE Trans, 1985, COM-33(10): 1132 - 1133.

- [4] T Torres, J Hugué. An improvement on codebook search for vector quantization [J]. IEEE Trans, 1994, COM-42(2): 208 - 210.
- [5] L Guan, M Kamel. Equal-average hyperplane partitioning method for vector quantization of image data [J]. Pattern Recognition Letters, 1992, 13(10): 693 - 699.
- [6] K S Wu, J C Lin. Fast VQ encoding by an efficient kick-out condition [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2000, 10(1): 59 - 62.
- [7] C H Lee, L H Chen. Fast closest codeword search algorithms for vector quantization [J]. Signal Processing, 1995, 43(3): 323 - 331.
- [8] Zhe-ming Lu, Jeng-shyang Pan, Sheng-he Sun. Efficient codeword search algorithm based on Hadamard transform [J]. ELECTRONICS LETTERS, 2000, 36(16): 1364 - 1365.
- [9] Zhe-ming Lu, Dian-guo Xu, Sheng-he Sun. Fast codeword search algorithm for image vector quantization based on ordered hadamard transform [J]. IEICE, 2003, E-86D(7): 1318 - 1320.
- [10] Jeng-shyang Pan, Zhe-ming Lu, Sheng-he Sun. An efficient encoding algorithm for vector quantization based on subvector technique [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(3): 265 - 230.
- [11] Zhe-ming Lu, Sheng-he Sun. Equal-average equal-variance equal-norm nearest neighbor search algorithm for vector quantization [J]. IEICE Transactions on Information and Systems, 2003, E-86D(3): 660 - 663.
- [12] Shouda Jiang, Zheming Lu, Qi Wang. Fast nonordered codeword search algorithms for image vector quantization [J]. Chinese Journal of Electronics, 2003, 12(3): 373 - 376.

作者简介:



姜守达 男, 1964 年 9 月出生于中国黑龙江省伊春市, 哈尔滨工业大学自动化测试与控制系教授, 哈尔滨工业大学电子测量技术及仪器专业博士, 研究方向为自动测试技术和信息处理技术。



陆哲明 男, 1974 年 6 月生于浙江省东阳市, 1997 年和 2001 年分别获得哈尔滨工业大学硕士和博士学位, 现为哈尔滨工业大学自动化测试与控制系教授, IEEE 和 SPIE 会员, 获部级一等奖一项, 二等奖一项, 2003 年获全国优秀博士论文奖, 发表专著 1 部, 论文 80 余篇, SCI 收录 23 篇, 目前主要致力于图像处理和信息安全研究。



裴慧 女, 1980 年 12 月生于湖南省永州市, 2002 年获得哈尔滨工业大学学士学位, 现为哈尔滨工业大学自动化测试与控制系硕士研究生, 目前主要致力于图像压缩研究。