

等均值等范数最近邻矢量量化码字搜索算法

刘春和, 陆哲明, 孙圣和

(哈尔滨工业大学自动化测试与控制系, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要: 本文提出了一种等均值等范数最近邻(EENNS)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均值和范数, 然后根据均值大小的升序排列对码字进行排序. 在编码过程中, 首先选取与输入矢量均值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)和最近提出的范数排序搜索(NOS)算法有效得多.

关键词: 矢量量化; 码字搜索; 快速编码

中图分类号: TN 919. 31 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 10-1552-04

An Equal-Average Equal-Norm Nearest Neighbor Codeword Search Algorithm for Vector Quantization

LIU Chunhe, LU Zheming, SUN Shenghe

(Dept. of Automatic Test and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: An equal-average equal-norm nearest neighbor codeword search algorithm (EENNS) is presented for vector quantization in this paper. Before encoding, the mean value and norm are first computed for each codeword, and then codewords are ordered according to the ascending order of their mean values. During the encoding process, the algorithm first selects the codeword that has minimum mean distance from the input vector as the tentative matching codeword, and then applies two efficient elimination criteria to search the nearest codeword close to the tentative matching codeword up and down. Experimental result shows that this algorithm is more efficient than the equal-average nearest neighbor search algorithm (ENNS) and recently presented norm-ordered search algorithm (NOS).

Key words: vector quantization; codeword search; fast encoding

1 引言

由于高压缩比和解码简单, 矢量量化(Vector Quantization, VQ)^[1,2]已经广泛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 R^k 到其一个有限子集 C 的一个映射, 即 $Q: R^k \rightarrow C$, 其中 $C = \{y_1, y_2, \dots, y_N | y_i \in R^k\}$ 称为码书, N 为码书大小. 该映射满足: $Q(x) = y_i \in R^k$, 其中 $x = (x_1, x_2, \dots, x_k)$, $y_p = (y_{p1}, y_{p2}, \dots, y_{pk})$, 并满足:

$$d(x, y_p) = \min_{i \in \{1, \dots, N\}} d(x, y_i) \quad (1)$$

$d(x, y_i)$ 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:

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

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 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 . 这样一来, 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, 多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大类: 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], 超立方体测试算法^[5], 等均值最近邻搜索算法(Equal-Average Nearest Neighbor Search, ENNS)^[6]和最近提出的范数排序搜索算法(NOS)^[7]等. 对于第二类算法来说, 一种有效的码字搜索算法的三个必不可少的因素是: (1) 良好的初始匹配码字; (2) 合理的码字搜索顺序; (3) 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 $d_{\min} = d(x, y_p)$, $1 \leq p \leq N$, $1 \leq s \leq k$, 若

$$\sum_{i=1}^s (x_i - y_{i1})^2 \geq d_{\min} \quad (3)$$

则 $d(x, y_i) \geq d(x, y_p)$.

定理 1 是显然成立的. 因此, 在计算码字 y_i 和输入矢量 x 的失真过程中, 若满足不等式(3), 则 y_i 肯定不是 x 的最近码字, 从而可停止该失真计算而转入对下一个码字的判断. 部分失真搜索算法的效率是有限的, 但是它不需要额外存储空间, 没有附加的乘法计算量. 因此, 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:

$$m_k = \left(\sum_{i=1}^k x_i \right) / k \quad (4)$$

设 L 为 R^k 上的一条直线, 如果 L 上任一点 $p = (p_1, p_2, \dots, p_k)$ 都满足 $p_1 = p_2 = \dots = p_k$, 则称 L 为 R^k 的中心线. 如果 L 为中心线, 则 x 在直线 L 上的投影点为 $L_x = (m_k, m_k, \dots, m_k)$, 为此可以定义与 L 正交的超平面为等均值超平面. 也就是说, 与中心线正交的超平面上所有点(矢量)具有相同均值. 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

$$|m_i - m_k| \geq \sqrt{d_{\min}/k} \quad (5)$$

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[6]中称为等均值最近邻搜索算法(ENNS). 如果对式(5)作适当变形, 令

$$m_{\max} = m_k + \sqrt{d_{\min}/k} \text{ 及 } m_{\min} = m_k - \sqrt{d_{\min}/k} \quad (6)$$

则定理 2 可描述为: 若 $m_i \geq m_{\max}$ 或 $m_i \leq m_{\min}$, 则 $d(x, y_i) \geq d(x, y_p)$. ENNS 算法将搜索范围限制到两个平行的等均值超平面内, 这两个超平面的均值分别为 m_{\max} 和 m_{\min} , 并与中心线 L 分别相交于 $L_{\max} = (m_{\max}, m_{\max}, \dots, m_{\max})$ 点和 $L_{\min} = (m_{\min}, m_{\min}, \dots, m_{\min})$ 点. 图 1 为 2 维情况下的示意图, 算法的搜索区域限制在直线 L_1 和 L_2 之内, 这两条直线分别与中心线 L 垂直相交于 L_{\max} 点和 L_{\min} 点. 图中输入矢量 x 同初始匹配码字 y_p

之间的距离 r_p 等于 d_{\min} 的开方, 任何其它比 y_p 更接近于 x 的码字均可在以 x 为球心, 以 r_p 为半径的超球体内找到. 将此超球体向中心线 L 上投影, 可得到两个边界投影点 L_{\max} 和 L_{\min} , 故只有均值在 m_{\min} 和 m_{\max} 之间的码字才能被搜索到.

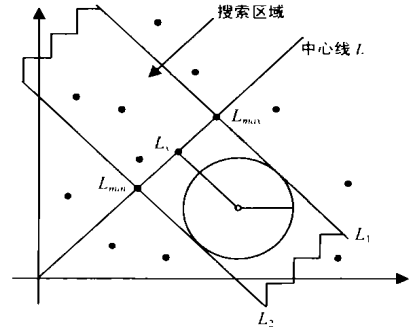


图 1 ENNS 算法的搜索范围示意图

ENNS 算法在开始搜索前需要离线计算各码字的均值 $m_i, i = 0, 1, \dots, N-1$, 然后按码字均值的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 的均值 m_k , 通过二分查找法在码书中搜索与 m_k 最相近的均值 m_p 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均值满足式(6), 则该方向的搜索停止.

2.3 双测试算法(DTA)

文献[4]通过对平方误差的展开式进行分析, 提出了双测试算法(DTA). 若定义矢量 x 的 22 范数为:

$$\|x\|_2 = \sqrt{\sum_{n=1}^k x_n^2} \quad (7)$$

则, DTA 算法可以用如下定理描述:

定理 3 设矢量 x 和码字 y_i 的各分量均不小于零, 即 $x_l \geq 0, y_{il} \geq 0, l = 1, 2, \dots, k$, 设 $x_{\max} = \max\{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ 及 $y_{\max} = \max\{y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{ik}\}$, 令:

$$d_1(x, y_i) = \|x\|_2^2 + \|y_i\|_2^2 - 2x_{\max} \sum_{i=1}^k y_{il} \quad (8)$$

$$d_2(x, y_i) = \|x\|_2^2 + \|y_i\|_2^2 - 2y_{\max} \sum_{i=1}^k x_i \quad (9)$$

若

$$d_1(x, y_i) \leq d_{\min} \text{ 或 } d_2(x, y_i) \leq d_{\min} \quad (10)$$

则 $d(x, y_i) \leq d(x, y_p)$.

双测试算法的含义就是用式(10)所包含的两项准则来删除不匹配的码字. 该算法没有选择初始匹配码字, 需要离线计算和存储各码字的 22 范数和分量最大值. 在编码时, 需要在线计算输入矢量的 22 范数和分量最大值, 所以该算法的搜索效率不高. 此外, 该算法要求矢量的各分量大于零, 所以应用范围有限, 一般用于图像编码算法中.

2.4 范数排序搜索算法(NOS)

为了提高双测试算法的搜索效率, 文献[7]提出了一种有效的剔除条件. 该算法考虑了等价的误差测度, 即:

$$d_i(x, y_i) = d(x, y_i) - \|x\|_2^2 - \|y_i\|_2^2 - 2 \sum_{i=1}^k x_i y_{il} \quad (11)$$

根据柯西2施瓦茨不等式

$$\sum_{i=1}^k x_i y_i \leq \sqrt{\sum_{i=1}^k x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^k y_i^2} \quad (12)$$

可推出如下删除准则:

定理 4 设当前的最小失真为 $d_{\min} = d_1(x, y_i)$, 若

$$\sum_{i=1}^k x_i y_i + \sqrt{\sum_{i=1}^k x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^k y_i^2} < d_{\min} \quad (13)$$

则 $d_1(x, y_i) > d_1(x, y_p)$, 即 $d(x, y_i) > d(x, y_p)$.

该算法需要离线计算各码字的 22 范数, 并按范数大小对码书进行从小到大排序. 初始匹配码字选为与输入矢量 22 范数最接近的码字. 搜索时在线计算输入矢量的 22 范数, 并判断式 (13) 是否成立. 若成立, 则当 $\sum_{i=1}^k x_i y_i + \sqrt{\sum_{i=1}^k x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^k y_i^2} < d_{\min}$ 时可以删除所有索引大于 i 的码字; 否则可以删除所有索引小于 i 的码字.

3 本文算法

由于在 NOS 算法中采用了等价的失真测度而不是平方误差测度, 所以无法用 PDS 技术来排除不满足式 (13) 的码字, 也不能将 NOS 算法与其他快速算法结合. 为此, 本文对定理 4 作了一些改进. 若在式 (13) 的两边同时加上 $\sum_{i=1}^k x_i^2$, 则可以得到如下删除准则:

定理 5 设当前的最小失真为 $d_{\min} = d(x, y_p)$, 若

$$\left(\sum_{i=1}^k x_i y_i + \sqrt{\sum_{i=1}^k x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^k y_i^2} \right)^2 < d_{\min} \quad (14)$$

则 $d(x, y_i) > d(x, y_p)$.

根据定理 5, 如果码字 y_i 的 22 范数 $\sum_{i=1}^k y_i^2$ 大于 $\text{norm}_{\max} = \sum_{i=1}^k x_i^2 + \sqrt{d_{\min}}$ 或者 $\text{norm}_{\min} = \sum_{i=1}^k x_i^2 - \sqrt{d_{\min}}$, 则码字 y_i 一定不是输入矢量 x 的最近码字. 因而, 在码字搜索时只需计算 22 范数处于 norm_{\min} 和 norm_{\max} 之间的那些码字与输入矢量 x 的失真测度. 本文提出的 EENNS 算法恰好结合了定理 2 所述的 ENNS 算法的删除准则和定理 5 所述的范数删除准则, 其搜索范围的 2 维示例如图 2 的阴影部分所示.

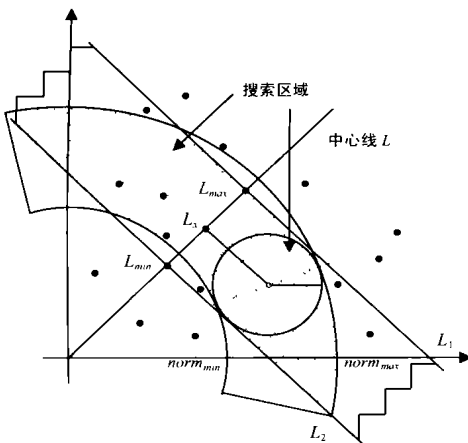


图 2 EENNS 算法的搜索范围示意图

本文的 EENNS 算法在开始搜索前需要离线计算各码字的均值 m_i 和 22 范数 $\sum_{i=1}^k y_i^2$, $i = 1, 2, \dots, N$, 然后按码字均值的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 的均值 m_k 和 22 范数 $\sum_{i=1}^k x_i^2$, 通过二分查找法

在码书中搜索与 m_k 最相近的均值 m_p 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均值满足 $m_k \setminus \text{norm}_{\max}$ 或 $m_k \setminus \text{norm}_{\min}$, 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 $\sum_{i=1}^k y_i^2 > \text{norm}_{\max}$ 或 $\sum_{i=1}^k y_i^2 < \text{norm}_{\min}$ 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 $d_{\min} > d(x, y_i)$, 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.

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 $N = 256$ 或 $N = 512$, 而矢量维数为 $k = 4@4 = 16$ 或 $k = 8@8 = 64$. 然后用这些码书对 512@512 的 256 灰度的/Lena0 和/Peppers0 图像进行编码. 为了比较, 本文对穷尽搜索算法(FS)、部分失真搜索算法^[3](PDS)、双测试算法^[4](DTA)、等均值最近邻搜索算法(ENNS)^[6]和范数排序搜索算法^[7](NOS)均作了相应测试. 所有测试在 Pentium 4 计算机上进行, 编码时间的测试结果如表 1 所示(单位为秒). 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, 而且编码时间不到穷尽搜索算法的 1/20.

表 1

算 法	k= 4@4		k= 8@8	
	N= 256	N= 512	N= 256	N= 512
FS	8.9	17.91	8.68	17.24
PDS	1.82	3.13	1.54	2.64
DTA	1.98	3.68	1.26	2.31
NOS	0.6	1.09	0.55	1.1
ENNS	0.44	0.72	0.43	0.71
EENNS	0.39	0.61	0.38	0.6

5 结论

本文提出了一种等均值等范数的最近邻矢量量化码字搜索算法. 该算法利用了一个矢量的两个特征量, 均值和 22 范数, 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 EENNS 算法比 ENNS 算法和 NOS 算法有效.

参考文献:

- [1] A Gersho, R M Gray. Vector Quantization and Signal Compression [M]. Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [2] Y Linde, 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 encoding algorithm for vector quantization [J]. IEEE Trans, 1985, COM- 33(10): 1132- 1133.
- [4] T Torres, J Huguet. An improvement on codebook search for vector

quantization[J]. IEEE Trans, 1994, COM- 42(2): 208- 210.

- [5] K T Lo, W K Cham. Subcodebook searching algorithm for efficient VQ encoding of images[J]. IEE Proceedings, 1993, 140(5): 327- 330.
- [6] L Guan, M Kamel. Equal2average hyperplane partitioning method for vector quantization of image data[J]. Pattern Recognition Letters, 1992: 693- 699.
- [7] K S Wu, J C Lin. Fast VQ encoding by an efficient kick2out condition[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2000, 10(1): 59- 62.

作者简介:



刘春和 男, 1965 年生于吉林省辉南县, 1985 年和 1994 年分别获得学士和硕士学位, 现为哈尔滨工业大学自动化测试与控制系博士研究生, 目前主要致力于图像处理研究。



和信息安全等领域的研究。

陆哲明 男, 1974 年生于浙江省东阳市, 1997 年和 2001 年获得哈尔滨工业大学硕士学位和博士学位, 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. 2003 年获全国优秀博士论文奖, 获部级一等奖 1 项, 二等奖 1 项, 已出版专著 1 部, 发表论文 70 篇, 其中 SCI 21 篇, 目前主要致力于视觉与图像处理、数字水印



孙圣和 男, 1937 年生于朝鲜北道, 现为哈尔滨工业大学自动化测试与控制系所长, 教授, 博士生导师, 电子学会会士, 日本 IEICE 会员, 获十余项国家级和省部级科技成果奖, 已发表 5 本著作和 240 多篇论文, 被 SCI 和 EI 收录 140 余篇, 培养 3 名全国优秀博士论文奖获得者, 目前的研究领域包括计算机自动测试与控制, 信号处理和系统辨识。

(上接第 1564 页)

参考文献:

- [1] J A Bloom, I J Cox, T Kalker, etc. Copy protection for DVD video[J]. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(7): 1267- 1276.
- [2] C Busch, W Funk, S Wolthusen. Digital watermarking: From concepts to real-time video applications[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1999, 19(1): 25- 35.
- [3] F Hartung, B Girod. Digital watermarking of uncompressed and compressed video[J]. Signal Processing, 1998, 66(3): 283- 301.
- [4] G Langelaar, R Legendijk, J Biond. Realtime labeling methods for MPEG compressed video[A]. Proceedings of 18th Symposium Information Theory[C]. Veldhoven, Netherlands: SIT, 1997: 15- 16.
- [5] G Langelaar, R Legendijk. Optimal Differential Energy Watermarking of DCT Encoded Images and Video[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(1): 148- 158.
- [6] F Hartung, M Kutter. Multimedia watermarking techniques[J]. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(7), 1083- 1107.
- [7] F Jordan, M Kutter, T Ebrahimi. Proposal of a watermarking technique for hiding/retrieving data in compressed and decompressed video, ISO/IEC Doc. JTC1/SC29/WG11 MPEG97/ M2281, 1997.
- [8] F Alturki, R Mersereau. An oblivious robust digital watermark technique for still images using DCT phase modulation[A]. Proceedings of the 2000 International Conference on Audio, Speech And Signal Processing [C]. Istanbul Turkey ICASSP, 2000. 1975- 1978.
- [9] 邵亚非. 利用边际信息的数字水印技术研究[D]. 清华大学博士学位论文, 2003, 7.