

# 一种改进的 AEI 算法中初始匹配码字的快速查找方法

李东平 潘志斌 乔瑞萍 乔阳 蔡骋

(西安交通大学电子与信息工程学院, 西安 710049)

**摘要** 矢量量化(VQ)是一种高效的有损压缩技术。快速码字搜索算法是矢量量化的核心问题之一,其性能决定了编码时间。快速码字搜索算法中,绝对误差不等式删除算法(AEI)是一种典型的3步算法,其第1步查找输入矢量的初始匹配码字的方法采用了Minimax法,是整个AEI算法中计算量最大的步骤,严重影响了算法的效率。针对这个问题,提出了一种新的查找初始匹配码字的方法——Partial Minimax法。该方法在保证所找到的初始匹配码字与原始AEI算法相同并且重建图像的PSNR(峰值信噪比)值不变的前提下,可显著减小这一步骤的计算量和查找时间,从而有效地提高了算法的总体编码速度。

**关键词** 矢量量化 快速搜索 AEI算法 初始匹配码字

中图法分类号: TN919.8 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)09-1808-05

## An Improved Fast Search Method of Initial Matching Codeword for AEI Algorithm

LI Dong-ping, PAN Zhi-bin, QIAO Rui-ping, QIAO Yang, CAI Cheng

(School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

**Abstract** Vector quantization (VQ) is an efficient approach of lossy data compression. The performance of the fast codeword search algorithm in VQ determines its encoding time. Absolute error inequality (AEI) algorithm is a standard fast codeword search algorithm, in which the initial matching codeword search is based on Minimax method. However, the computation cost that is required at this step in AEI algorithm is too much. Aimed at solving this problem, we propose an improved method for searching the initial matching codeword that is named as Partial Minimax Method. The proposed method guarantees the found initial matching codeword is the same as the standard AEI method and the PSNR performance of AEI method has no degradation. Because it can significantly reduce the computational cost for searching the initial matching codeword, the proposed method can speed up the standard AEI method effectively.

**Keywords** vector quantization, fast search, AEI algorithm, initial matching codeword

## 1 引言

矢量量化<sup>[1]</sup>是一种高效的有损压缩技术,其基本原理是用码书中与输入矢量最匹配的码字的索引代替输入矢量进行传输和储存,解码时只需要简单

的查表操作,因此它具有很大的压缩比并且解码简单。由于这些突出的优点,近些年来矢量量化技术被广泛地应用于数据压缩的各个领域。码书设计、码字搜索以及码字索引分配是矢量量化的三大关键技术<sup>[2]</sup>。其中码字搜索算法的优劣直接对应编码时间的长短,是影响系统实用性的重要因素。因此,

基金项目:国家自然科学基金项目(60672054);陕西省科学技术攻关项目(2008K04-01)

收稿日期:2008-01-08;改回日期:2008-05-07

第一作者简介:李东平(1983~)女。西安交通大学信息与通信工程系在读硕士研究生。主要研究方向为图像编码。

E-mail: flythorn@gmail.com

矢量量化技术中码字快速搜索算法的研究具有重要的意义。

假定码书  $C = \{y_0, y_1, \dots, y_{N-1} | y_i \in \mathbf{R}^k\}$ , 其中  $N$  为码字个数。如果  $k$  维的输入矢量  $\mathbf{x} = (x_0, x_1, \dots, x_{k-1})^T$  与码字  $\mathbf{y}_i = (y_{i0}, y_{i1}, \dots, y_{i(k-1)})^T$  之间的失真采用平方误差测度来描述, 即

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

则矢量量化码字搜索问题就是在码书  $C$  中搜索与输入矢量  $\mathbf{x}$  最匹配的码字  $\mathbf{y}_{bm}$ , 使得  $\mathbf{y}_{bm}$  与  $\mathbf{x}$  之间的失真是所有码字中最小的, 即

$$d(\mathbf{x}, \mathbf{y}_{bm}) = \min_{0 \leq i \leq N-1} d(\mathbf{x}, \mathbf{y}_i) \quad (2)$$

目前, 快速码字搜索算法得到广泛的研究, 现存的各种快速码字搜索算法可分为部分失真搜索算法<sup>[3]</sup>、基于绝对误差不等式的快速码字搜索算法<sup>[4-6]</sup>、基于三角不等式的快速码字搜索算法<sup>[7]</sup>、基于均值不等式的搜索算法<sup>[8-9]</sup>等。本文针对的是基于绝对误差不等式的快速码字搜索算法的改进。

## 2 绝对误差不等式删除算法 (AEI)

为了叙述 AEI<sup>[2]</sup> 算法, 先给出下面的定义及定理。

**定义 1** 输入矢量  $\mathbf{x}$  和码字  $\mathbf{y}_i$  之间下标为  $l$  的绝对误差分量定义为  $e_{il} = |x_l - y_{il}|$ , 其中  $0 \leq l \leq k-1$ 。

**定义 2** 输入矢量  $\mathbf{x}$  和码字  $\mathbf{y}_i$  之间的最大绝对误差分量定义为

$$e_{i, \max} = \max_{0 \leq l \leq k-1} e_{il} = \max_{0 \leq l \leq k-1} |x_l - y_{il}|$$

**定义 3** 输入矢量  $\mathbf{x}$  和码书  $C = \{y_0, y_1, \dots, y_{N-1}\}$  中各个码字之间的最小最大绝对误差分量定义为  $e_{\minimax} = \min_{0 \leq i \leq N-1} e_{i, \max}$ 。

**定理 1** 假定目前在码书中已经找到的最佳匹配码字为  $\mathbf{y}_p$ , 与其对应的最小失真为  $d_{\min} = d(\mathbf{x}, \mathbf{y}_p)$ ,  $0 \leq p \leq N-1$ , 那么对于一个新的候选码字  $\mathbf{y}_i$ , 若满足

$$\sum_{l=0}^{s-1} e_{il} = \sum_{l=0}^{s-1} |x_l - y_{il}| \geq \sqrt{k \cdot d_{\min}} \quad (3)$$

$$1 \leq s \leq k$$

则  $d(\mathbf{x}, \mathbf{y}_i) \geq d(\mathbf{x}, \mathbf{y}_p)$  成立, 这意味着  $\mathbf{y}_i$  不可能是比  $\mathbf{y}_p$  更好的匹配码字, 可以删除。

基于定理 1 的快速算法称为绝对误差不等式删除算法, 其具体步骤如下:

(1) 计算输入矢量  $\mathbf{x}$  和每个码字  $\mathbf{y}_i$  之间所有的绝对误差分量  $e_{il}$ ,  $l = 0, 1, \dots, k-1$ ,  $i = 0, 1, \dots, N-1$ 。

(2) 找出每个码字的最大绝对误差分量  $e_{i, \max}$ ,  $i = 0, 1, \dots, N-1$ 。

(3) 找出所有  $e_{i, \max}$  ( $i = 0, 1, \dots, N-1$ ) 中最小值对应的码字  $\mathbf{y}_p$ , 将该码字作为输入矢量  $\mathbf{x}$  的初始匹配码字, 其索引为  $p = \arg \min_i e_{i, \max}$ 。

(4) 计算当前最小失真  $d_{\min} = d(\mathbf{x}, \mathbf{y}_p)$ 。

(5) 对于一个新的候选码字  $\mathbf{y}_i$  ( $i = 0, 1, \dots, N-1, i \neq p$ ), 用定理 1 进行可否删除的判断。若满足定理 1 则删除码字  $\mathbf{y}_i$ , 接着判断下一个码字。否则继续用 PDS<sup>[3]</sup> 算法判断  $\mathbf{y}_i$  是否可以删除。若  $\mathbf{y}_i$  可以删除则转向判断下一个码字; 若  $\mathbf{y}_i$  不能删除, 则意味着  $\mathbf{y}_i$  是一个比  $\mathbf{y}_p$  更好的码字, 那么对  $\mathbf{y}_p$  进行  $p \leftarrow i$  及  $d_{\min} \leftarrow d(\mathbf{x}, \mathbf{y}_i)$  的更新。算法在码书最后一个码字停止, 最终得到的  $\mathbf{y}_p$  就是  $\mathbf{x}$  的最佳匹配码字  $\mathbf{y}_{bm}$ 。

AEI 算法中采用了具有最小最大绝对误差分量  $e_{\minimax}$  的那个码字作为初始匹配码字, 通常将这种查找初始匹配的方法称为 Minimax<sup>[4]</sup> 法。对于一个输入矢量, 在查找其初始匹配码字时需要在线的  $Nk$  次加法运算以及  $2Nk-1$  次比较运算。表 1 给出了分别对  $512 \times 512$  的 Lena, Splash, Baboon 图像用维数为  $4 \times 4$ 、长度为 256 的码书进行编码时, 对每个输入矢量查找初始匹配码字这一步骤的计算量和原始 AEI 算法总计算量的比较。

表 1 对每个输入矢量原始 AEI 算法中查找初始匹配码字的计算量与算法总计算量的比较

Tab. 1 The comparison of the computational cost for searching the initial matching codeword and the total computational cost in the classical AEI algorithm

图像	查找初始匹配码字的计算量(A)		AEI 算法的总计算量(B)		百分比 (%) (A/B)	
	加法	比较	加法	比较	加法	比较
Lena	4 127	8 191	4 958. 60	8 990. 12	83. 23	91. 11
Splash	4 127	8 191	4 963. 72	8 995. 32	83. 14	91. 06
Baboon	4 127	8 191	6 074. 24	9 998. 33	67. 94	81. 92

由表 1 可以看出,原始 AEI 算法的主要计算负荷来自于查找初始匹配码字的步骤。例如,对 Lena 图像进行测试时,查找初始匹配码字所需的加法和比较运算分别占 AEI 算法总加法和总比较运算的百分比高达 83.23% 和 91.11%。因此,为了提高 AEI 算法的效率,必须改进其初始匹配码字的查找方法。

### 3 本文算法——Partial Minimax 法

针对上一节所指出的问题,对 AEI 算法中初始匹配码字的查找提出一种有效的改进算法——Partial Minimax 法。这种算法的主要思想是:如果一个码字和输入矢量某一维的绝对误差分量大于目前已经找到的最小最大绝对误差分量,那么该码字一定不是在最小最大意义上的最佳初始匹配码字。因此,在计算各个码字与输入矢量的绝对误差分量时,若某一维分量上的绝对误差已经大于当前的最小最大绝对误差分量,对该码字就可以停止计算剩余各维的绝对误差分量而将其排除,这样就只需要计算一部分绝对误差分量。因此将这种方法命名为 Partial Minimax 法,其具体步骤如下:

(1) 计算输入矢量  $\mathbf{x}$  和码字  $\mathbf{y}_0$  之间的所有的绝对误差分量  $e_{0l}, l=0, 1, \dots, k-1$ 。

(2) 找出其中的最大绝对误差分量  $e_{0,\max} = \max_{0 \leq l \leq k-1} e_{0l} = \max_{0 \leq l \leq k-1} |x_l - y_{0l}|$ , 令最小最大绝对误差分量的当前值为  $e_{\minimax} = e_{0,\max}$ , 且  $p=0$ 。

(3) 对于其他码字  $\mathbf{y}_i, i=1, 2, \dots, N-1$ , 从  $l=0$  开始, 逐维计算其与输入矢量  $\mathbf{x}$  的绝对误差分量  $e_{il}$ 。每计算一个  $e_{il}$ , 都与当前的最小最大绝对误差分量  $e_{\minimax}$  进行比较, 若  $e_{il} > e_{\minimax}$ , 则记  $\dim\_stop = l$ , 停止计算剩余的  $l = \dim\_stop + 1, \dim\_stop + 2, \dots, k-1$  维的  $e_{il}$ 。然后令  $i = i + 1$ , 转向判断下一个码字。若计算到第  $k-1$  维仍然有  $e_{il} < e_{\minimax}$ , 则找出该码字的最大绝对误差分量  $e_{i,\max}$ , 进行  $e_{\minimax} \leftarrow e_{i,\max}, p \leftarrow i$  的更新。然后令  $i = i + 1$ , 转向判断下一个码字, 直到  $i = N-1$  为止。这样, 最终得到的  $p$  值即为初始匹配码字的索引值, 初始匹配码字为  $\mathbf{y}_p$ 。

本文算法的流程如图 1 所示。

这是因为, 如果输入矢量  $\mathbf{x}$  与码字  $\mathbf{y}_i$  的某一维绝对误差分量  $e_{il}$  大于当前的  $e_{\minimax}$ , 则该码字的最大绝对误差分量  $e_{i,\max}$  一定会大于  $e_{\minimax}$ , 所以该码字不可能是初始匹配码字。因此, 对于一个输入矢

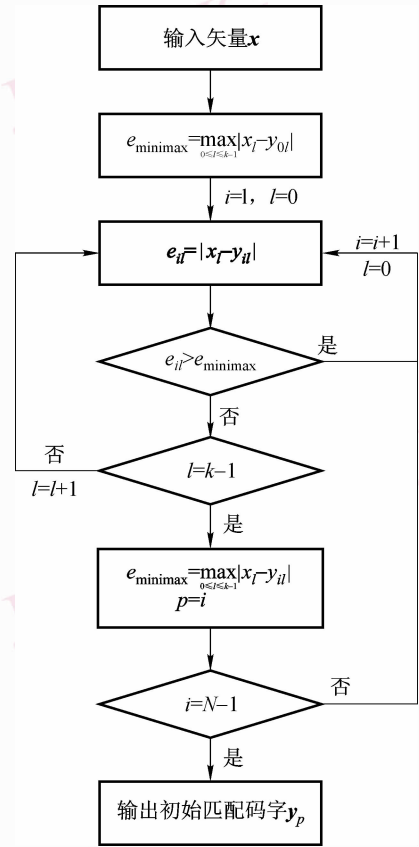


图 1 本文算法流程图

Fig. 1 The flow chart of the proposed algorithm

量, AEI 算法中用 Minimax 法查找初始匹配时所做的  $Nk$  次绝对误差运算有很大一部分是没有必要的, 不做也不会影响找到最小最大意义上的最佳初始匹配。而采用 Partial Minimax 法就只需计算那些必要的绝对误差分量, 从而极大地减小了这个步骤的计算量。

当然, 采用 Partial Minimax 法只计算了一部分绝对误差分量, 很可能并未计算到随后的码字删除步骤需要用到的全部绝对误差分量。因此, 在码字删除步骤中, 每累加一维的绝对误差就判断一次该码字是否可以被删除, 如果累加到  $\dim\_stop$  维时码字仍未被删除, 那么再计算其后  $\dim\_stop + 1, \dim\_stop + 2, \dots$ , 等维的绝对误差分量, 用到几维就计算几维。这样保证了 AEI 算法的 PSNR(峰值信噪比)性能不会有任何下降, 并且可使绝对误差分量的计算量减到最小。从整体上看, 计算过的每一维绝对误差分量要么在查找初始匹配码字时用到, 要么在码字删除时用到, 从而完全消除了计算的冗余, 有效地提高了 AEI 算法的效率。

## 4 实验结果和分析

为了验证本文方法的有效性,将 Minimax 法和 Partial Minimax 法的计算量以及分别采用这两种初始匹配码字查找方法时 AEI 算法的编码时间做了比较。实验所用的码书利用 LBG (Linde-Buzo-Gray algorithm) 算法生成,训练图像为 512 × 512 的 Lena 图像。仿真实验在 Intel P4 主频 2.80 GHz、内存 512 M 的个人计算机上进行。

表 2 为分别对 512 × 512 的 Lena, Splash, Baboon 图像用 4 × 4 维、长度为 256 的码书进行编码时对每个输入矢量查找初始匹配码字的平均计算量。从表 2 的数据可以看出,对于 Lena 图像,采用 Partial Minimax 法查找初始匹配码字时加法运算和比较运算仅分别为 Minimax 法的 11.98% 和 12.44%, 相对于 Minimax 法有了很大的改进。

为了叙述的方便,称采用 Minimax 法进行初始匹配码字查找的方法为原始 AEI 算法,采用 Partial Minimax 法进行初始匹配码字查找的方法为改进的 AEI 算法。为了考察不同实验条件对各个算法总体编码时间的影响,表 3 给出了对 512 × 512 的 Lena, Splash, Baboon 图像用 4 × 4 维、长度分别为 256, 512, 1 024 的码书进行编码时,在查找初始匹配码字的步骤耗费的时间以及算法总体编码时间,同时也给出了原始算法和改进算法的 PSNR 值比较。从表 3 的数据可以看出改进算法的 PSNR 值与原始算法完全一样,改进算法的确能保证重构图像的质量不变。对于不同复杂程度的图像,改进的 AEI 算法查找初始匹配码字的时间可缩短为原始 AEI 算法的 11.21% ~ 25.60%, 总体编码时间也有了非常明显的缩短,大约是原始 AEI 算法编码时间的 39.10% ~ 70.51%。可以看出,本文提出的初始匹配码字查找改进方案对加速 AEI 算法是非常有效的。

表 2 Minimax 法与 Partial Minimax 法查找初始匹配码字的计算量比较

Tab. 2 The comparison of the computational cost for searching the initial matching codeword in the Minimax algorithm and Partial Minimax algorithm

图像	Minimax (A)		Partial Minimax (B)		百分比 (%) (B/A)	
	加法	比较	加法	比较	加法	比较
Lena	4 127	8 191	494.46	1 018.74	11.98	12.44
Splash	4 127	8 191	470.47	967.47	11.40	11.81
Baboon	4 127	8 191	715.79	1 460.35	17.34	17.83

表 3 原始 AEI 算法与改进的 AEI 算法的总体编码时间以及 PSNR 值的比较

Tab. 3 The comparison of the overall encoding time and the PSNR in the classical AEI algorithm and improved AEI algorithm

图像	方法	码书长度为 256			码书长度为 512			码书长度为 1 024		
		找初始匹配码字的时间 (ms)	总编码时间 (ms)	PSNR (dB)	找初始匹配码字的时间 (ms)	总编码时间 (ms)	PSNR (dB)	找初始匹配码字的时间 (ms)	总编码时间 (ms)	PSNR (dB)
Lena	原始算法 (A)	672	813	32.46	1 328	1 641	33.62	2 641	3 156	34.59
	改进算法 (B)	94	359	32.46	172	688	33.62	304	1 234	34.59
	百分比 (%) (B/A)	13.99	44.16		12.95	41.93		11.51	39.10	
Splash	原始算法 (A)	672	828	29.42	1 328	1 656	30.10	2 641	3 250	30.64
	改进算法 (B)	93	359	29.42	157	703	30.10	296	1 328	30.64
	百分比 (%) (B/A)	13.84	43.36		11.82	42.45		11.21	40.86	
Baboon	原始算法 (A)	672	953	23.80	1 328	1 828	24.25	2 641	3 578	24.50
	改进算法 (B)	172	672	23.80	280	1 234	24.25	451	2 381	24.50
	百分比 (%) (B/A)	25.60	70.51		21.08	67.51		17.08	66.55	

实验除了选择不同细节图像,还分别对 3 种不同长度的码书(256,512,1 024)做了实验,从表 3 可看出图像细节越低,码书尺寸越大,编码效率越高。这是因为,对于细节较低的图像,找到的  $e_{\minimax}$  值要比细节较高的图像找到的值小,所以能较快地满足判决条件  $e_{il} > e_{\minimax}$ ,即在较小  $l$  时该条件就能够成立,这样需要计算的绝对误差的维数就较少,编码效率相对于高细节的图像来说要好。对于尺寸较大的码书,其相近的码字相对于尺寸较小的码书来说要多,故可较容易地找到较小的  $e_{\minimax}$  值,这样可以更多地排除相似的码字,提高编码效率。

## 5 结 论

绝对误差不等式删除算法(AEI)的主要计算负荷在于查找初始匹配码字。为了减小查找初始匹配码字这一步骤的计算量,缩短编码时间,提出了更快地停止计算绝对误差分量的条件,即一旦某个码字的某一维绝对误差分量大于当前的最小最大绝对误差分量时就可以停止计算该码字其他剩余维的绝对误差分量。在此思想的基础上,提出了 Partial Minimax 法,该方法在保证了找到的初始匹配与原始 AEI 算法相同以及算法整体 PSNR 性能不变的前提下,可显著减小这一步骤的计算量和查找时间,从而有效地提高总体编码速度。对 Lena, Splash, Baboon 图像,这一步骤的计算量可减少到原始方法的 11.40% ~ 17.83%,查找初始匹配码字的时间缩短到原始方法的 11.21% ~ 25.60%。相应地,改进的 AEI 算法总体编码时间也缩短到原始 AEI 算法

的 39.10% ~ 70.51%。因此,采用 Partial Minimax 法快速查找初始匹配码字可对原始 AEI 算法进行有效的加速,使其更加实用化。

## 参考文献 (References)

- 1 Linde Y, Buzo A, Gray R M. An algorithm for vector quantizer design [J]. IEEE Transactions on Communications, 1980, 28(1): 84-95.
- 2 Sun Sheng-he, Lu Zhe-ming. Technology and Application of Vector Quantization [M]. Beijing: Science Press, 2002. [孙圣和,陆哲明. 矢量量化技术及应用[M]. 北京:科学出版社,2002.]
- 3 Bei C D, Gray R M. An improvement of the minimum distortion encoding algorithm for vector quantization [J]. IEEE Transactions on Communications, 1985, 33(10): 1132-1133.
- 4 Soleymani M R, Morgera S D. A high-speed search algorithm for vector quantization [J]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1987, 12: 1946-1948.
- 5 Soleymani M R, Morgera S D. An efficient nearest neighbor search method [J]. IEEE Transactions on Communications, 1987, 35(6): 677-679.
- 6 Pan J S, McInnes F R, Jack M A. Fast clustering algorithms for vector quantization [J]. Pattern Recognition, 1996, 29(3): 511-518.
- 7 Huang C M, Bi Q, Stiles G S, et al. Fast full search equivalent encoding algorithms for image compression using vector quantization [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1992, 1(3): 413-416.
- 8 Baek S J, Jeon B K, Sung K M. A fast encoding algorithm for vector quantization [J]. IEEE Signal Processing Letters, 1997, 4(12): 325-327.
- 9 Pan Z, Kotani K, Ohmi T. A unified projection method for fast search of vector quantization [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(7): 637-640.