

基于子空间三角不等式的高维码字搜索算法

崔江涛¹, 李风华^{1,2}, 马建峰¹

(1. 西安电子科技大学计算机学院, 陕西西安 710071; 2. 北京电子科技学院研究生处, 北京 100070)

摘 要: 本文分析了码字搜索算法中基于均值、方差和范数的删除准则, 指出基于方差和范数的删除准则之间存在冗余缺陷. 在此基础上, 提出了一种新的子空间三角不等式删除准则, 根据子空间中码字与参考点之间的距离来排除候选码字. 基于方差的删除准则可以看成是子空间三角不等式删除准则的特例. 在新的删除准则中, 通过选择合适的子空间参考点, 能够排除更多的不匹配码字. 在编码前, 首先计算每个码字的哈德码变换, 并且计算在子空间中码字与参考点之间的距离, 然后根据各码字哈德码变换域的第一维系数对码字进行升序排列. 在编码过程中, 根据码字的均值来终止最近邻搜索过程, 采用子空间三角不等式删除准则来排除不匹配码字. 测试结果表明, 本文算法的搜索时间快于其他码字搜索算法, 其搜索时间比当前最快的哈德码变换域等均值等方差等范数搜索算法要快 8% ~ 26% 左右.

关键词: 矢量量化; 码字搜索; 子空间; 三角不等式

中图分类号: TP919.31 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 04-0940-06

A Fast Codeword Search Algorithm for High-Dimensional VQ Encoding Using Triangle Inequality in Subspace

CUI Jiang-tao¹, LI Feng-hua^{1,2}, MA Jian-feng¹

(1. School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2. Graduate School, Beijing Electronic Science and Technology Institute, Beijing 100070, China)

Abstract: Elimination criteria based on mean value, variance and norm was often used in the VQ encoding to reject unlikely codewords. However, these elimination criteria have obvious computational redundancy. A new elimination criteria based on triangular inequality in subspace was proposed. By finding the optimal reference point of distance computation, the new elimination criteria can reject more unlikely codewords than other elimination criteria using variance and norm. The elimination criteria based on variance can be seen as the special case of new elimination criteria. 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, the mean value of a vector was used to terminate the search process, and the new elimination criteria based on triangular inequality in subspace was applied to reject most unlikely codewords. Experiments results demonstrate that the performance of the proposed algorithm is much better than other nearest neighbor codeword search algorithms. Compared with the Hadamard-Transformed based Equal-Average Equal-variance Equal-norm Nearest Neighbor Search algorithm, the proposed algorithm reduces the computational time by 8% to 26%.

Key words: vector quantization; codeword search; subspace; triangle inequality

1 引言

作为一种高效的压缩技术, 矢量量化 (Vector Quantization) 在图像压缩^[1]、语言编码^[2]、高维索引^[3]等领域已经得到广泛的应用. 矢量量化过程可以定义为从 k 维欧氏空间 R^k 到其一个有限子集的映射. 即 $Q: R^k \rightarrow C$, 其中 $C = \{y_1, y_2, \dots, y_N | y_i \in R^k\}$ 为码书, N 为码书大小. 该映射满足: $Q(x | x \in R^k) = y_p$, 其中 $x = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ 为 R^k 中的 k 维矢量, $y_p = (y_{p1}, y_{p2}, \dots, y_{pd})$ 为码

书 C 中的码字并满足

$$d(x, y_p) = \min_{1 \leq j \leq N} d(x, y_j)$$

其中 $d(x, y_p)$ 是输入矢量 x 与码字 y_j 之间的失真测度 (距离). 常用的失真测度为欧氏距离的平方, 其表达式为

$$d(x, y_j) = \sum_{l=1}^k (x_l - y_{jl})^2$$

矢量量化技术主要包括两方面研究内容: 码书设计和码字搜索. 码书设计是将 M 个训练矢量分成互不

重叠的 N 个胞腔 ($M \gg N$), 每个胞腔用一个码字 y_i 描述. 码字搜索过程中, 每一个矢量 x 都要在码书 C 中找到一个码字 $y_j = Q(x|x \in R^k)$, 这个码字与 x 之间的失真是最小的. 上述过程也是最近邻码字的搜索过程. 经典的穷尽搜索 (Full Search) 算法需要的计算量比较大, 对于每个输入矢量, 在搜索过程中需要进行 kN 次乘法运算、 $(2k-1)N$ 次加法运算和 $N-1$ 次比较运算. 为了获得好的量化结果, 通常会采用较高维数和大尺寸的码书, 这将导致穷尽搜索算法的运算量快速增长. 因此, 如何减少查询开销一直是码字搜索中的一个重点研究问题.

研究者提出了许多针对高维码字的快速搜索算法. 当前快速有效的搜索算法充分采用了强有力的码字删除准则, 通过选择良好的初始匹配码字和合理的码字搜索顺序来排除大部分候选码字. 在构建码字删除准则的过程中, 通常采用的特征值包括均值 (和值)、方差 (标准差) 和范数等. 在时域中, 这些快速码字搜索算法包括等均值最近邻搜索算法 (Equal-average Nearest Neighbor Search, ENNS)^[4]、范数排序搜索算法 (Norm-ordered Search, NOS)^[5]、等均值等方差最近邻搜索算法 (Equal-average Equal-variance Nearest Neighbor Search, EENNS)^[6] 以及改进的等均值等方差搜索算法 (improved Equal-average Equal-variance Nearest Neighbor Search, iEENNS)^[7] 等; 在哈德码变换域中, 这些算法包括哈德码变换域部分失真搜索算法 (Hadamard-Transformed based Partial Distortion Search, HTPDS)^[8]、哈德码变换域等均值等方差最近邻搜索算法 (Hadamard-Transformed based Equal-average Equal-variance Nearest Neighbor Search, HTEENNS)^[9] 和改进的哈德码变换域等均值等方差等范数最近邻搜索算法 (Hadamard-Transformed based Equal-average Equal-variance Equal-norm Nearest Neighbor Search, IHTEENNS)^[10] 等. 由于哈德码变换运算简单, 并且具有很好的能量集中特性, 在哈德码变换域上的搜索算法的查询性能要高于时域算法. 在上述算法中, IHTEENNS 算法具有较好的查询性能.

除上述算法外, 基于三角不等式的最近邻搜索算法通过事先计算任意两个码字之间的距离, 采用距离三角不等式来排除候选码字^[11], 这类方法由于需要额外 $N(N-1)/2$ 字节的存储空间来存储距离值, 很难实际应用. 此外, 研究者也提出了基于投影和三角不等式的最近邻搜索算法^[12], 算法中使用的投影向量实际上就是哈德码变换矩阵中的三个变换向量, 其基本思想与 IHTEENSS 算法相似, 由于没有采用 PDS 搜索策略, 其搜索性能要略低于 IHTEENSS 算法.

本文对码字搜索算法中的删除准则进行了深入分析, 指出方差删除准则、范数删除准则与改进的方差删

除准则之间存在冗余缺陷; 并且提出了一种新的基于 $k-1$ 维子空间三角不等式的删除准则, 改进的方差删除准则可以看成是新删除准则的特例. 在此基础上, 提出了一种新的基于子空间三角不等式的码字搜索算法 (Hadamard Transform based Triangle inequality Nearest Neighbor Search, HTTNNS). 在编码前, 预先对每个码字进行哈德码变换, 并且计算码字到特定参考点的子空间距离, 然后根据各码字哈德码变换的第一维系数 (和值) 的大小进行升序排列. 在编码过程中, 首先计算输入矢量到参考点的子空间距离, 然后根据 PDS 算法对码书进行搜索. 在搜索过程中, 采用均值来终止搜索过程, 并且利用子空间三角不等式删除准则排除不匹配码字. 选取不同的距离参考点会导致不同的搜索性能, 新的码字搜索算法中能够找到近似最优的距离参考点, 从而排除最多的不匹配码字. HTTNNS 码字搜索算法具有以下优点:

(1) 新的哈德码变换域码字中只附加一个距离分量, 没有增加过多的存储开销;

(2) 新的码字搜索算法中只采用两种删除准则, 避免了删除准则之间存在的冗余缺陷;

(3) 相比较基于方差和范数的删除准则, 新的删除准则能够排除掉更多的不匹配码字, 从而提高搜索速度.

本文结构如下: 第 2 节介绍了高维码字搜索算法中的预备知识; 第 3 节介绍新的基于三角不等式的高维码字搜索算法; 第 4 节以图像编码为例对新提出的搜索算法进行仿真; 第 5 节给出结论.

2 基本概念

首先介绍本文需要的一些基本概念和相关理论, 包括哈德码变换的性质和哈德码变换域上的四种删除准则.

定义 1 哈德码变换 令 H_n 为 $2^n \times 2^n$ 的哈德码变换矩阵, 假定以下所有矢量为 k 维矢量, $k = 2^n$ ($n > 0$), 那么

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

矢量 x 的哈德码变换矢量可表示为 $X = H_n x$, 进一步给出如下定义:

定义 2 哈德码变换域方差 X 和 Y_i 的哈德码变换域方差定义为:

$$V_X = \sqrt{\sum_{l=2}^k X_l^2}, V_i = \sqrt{\sum_{l=2}^k Y_{il}^2} \quad (2)$$

定义 3 哈德码变换域范数 X 和 Y_i 的哈德码变换域范数定义为:

$$\|X\| = \sqrt{\sum_{l=1}^k X_l^2}, \|Y_i\| = \sqrt{\sum_{l=1}^k Y_{il}^2} \quad (3)$$

根据上述定义,可以得到哈德码变换的如下性质^[5]:

性质 1 $X_1 = \sum_{l=1}^k x_l$

性质 2 $d(X, Y_i) = k \cdot d(x, y_i)$

性质 3 $V_X = \sqrt{\|X\|^2 - X_1^2}$

由性质 1 可知,哈德码变换域矢量 X 的第一维系数是矢量 x 的和值,依据第一维系数排除不匹配码字的删除准则通常称为等均值删除准则.由性质 2 可知,哈德码变换域中搜索最近邻码字与时域中搜索最近邻码字是等价的.性质 3 则表明,范数平方与方差平方之差等于第一维系数的平方.假定目前哈德码变换域最小失真为 $D_{\min} = d(X, Y_p)$,下面给出哈德码变换域的四种删除准则^[10].

定理 1 等均值删除准则

若 $Y_{i1} \geq X_1 + \sqrt{D_{\min}}$, 或者 $Y_{i1} \leq X_1 - \sqrt{D_{\min}}$, 那么 $d(X, Y_i) \geq D_{\min}$ 成立, 码字 y_i 可以排除掉.

定理 2 等方差删除准则

若 $V_i \geq V_X + \sqrt{D_{\min}}$, 或者 $V_i \leq V_X - \sqrt{D_{\min}}$, 那么 $d(X, Y_i) \geq D_{\min}$ 成立, 码字 y_i 可以排除掉.

定理 3 等范数删除准则

若 $\|Y_i\| \geq \|X\| + \sqrt{D_{\min}}$, 或者 $\|Y_i\| \leq \|X\| - \sqrt{D_{\min}}$, 那么 $d(X, Y_i) \geq D_{\min}$ 成立, 码字 y_i 可以排除掉.

定理 4 改进的等方差删除准则

若 $(X_1 - Y_{i1})^2 + (V_X - V_i)^2 \geq D_{\min}$, 那么 $d(X, Y_i) \geq D_{\min}$ 成立, 码字 y_i 可以排除掉.

3 基于子空间三角不等式的码字搜索算法

均值、方差、范数是常用的三个统计特征,本文对基于方差和范数的删除准则进行了深入分析,证明方差和范数删除准则之间存在冗余缺陷,并且提出一种新的基于子空间三角不等式的删除准则,改进的方差删除准则可以看成是新的删除准则的特例,通过选择合适的距离参考点可以过滤掉更多的不匹配码字,从而进一步提高搜索性能.

3.1 方差和范数删除准则之间的冗余性

本小节将证明等方差删除准则、等范数删除准则、改进的等方差删除准则之间存在冗余.首先证明根据定理 2、3 可以推导出定理 4,即采用定理 2、3、4 排除掉的不匹配码字与只采用定理 4 排除掉的不匹配码字相同.

首先证明由定理 2 可以推导出定理 4,即若 V_i

$\geq V_X + \sqrt{D_{\min}}$ 或者 $V_i \leq V_X - \sqrt{D_{\min}}$, 那么 $(X_1 - Y_{i1})^2 + (V_X - V_i)^2 \geq D_{\min}$ 成立.

证明: $V_i \geq V_X + \sqrt{D_{\min}}$ 或者 $V_i \leq V_X - \sqrt{D_{\min}}$ 可以改写为 $(V_X - V_i)^2 \geq D_{\min}$. 如果 $(V_X - V_i)^2 \geq D_{\min}$, 那么 $(X_1 - Y_{i1})^2 + (V_X - V_i)^2 \geq D_{\min}$ 成立, 证毕.

其次证明由定理 3 可以推导出定理 4, 即 $\|Y_i\| \geq \|X\| + \sqrt{D_{\min}}$ 或者 $\|Y_i\| \leq \|X\| - \sqrt{D_{\min}}$, 那么 $(X_1 - Y_{i1})^2 + (V_X - V_i)^2 \geq D_{\min}$ 成立.

证明: $\|Y_i\| \geq \|X\| + \sqrt{D_{\min}}$ 或者 $\|Y_i\| \leq \|X\| - \sqrt{D_{\min}}$ 可以改写成 $(\|X\| - \|Y_i\|)^2 \geq D_{\min}$, 进一步可以得到下面的等价公式:

$$\begin{aligned} (\|X\| - \|Y_i\|)^2 &\geq D_{\min} \\ \Leftrightarrow \|X\|^2 + \|Y_i\|^2 - 2\|X\|\|Y_i\| &\geq D_{\min} \\ \Leftrightarrow X_1^2 + V_X^2 + Y_{i1}^2 + V_i^2 - 2\|X\|\|Y_i\| &\geq D_{\min} \\ \Leftrightarrow (X_1 - Y_{i1})^2 + (V_X - V_i)^2 + 2X_1Y_{i1} + 2V_XV_i - 2\|X\|\|Y_i\| &\geq D_{\min} \end{aligned} \quad (4)$$

下面证明 $2X_1Y_{i1} + 2V_XV_i - 2\|X\|\|Y_i\| \leq 0$ 成立.

$$\begin{aligned} &X_1Y_{i1} + V_XV_i - \|X\|\|Y_i\| \\ &= X_1Y_{i1} + V_XV_i - \sqrt{X_1^2 + V_X^2}\sqrt{Y_{i1}^2 + V_i^2} \\ &= X_1Y_{i1} + V_XV_i - \sqrt{(X_1^2 + V_X^2)(Y_{i1}^2 + V_i^2)} \\ &= X_1Y_{i1} + V_XV_i - \sqrt{(X_1Y_{i1})^2 + (V_XV_i)^2 + (X_1V_i)^2 + (V_XY_{i1})^2} \\ &= X_1Y_{i1} + V_XV_i - \sqrt{(X_1Y_{i1} + V_XV_i)^2 + (X_1V_i)^2 + (V_XY_{i1})^2 - 2X_1Y_{i1}V_XV_i} \\ &= X_1Y_{i1} + V_XV_i - \sqrt{(X_1Y_{i1} + V_XV_i)^2 + (X_1V_i - V_XY_{i1})^2} \\ &\leq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

根据式(4)和式(5),若 $(\|X\| - \|Y_i\|)^2 \geq D_{\min}$, 则 $(X_1 - Y_{i1})^2 + (V_X - V_i)^2 \geq D_{\min}$ 成立, 证毕.

由上述证明过程可知,根据定理 2 和定理 3 可以推导出定理 4,即删除准则 2、3 与删除准则 4 存在一定的冗余.二维空间中三个删除准则访问数据点的示意图如图 1 所示.可以看出,方差删除准则与范数删除准则

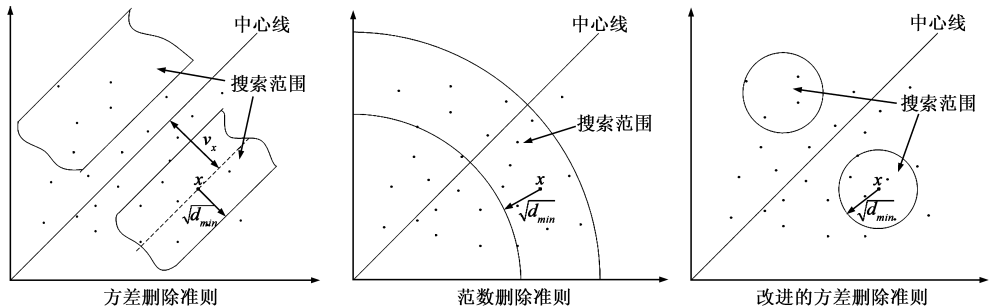


图1 二维空间中不同的删除准则示意图

能排除掉的码字只采用删除准则 4 也能排除掉,而且删除准则 4 能排除掉更多的不匹配码字。

3.2 子空间三角不等式删除准则

在码字搜索过程中,通常先判断 $|X_1 - Y_{i1}| \geq D_{\min}$ 是否成立。如果成立,可以直接排除码字 y_i ; 否则,采用改进的方差删除准则判断 $(X_1 - Y_{i1})^2 + (V_X - V_i)^2 \geq D_{\min}$ 是否成立。改进的方差删除准则可以改写成 $|V_X - V_i| \geq \sqrt{D_{\min} - (X_1 - Y_{i1})^2}$ 。由范数和方差的定义可知,范数是码字到原点的距离,而方差可以看成是 $k-1$ 维子空间中码字到原点的距离。在此基础上,本文提出一种新的基于子空间距离三角不等式的删除准则,其中的子空间是指除第一维分量外的 $k-1$ 维空间。假定一个 k 维参考点 R , 定义两个 $k-1$ 维子空间距离 D_X 和 D_i :

$$D_X = \sqrt{\sum_{l=2}^k (X_l - R_l)^2}, D_i = \sqrt{\sum_{l=2}^k (Y_{il} - R_l)^2} \quad (6)$$

其中 D_X 是 X 与 R 之间的子空间距离, D_i 是 Y_i 与 R 之间的子空间距离。

定理 5 子空间三角不等式删除准则

若 $(X_1 - Y_{i1})^2 + (D_X - D_i)^2 \geq D_{\min}$, 那么 $d(X, Y_i) \geq D_{\min}$ 成立, 码字 y_i 可以排除掉。

证明: 根据三角不等式原理, 在 $k-1$ 维子空间内,

$$\sqrt{\sum_{l=2}^k (X_l - Y_{il})^2} \geq |D_X - D_i|. \text{ 由于 } d(X, Y_i) = \sqrt{(X_1 - Y_{i1})^2 + \sum_{l=2}^k (X_l - Y_{il})^2}, \text{ 如果 } (X_1 - Y_{i1})^2 + (D_X - D_i)^2 \geq D_{\min}, \text{ 那么 } d(X, Y_i) \geq \sqrt{(X_1 - Y_{i1})^2 + (D_X - D_i)^2} \geq D_{\min} \text{ 成立, 证毕。}$$

当距离参考点 R 位于原点时, $D_X = V_X, D_i = V_i$, 上述删除准则与改进的等方差删除准则相同。由此可知, 改进的等方差删除准则是新的删除准则的一个特例。

选择不同的参考点 R 会对候选码字的删除效果产生影响。以三维空间为例, 在二维子空间内对距离参考点的选择进一步进行讨论。子空间三角不等式删除准则可以改写成 $|D_X - D_i| \geq \sqrt{D_{\min} - (X_1 - Y_{i1})^2}$, 令 $r = \sqrt{D_{\min} - (X_1 - Y_{i1})^2}$, 在搜索过程中, 需要访问的候选码字包含在以 R 为圆心的环状区域内, 其半径范围在 $D_X + r$ 和 $D_X - r$ 之间, 如图 2 所示。所有在环状区域外

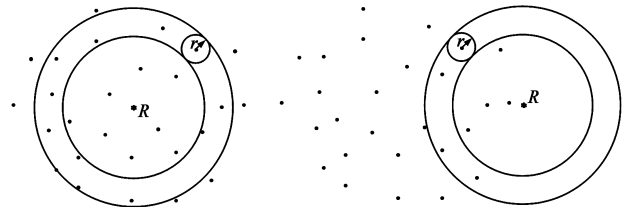


图2 二维子空间内选择不同的参考点示意图

的码字都可以直接排除掉。由图中的环状区域可以看出, 当参考点选择为外侧数据点时, 需要访问的码字较少, 可以排除掉更多的码字。

二维空间中可以更直观的查看候选码字的访问情况。当参考点 R 位于原点时, 子空间距离是候选码字到中心线的垂直距离, 其删除效果与改进的方差删除准则相同, 如图 3(a) 所示。当选择外侧数据点作为参考点时, 相当于将中心线平移到数据集的外侧, 产生新的距离值, 其搜索范围如图 3(b) 所示。可以看出, 选择码字集合外侧的参考点可以过滤掉更多的候选码字。

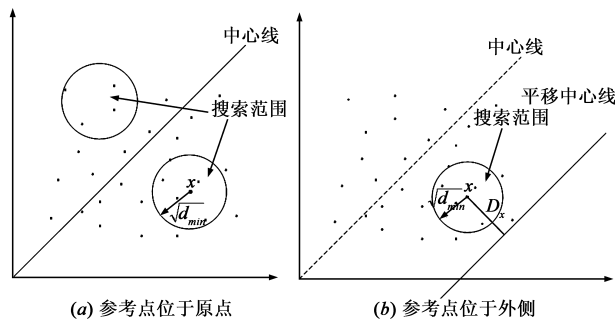


图3 二维空间内选择不同的参考点示意图

下面给出一个简单的近似最优的参考点选择算法。对码书中的码字进行哈德码变换。除第一维分量外, 计算所有码字之间的 $k-1$ 维子空间距离, 找到码字之间的最大距离。在取得最大距离的两个码字之间任意选取一个作为参考点。通过上述方法找到的距离参考点可以认为是码字集合中接近最外侧的数据点。

3.3 最近邻码字搜索算法

根据子空间三角不等式删除准则, 提出一种新的哈德码变换域最近邻搜索算法 HTNNS。在 HTNNS 算法中, 采用哈德码变换的第一维分量(和值)来限定码字的搜索范围, 然后采用子空间三角不等式删除准则排除大部分不匹配的候选码字。在离线计算过程中, 首先计算每个码字的哈德码变换矢量, 并且按照第一维系数大小对码书进行升序排列, 然后选取距离参考点并且计算各码字到参考点的子空间距离。

在编码阶段, 需要在线计算输入矢量 x 的哈德码变换域矢量 X 以及 X 的子空间距离 D_X , 通过二分查找法在码书中搜索与 X_1 最近的第一维系数 Y_{p1} 所对应的码字 Y_p , 并将该码字作为初始匹配码字。在搜索过程中, 采用上下搜索法, 即在码字 Y_p 附近上下搜索, 一旦某个方向上的码字满足 $Y_{i1} \geq X_1 + \sqrt{D_{\min}}$ 或 $Y_{i1} \leq X_1 - \sqrt{D_{\min}}$, 则码字 Y_i 可以删除, 并且终止在该方向上的搜索过程而只在另外一个方向上进行搜索。当两个方向上的搜索都终止时, 整个码字最近邻搜索结束。当根据等均值删除准则(第一维分量)不能删除码字 Y_i 时, 即 $(X_1 - Y_{i1})^2 \leq D_{\min}$, 可以进一步采用改进的等均值等方

差删除准则. 如果 $D_i \geq D_X + \sqrt{D_{\min} - (X_1 - Y_{i1})^2}$ 或 $D_i \leq D_X - \sqrt{D_{\min} - (X_1 - Y_{i1})^2}$, 则码字 Y_i 可以删除; 否则, 则采用 PDS 方法进一步计算失真测度. 算法 1 给出了哈德码变换域最近邻码字搜索算法.

算法 1 HTTNNS 编码算法

步骤 1 对所有码字进行哈德码变换, 并且按照第一维系数的大小对码字进行升序排列.

步骤 2 找出 $k-1$ 维子空间中距离最大的两个码字, 选取其中一个码字作为距离参考点.

步骤 3 对所有码书, 计算到参考点的子空间距离.

步骤 4 对输入矢量 x

步骤 4.1 计算 x 的哈德码变换域矢量 X , 计算 X 到参考点的子空间距离 D_X ;

步骤 4.2 选择初始访问码字 Y_m , Y_m 满足 $Y_{m1} \leq X_1 \leq Y_{(m+1)1}$, 计算 $D_{\min} = d(X, Y_m)$; 令 $i = j = m$, $up = true$, $down = true$;

步骤 4.3 令 $i = i + 1$, 如果 $i > N$, 转到步骤 4.5; 否则, 转到步骤 4.3(a);

步骤 4.3(a) 计算 $Y_{i1} - X_1$, 如果 $|Y_{i1} - X_1| > D_{\min}$, 令 $up = false$, 转到步骤 4.5; 否则, 转到步骤 4.3(b);

步骤 4.3(b) 计算 $D_i - D_X$, 如果 $(X_1 - Y_{i1})^2 + (D_X - D_i)^2 \geq D_{\min}$, 排除码字 Y_i ; 否则, 利用 PDS 算法计算 $D_{\min}$; 如果 $j < 0$ 或者 $down = false$, 转到步骤 4.3, 否则, 转到步骤 4.4;

步骤 4.4 令 $j = j - 1$, 如果 $j < 0$, 转到步骤 4.5; 否则, 转到步骤 4.4(a);

步骤 4.4(a) 计算 $X_1 - Y_{j1}$, 如果 $|Y_{j1} - X_1| > D_{\min}$, 令 $down = false$, 转到步骤 4.5; 否则, 转到步骤 4.4(b);

步骤 4.4(b) 计算 $D_j - D_X$, 如果 $(X_1 - Y_{j1})^2 +$

$(D_X - D_j)^2 \geq D_{\min}$, 排除码字 Y_j ; 否则, 利用 PDS 算法计算 $D_{\min}$; 如果 $i > N$ 或者 $up = false$, 转到步骤 4.4; 否则, 转到步骤 4.3;

步骤 4.5 如果 $i < N$ 并且 $up = true$, 转到步骤 4.3; 如果 $j > 0$ 并且 $down = true$, 转到步骤 4.4; 否则, 算法结束.

上述算法描述中, 步骤 1 到步骤 3 是离线计算步骤, 建立哈德码变换域码书. 步骤 4 是最近邻码书搜索算法.

4 仿真实验

快速码书搜索算法众多, 为了检验本文算法的性能, 本文实现了一些典型的快速码书搜索算法. 非哈德码变换域中实现了穷尽搜索(FS)、EENNS 和 IEENNS 算法, 哈德码变换域中实现了 HTPDS 算法、HTEENNS 算法、IHTEENNS 算法以及本文提出的 HTTNNS 算法. 仿真采用 LBG 算法生成码书, 码书大小为 $N = 256$ 或 $N = 512$, 而矢量维数为 $k = 8 \times 8 = 64$ 或 $k = 16 \times 16 = 256$. 然后利用这些码书对 512×512 的 256 灰度的“Lena”和“Baboon”图像进行编码. 所有测试在 HP xw9200 工作站上进行, 运行环境为 Windows Server 2003 操作系统.

表 1 给出了各种算法对“Lena”和“Baboon”图像进行编码的平均误差计算量. 从表 1 可以看出, 采用新的子空间三角不等式删除准则, 并且选择外侧码字作为参考点, HTTNNS 算法的平均误差计算量要小于 IHTEENNS 算法. IHTEENNS 算法中改进的方差删除准则可以看成是子空间三角不等式删除准则的特例(参考点在原点), 可以看出, 在子空间三角不等式删除准则中, 选择外侧参考点比选择原点参考点能够排除更多的不匹配码字, 该结果与 3.2 小节的结论相一致. 需要指出的是, IHTEENNS 采用了三种删除准则来排除不匹配码字, 而 HTTNNS 方法只采用了一种删除准则.

表 1 平均误差计算量比较

算法	码书尺寸 = 256				码书尺寸 = 512			
	Lena		Baboon		Lena		Baboon	
	8 × 8	16 × 16	8 × 8	16 × 16	8 × 8	16 × 16	8 × 8	16 × 16
FS	256	256	256	256	512	512	512	512
EENNS	11.8984	14.5234	65.5049	73.2529	18.2964	15.0244	120.1147	98.0918
IEENNS	9.7170	12.0674	54.1553	61.7227	14.9626	12.6299	100.7751	83.5918
HTPDS	5.0093	4.2320	27.7077	23.6936	6.9692	4.4250	45.2642	25.6280
HTEENNS	4.0347	3.5737	25.4681	22.1143	5.2815	3.6870	40.6347	22.9305
IHTEENNS	3.7057	3.3742	23.0398	20.3915	4.8640	3.5274	37.0685	21.3036
HTTNNS	3.4673	3.0126	21.5321	18.6982	4.5426	3.3897	34.8732	10.0132

表 2 给出了各种算法对“Lena”和“Baboon”图像进行编码的平均编码时间. 可以看出, HTTNNS 算法与现有的最近邻码字搜索算法相比, 能够降低搜索时间. 与 IHTEENNS 算法相比, HTTNNS 算法的搜索时间能节省

8% 到 26% 左右. HTTNNS 算法能够大幅度降低编码时间的原因在于: 1) 采用了更强的删除准则, 能够直接排除掉更多的不匹配码字; 2) 避免了 IHTEENNS 算法中的一些删除准则之间的冗余缺陷.

表 2 平均运行时间比较(秒)

算法	码书尺寸 = 256				码书尺寸 = 512			
	Lena		Baboon		Lena		Baboon	
	8 × 8	16 × 16	8 × 8	16 × 16	8 × 8	16 × 16	8 × 8	16 × 16
FS	3.5781	3.4375	3.5469	3.4688	7.2969	6.8750	7.7031	6.6406
EENNS	0.5156	0.3594	1.4688	1.3906	0.6406	0.3750	2.4375	1.8281
IEENNS	0.5000	0.3281	1.2656	1.2788	0.5938	0.3595	2.1503	1.5625
HTPDS	0.3438	0.1875	0.6719	0.4375	0.3906	0.2031	1.0156	1.5156
HTEENNS	0.3169	0.1919	0.6406	0.4219	0.3794	0.2575	0.9531	0.5931
IHTEENNS	0.3125	0.1875	0.6250	0.4063	0.3750	0.2500	0.9375	0.5781
HITNNS	0.2813	0.1563	0.5894	0.3706	0.3438	0.1719	0.8763	0.4219

本文提出的基于子空间三角不等式的删除准则也可以用于其他高维数据查询领域,比如图像检索中的高维特征向量查询。在高维特征向量的顺序索引结构中,通过排列主分量,在查询过程中可以降低向量访问数量^[13]。对于欧氏距离,主分量分析和哈德码变换都可以看成是正交变换,而主分量相当于哈德码变换中的第一维分量,按照本文的讨论,在正交变换后的特征向量中附加子空间距离,可以进一步降低特征向量的距离运算复杂度,提高查询效率。

5 结束语

本文提出了一种新的哈德码变换域最近邻矢量量化码字搜索算法。该算法采用了哈德码变换域矢量的两个统计特征:均值(和值)和子空间距离。采用均值来限定码字的访问范围,采用子空间距离来进一步排除不匹配码字。本文的主要贡献在于:(1)指出了方差和范数删除准则之间存在的冗余;(2)提出了一种通用码字删除准则-子空间三角不等式删除准则,能够排除更多的候选码字。仿真结果表明,本文提出的新算法比其他快速码字搜索算法更有效,该算法的提出对矢量量化过程中的编码研究和高维数据查询处理具有重要的理论意义和应用价值。

参考文献

- [1] A Gersho, R M Gray. Vector Quantization and Signal Compression[M]. Kluwer Academic Publisher, Boston, 1992.
- [2] Y Linde, A Buzo, R M Gray. An algorithm for vector quantizer design[J]. IEEE transactions on Communications 1980, 28(1): 84 – 95.
- [3] E Tuncel, H Ferhatosmanoglu, K Rose. VQ-Index: an index structure for similarity searching in multimedia databases[A]. In proceedings of 10th ACM international conference on multimedia[C]. Juan les Pins, France, 2002. 543 – 552.
- [4] L Guan, M Kamel. Equal-average hyperplane partitioning method for vector quantization of image data[J]. Pattern Recognition Letters, 1992, 13(10): 693 – 699.
- [5] K S Wu, J C Lin. Fast VQ encoding by an efficient kick-out

condition[J]. IEEE Transactions on Circuits, Systems and Video Technology. 2000, 10(1): 59 – 62.

- [6] C H Lee, L H Chen. Fast closest codeword search algorithm for vector quantization[J]. IEE Proceedings-Vision, Image and Signal Processing. 1994, 141(3): 143 – 148.
- [7] S J Baek, B K Jeon, K M Sung. A fast encoding algorithm for vector quantization[J]. IEEE Signal Processing Letters. 1997, 4(2): 325 – 327.
- [8] Z M Lu, J S Pan, S H Sun. Efficient codeword search algorithm based on Hadamard transform[J]. Electronics Letters. 2000, 36(16): 1364 – 1365.

(下转 962 页)

作者简介



崔江涛 男, 1975 年 11 月出生于山东省平度市, 西安电子科技大学副教授、博士, 主要研究方向为多媒体内容安全、高维数据查询处理。
E-mail: cuijt@xidian.edu.cn



李凤华 男, 1966 年 3 月出生于湖北省浠水县, 北京电子科技学院研究生处处长、博士、教授、博士生导师, 主要研究方向为网络安全与可信计算。
E-mail: lfh@besti.edu.cn



马建峰 男, 1963 年 10 月出生于陕西省西安市, 西安电子科技大学计算机学院院长、博士、教授、博士生导师, 主要研究方向为密码学与网络安全。
E-mail: jfma@mail.xidian.edu.cn

