

一种新的基于子空间三角不等式 快速搜索的参考矢量选择方法

马肖肖, 潘志斌, 李 阳, 方 洁

(西安交通大学 电子与信息工程学院, 陕西 西安 710049)

摘 要: 提出了一种新的参考矢量选择方法. 编码前, 首先计算所有码字的哈德码变换, 按照第一维系数的大小对码字进行升序排序, 将排序后的码字平均分为四段, 选择每一段中间位置的码字作为该段的参考矢量, 从而增加了子空间三角不等式删除准则的删除能力, 有效减小了搜索空间, 加快了搜索速度. 仿真实验表明, 对不同复杂程度的测试图像, 算法均快于其他搜索算法.

关键词: 矢量量化; 子空间参考矢量; 搜索空间; 搜索时间

中图分类号: TP919.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)07-0014-04

A New Method of Selecting Reference Vector for Fast Search Algorithm Using Triangle Inequality in Subspace

MA Xiao-xiao, PAN Zhi-bin, LI Yang, FANG Jie

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

Abstract: A new method of selecting reference vector for fast search algorithm using inequality in subspace proposed by Cui et al is proposed. Before the searching process, all codewords are transformed in Hadamard-transformed and sorted in an ascending order according to their first dimensions. The sorted codewords in the codebook are divided into four groups equally and the middle codeword of each group is selected as the reference vector. The method of selecting reference vector in this paper can increase the ability of fast search algorithm using inequality in subspace in rejecting the unlikely codewords and reduce the searching space and speed up the searching time. The experimental results show that the proposed method has a better performance than other fast search algorithm in searching time for different test images.

Key words: vector quantization; subspace reference vector; searching space; searching time

1 引言

矢量量化(Vector Quantization, VQ)^[1]是一种简单而高效的有损数据压缩技术, 已广泛应用于图像、语音处理和模式识别等领域. 矢量量化的编码就是在码书中找到与输入矢量最匹配的码字过程. 传统的搜索算法采用穷尽搜索(Full Search, FS)的方法, 其计算非常繁重, 为了减少搜索过程中的计算量

和加快搜索过程, 许多学者从不同方面提出了多种快速搜索算法. 如部分失真快速搜索算法(Partial Distortion Search, PDS)^[2]、基于特征值的快速搜索算法^[3]、基于三角不等式的快速搜索算法^[4-7]、基于变换域的快速搜索算法^[8-12], 其中基于子空间三角不等式的高维码字搜索算法(HTTNS)^[10]是目前最有效的快速搜索算法之一. 针对 HTTNS 算法中选择参考矢量方法的不足, 本文提出了新的参

收稿日期: 2013-08-19; 修回日期: 2013-10-09

基金项目: 高校博士点基金资助项目(20100201110030); 西安市科技计划(CX1251-3); 浙江大学开放基金项目(A1115); 南京大学开放基金项目(KFKT2013B05)

考矢量选择方法.

2 基本概念

矢量量化的编码就是在码书 $\mathbf{C} = \{y_0, y_1, \dots, y_{N-1} \mid y_i \in \mathbf{R}^k\}$ 中找到与输入矢量 $\mathbf{x} = (x_0, x_1, \dots, x_{k-1})$ 最匹配的码字 $\mathbf{y}_w = (y_{w0}, y_{w1}, \dots, y_{w(k-1)})$ 过程,其中 N 为码书大小. 编码失真常用欧式距离的平方来衡量,其定义如下所示:

$$d(\mathbf{x}, \mathbf{y}_i) = \sum_{j=0}^{k-1} (x_j - y_{ij})^2 \quad (1)$$

2.1 哈德码变换的基本定义

令 $\mathbf{H}_n$ 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 维矢量并且 $k = 2^n (n > 0)$,则有以下定义和性质.

定义1 $\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, \mathbf{H}_{n+1} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_n & \mathbf{H}_n \\ \mathbf{H}_n & -\mathbf{H}_n \end{bmatrix}$

那么 k 维 ($k = 2^n$) 矢量 $\mathbf{x}$ 的哈德码变换矢量 $\mathbf{X}$ 可以表示为 $\mathbf{X} = \mathbf{H}_n \mathbf{x}^T$.

定义2 哈德码变换域的方差

k 维 ($k = 2^n$) 矢量 $\mathbf{x}$ 的哈德码变换矢量 $\mathbf{X}$ 的方差定义为 $V_x = \sqrt{\sum_{l=1}^{k-1} X_l^2}$.

定义3 哈德码变换域的范数

k 维 ($k = 2^n$) 矢量 $\mathbf{x}$ 的哈德码变换矢量 $\mathbf{X}$ 的范数定义为 $\|\mathbf{X}\| = \sqrt{\sum_{l=0}^{k-1} X_l^2}$.

2.2 基于子空间三角不等式码字搜索算法

文献[10]中提出了一种高效的子空间三角不等式删除准则:

假定当前哈德码变换域的最小失真为 $D_{\min} = d(\mathbf{X}, \mathbf{Y}_p)$, $\mathbf{R} = (R_0, R_1, \dots, R_{k-1})$ 为一个可任意选择的哈德码变换域的 k 维参考矢量, $D_X = \sqrt{\sum_{l=1}^{k-1} (X_l - R_l)^2}$ 为哈德码变换域矢量 $\mathbf{X}$ 与参考矢量 $\mathbf{R}$ 的除去第一维 ($l=0$) 的 ($k-1$) 维子空间距离, $D_i = \sqrt{\sum_{l=1}^{k-1} (Y_{il} - R_l)^2}$ 为哈德码变换域码字 $\mathbf{Y}_i$ 与参考矢量 $\mathbf{R}$ 的 ($k-1$) 维子空间距离,如果

$$(X_0 - Y_{i0})^2 + (D_X - D_i)^2 \geq D_{\min} \quad (2)$$

那么 $d(\mathbf{X}, \mathbf{Y}_i) \geq D_{\min}$ 成立,则排除码字 $\mathbf{y}_i$.

文献[10]利用式(2)来排除候选码字,加快码字的搜索速度. 在码字搜索过程中,首先判断 $|X_1 - Y_{i1}| \geq D_{\min}$ 是否成立. 如果成立,则排除码字 $\mathbf{Y}_i$; 否则,采用式(2),如果式(2)成立,就排除码字 $\mathbf{Y}_i$; 否则采用 PDS 来排除候选码字 $\mathbf{Y}_i$ 或者更新目前最小失真 $D_{\min}$.

3 本文算法

3.1 一种新的参考矢量选择方法

选择不同的参考矢量 $\mathbf{R}$ 会影响式(2)中 $(D_X - D_i)^2$ 的大小,对候选码字的删除效果产生直接的影响. 文献[10]中给出了一种简单的参考矢量选择方法:对所有码字进行哈德码变换,除其第一维系数外,计算所有码字之间的 ($k-1$) 维子空间距离,在最大子空间距离的两个码字之间任意选择一个码字作为参考矢量 $\mathbf{R}$.

图1给出在码书大小为1024、码字维数为16的条件下,对Lena图像编码时输入矢量 $\mathbf{X}$ 的搜索空间的统计直方图. 从图1可以发现:在HTTNNS算法中,输入矢量 $\mathbf{X}$ 的搜索空间一般都比较小. 在这种情况下,文献[10]选择的参考矢量 $\mathbf{R}$ 就有两个明显的不足:(1) 文献[10]选择的参考矢量 $\mathbf{R}$ 与输入矢量 $\mathbf{X}$ 无关,不能自适应于输入矢量 $\mathbf{X}$ 的变化,就不能很好地发挥子空间三角不等式的删除能力;(2) 文献[10]选择的参考矢量 $\mathbf{R}$ 一般位于码字集合的外侧,在此情况下参考矢量点 $\mathbf{R}$ 与输入矢量 $\mathbf{X}$ 的子空间距离 D_X 和与候选码字 $\mathbf{Y}_i$ 的子空间距离 D_i 都比较远,两个子空间距离的差值 $(D_X - D_i)$ 一般比较小,因此不能很好地发挥出子空间三角不等式的删除能力,也就不能删除不匹配的候选码字 $\mathbf{Y}_i$.

针对文献[10]选择的参考矢量 $\mathbf{R}$ 的两个不足,提出了一种新的基于子空间三角不等式删除准则的参考矢量选择方法. 从图1可以看出:在HTTNNS算法中,输入矢量 $\mathbf{X}$ 的搜索空间一般都小于码书大小的四分之一,大部分输入矢量的搜索空间小于码书大小的八分之一. 如码书大小为1024的情况,输入矢量 $\mathbf{X}$ 的搜索空间一般都小于256,大部分输入矢量的搜索空间都小于128. 针对文献[10]中选择的参考矢量 $\mathbf{R}$ 一般不能自适应于输入矢量 $\mathbf{X}$ 的变化以及结合图1的观察,本文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序,将排序后的码字平均分为四段,每一段的码字个数均为 $N/4$. 针对文献[10]中选择的参考矢量 $\mathbf{R}$ 与输入矢量 $\mathbf{X}$ 的子空间距离 D_X 和与候选码字 $\mathbf{Y}_i$ 的子空间距离 D_i 都比较远,两个子空间距离的差值 $(D_X - D_i)$ 一般比较小的不足,本文选择每一段中间位置的码字作为该段的参考矢量,分别记为 $\mathbf{R}_0$ 、 $\mathbf{R}_1$ 、 $\mathbf{R}_2$ 和 $\mathbf{R}_3$. 对于每一个码字 $\mathbf{Y}_i$,分别计算其与参考矢量 $\mathbf{R}_0$ 、 $\mathbf{R}_1$ 、 $\mathbf{R}_2$ 和 $\mathbf{R}_3$ 的 ($k-1$) 维子空间距离 $D_{i,0}$ 、 $D_{i,1}$ 、 $D_{i,2}$ 和 $D_{i,3}$. 对于任意的输入矢量 $\mathbf{x}$,对输入矢

量 $\mathbf{x}$ 进行哈德码变换得到矢量 $\mathbf{X}$ 后, 用二分法找到其初始匹配码字 $\mathbf{Y}_p$, 判断初始匹配码字 $\mathbf{Y}_p$ 处于哪个码字段内, 计算输入矢量 $\mathbf{X}$ 与初始匹配码字 $\mathbf{Y}_p$ 对应码字段的参考矢量的 $(k-1)$ 维子空间距离 D_X , 再利用式(2) 来排除候选码字.

HTTNNS算法对Lena编码过程中搜索空间的统计直方图
(码书大小为1024、矢量维数为16)

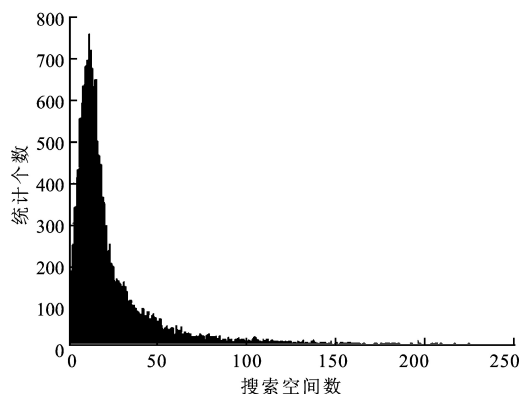


图1 对Lena图像编码时输入矢量
 $\mathbf{X}$ 的搜索空间统计直方图

3.2 本文搜索算法

本文提出的搜索算法的新的参考矢量选择方法及搜索过程描述如下:

离线操作:

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序.

步骤2: 将排序后的码字平均分为四段, 取每一段的中间位置的矢量作为该段的参考矢量, 分别记为 $\mathbf{R}_0$ 、 $\mathbf{R}_1$ 、 $\mathbf{R}_2$ 和 $\mathbf{R}_3$.

步骤3: 对所有码字, 分别计算其与参考矢量 $\mathbf{R}_0$ 、 $\mathbf{R}_1$ 、 $\mathbf{R}_2$ 和 $\mathbf{R}_3$ 的 $(k-1)$ 维子空间距离 $D_{i,0}$ 、 $D_{i,1}$ 、 $D_{i,2}$ 和 $D_{i,3}$.

在线操作:

步骤4: 对于每一个输入矢量 $\mathbf{x}$, 计算其哈德码变换域矢量 $\mathbf{X}$.

步骤5: 通过二分查找法在排序后的码书中找出与输入矢量 $\mathbf{X}$ 的第一维系数 X_0 最接近的第一维系数 $\mathbf{Y}_{p0}$ 所对应的码字 $\mathbf{Y}_p$ 并将该码字作为初始匹配码字.

步骤6: 在 $\{\mathbf{R}_0, \mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \mathbf{R}_3\}$ 中选择初始匹配码字 $\mathbf{Y}_p$ 所在段的参考矢量, 计算该参考矢量与输入矢量 $\mathbf{X}$ 的 $(k-1)$ 维子空间距离 D_X .

步骤7: 算法采用上下搜索法, 即在码字 $\mathbf{Y}_p$ 附近进行上下搜索, 一旦某个方向上的码字的第一维系数满足 $|X_0 - Y_{i0}| \geq D_{\min}$, 则码字 $\mathbf{Y}_i$ 可以排除, 并且此后该方向的搜索彻底停止而只在另一个方向上

行搜索; 否则, 在 $\{D_{i,0}, D_{i,1}, D_{i,2}, D_{i,3}\}$ 中选择 $\mathbf{Y}_p$ 所在段的 D_i , 若不等式(2) 成立, 则码字 $\mathbf{Y}_i$ 排除; 不然采用 PDS 算法来排除候选码字或者更新 $D_{\min}$, 然后转向另一个方向进行搜索. 如果两个方向的搜索均停止, 则搜索过程结束.

4 仿真实验

本文算法的所有仿真实验均在 Intel core2 主频 2.93 GHz、内存 2 GB 的个人计算机上进行. 码书大小分别为 128、256、512 和 1024, 矢量维数分别为 16、64 和 256. 测试图像为 512×512 的 256 灰度图像 Lena、Peppers、Baboon 和 Airplane, 如图 2 所示.



图2 四幅测试图像

由实验结果可以看出, 本文提出的参考矢量选择方法可以减少基于子空间三角不等式搜索空间的平均搜索空间并且加快其搜索时间, 其中平均搜索空间减少了 7.61%~32.92%, 平均搜索时间减少了 6.01%~24.91%. 为了证明本文算法的有效性, 本文算法与 HPDS 算法^[8]、IHTEENNS^[9]、HTTNNS 算法^[10] 和 IDTA 算法^[7] 进行比较. 可以看出, 对于不同的码书大小、不同的码字维数和不同的测试图像, 本文算法的搜索时间均快于其他几种算法, 例如其平均搜索时间比最快的 HTTNNS 算法减少了 6.01%到 24.91%.

5 结束语

本文提出了一种新的基于子空间三角不等式快速搜索的参考矢量选择方法. 该参考矢量选择方法根据对输入矢量实际上只需搜索部分码书空间的特点, 自适应的为输入矢量选择合适的参考矢量, 增加了子空间三角不等式删除准则的删除能力, 减少了码字的搜索时间, 加快了码字的搜索速度. 仿真实验表明: 本文的参考矢量选择方法比文献[10]中的参考矢量选择算法更加有效, 可以明显减少矢量的搜索空间和加快码字的搜索速度, 并且本文的搜索时间要快于其他算法^[7-10] 的搜索速度.

参考文献:

- [1] Gray R M. Vector quantization [J]. IEEE ASSP Magazine, 1984, 1(2):4-29.

- [2] Bei C D, Gray R M. An improvement of the minimum distortion encoding algorithm for vector quantization [J]. IEEE Trans. Communications, 1985, 33(10): 1132-1133.
- [3] Guan L, Kamel M. Equal-average hyperplane partitioning method for vector quantization of image data [J]. Pattern Recognition Letters, 1992, 13(10): 693-699.
- [4] 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.
- [5] Pan Z, Kotani K, Ohmi T. A generalized multiple projection axes method for fast encoding of vector quantization [J]. Pattern recognition Letters, 2005, 26(9): 1316-1326.
- [6] Pan Z, Kotani K, Ohmi T. Fast encoding method for vector quantization using modified L2-Norm pyramid [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2005, 12(9): 609-612.
- [7] Chang C C, Hsieh Y P. A fast VQ codebook search with initialization and search order [J]. Information Sciences, 2012, 183(1): 132-139.
- [8] Lu Z M, Pan J S, Sun S H. Efficient codeword search algorithm based on Hadamard transform [J]. Electronics Letters, 2000, 36(16): 1364-1365.
- [9] Chu S C, Lu Z M, Pan J S. Hadamard transform based fast codeword search algorithm for high-dimensional VQ encoding [J]. Information Sciences, 2007, 177(3): 734-746.
- [10] 崔江涛, 李凤华, 马建峰. 基于子空间三角不等式的高维码字搜索算法 [J]. 电子学报, 2011, 39(4): 940-945.
- [11] 乔阳, 潘志斌, 乔瑞萍, 等. 基于 Hadamard 变换和自适应顺序搜索的码字快速搜索算法 [J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(1): 118-121.
- [12] 蔡光跃, 董恩清. 一种改进的基于 Hadamard 变换的快速码字搜索算法 [J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(2): 154-156.

作者简介:

- 马肖肖 男, (1990-), 硕士研究生. 研究方向为图像编码.
- 潘志斌 男, (1963-), 博士, 教授. 研究方向为图像编码和模式识别.
- 李阳 男, (1987-), 硕士研究生. 研究方向为模式识别.
- 方洁 女, (1989-), 硕士研究生. 研究方向为视频编码.

(上接第 13 页)

作者简介:



王悦 女, (1992-), 硕士. 研究方向为信息安全.



李树国 男, (1963-), 教授、博士生导师. 研究方向为信息安全算法的数字大规模集成电路设计与实现.