

# H.264 中一种有效的对整数 DCT 系数的预测方法

雷亚锋,高鹏,吴枫

LEI Ya-feng,GAO Peng,WU Feng

中国科学院 研究生院 信息科学与工程学院,北京 100080

School of Information Science and Engineering,Graduate University of Chinese Academy of Sciences,Beijing 100080,China

E-mail:leiyafeng05@mails.gucas.ac.cn

**LEI Ya-feng,GAO Peng,WU Feng.Efficient prediction method of integer DCT coefficients for H.264/AVC.Computer Engineering and Applications,2008,44(23):71-74.**

**Abstract:** This paper presents a novel efficient prediction method to reduce redundant Discrete Cosine Transform(DCT) and quantization computations for H.264 encoding optimization.Through theoretical analysis,three transform dynamic distribution coefficient of Normal4×4,LumaDC4×4 and ChromaDC2×2 are studied,and the sufficient condition for DCT coefficients to be quantized to zeros is studied.As a result,three sufficient conditions corresponding to three types of transform and quantization methods in H.264 are proposed.Compared with other method in the literature,the proposed method derives more precise and efficient conditions to predict zero quantized DCT coefficients.Both the theoretical analysis and experimental results demonstrate that the proposed algorithm is superior to other algorithms in terms of the computational complexity reduction,encoded video quality,false acceptance rate,and false rejection rate.

**Key words:** video coding;H.264;quantization

**摘要:**提出了一种在 H.264 中减小 DCT 变换和量化计算量的新的有效方法。通过理论分析,研究了 Normal4×4,LumaDC4×4 和 ChromaDC2×2 这三种变换的系数动态分布,进而对变换和量化方法的三种类型提出相应的 DCT 系数量化为零三个充分条件。与文献中所提到的其它方法相比,该方法更加有效、精确。理论分析和实验结果表明:在减小计算复杂度、编码视频质量、错误接受率(false acceptance rate),错误拒绝率(false rejection rate)等方面,该方法都优于其它方法。

**关键词:**视频编码;H.264;量化

**DOI:**10.3778/j.issn.1002-8331.2008.23.022 **文章编号:**1002-8331(2008)23-0071-04 **文献标识码:**A **中图分类号:**TP391

## 1 引言

新提出的视频编码标准 H.264/AVC<sup>[1]</sup>在编码效率方面,比起以前的标准(诸如 MPEG-4 和 H.263)有着非常优越的性能。但是,由于 H.264/AVC 的计算复杂度太高,所以它不能在实时系统中得到广泛的应用。一般来说,模式选择和运动估计占据了 H.264 编码器大部分的复杂度。为了提高视频编码器的实时性,最近几年,提出了很多快速运动估计和模式选择算法,加速了 H.264 的编码。由于运动估计和模式选择的复杂度降低了,为了更进一步提高视频编码,也需要优化其它模块。

对 H.264 编码来说,DCT 变换和量化是两个重要的函数。H.264 用了三种变换<sup>[7]</sup>,这三种变换都是基于残差数据类型进行编码的:(1)对残差数据,所有的 4×4 块的整数 4×4DCT 变换(Normal4×4 类型);(2)对帧内 16×16 模式,亮度信号的直流分量系数(4×4 的数组)的 Hadamard 变换(LumaDC4×4 类型);(3)色度直流分量系数(2×2 的数组)的 Hadamard 变换(Chro-

maDC2×2 类型)。在基于 H.264 编码器的数字信号处理(DSP)中,大约占据了整个计算量的 16%<sup>[2]</sup>。在 H.264 中,所有的 DCT 系数都被量化为零是相当普遍的。通常,这个全零状态只有在 DCT 变换和量化之后才能够判断出来。如果有一种方法能够在 DCT 变换和量化之前就能够判断出 DCT 块的全零状态,那么可以使计算量有进一步的下降。

在文献[3-6]中,Yu 等人研究了关于编码器 8×8 类型 DCT 块的全零状态提前判别算法。然而这种方法不能直接应用到 H.264 编码器中。在文献[8]中,测试 DCT 变换和量化性能以后,比起 Sousa 的方法<sup>[5]</sup>,Kim 提出了更加精确的充分条件来判断全零 DCT 块。不幸的是,文献[8]中对全零 DCT 块只考虑了 Normal 4×4 类型,并没有说明 LumaDC4×4 和 ChromaDC2×2 类型。因此,在 LumaDC4×4 和 ChromaDC2×2 类型中的非零直流系数可能被错误的匹配为零值并且更重要的是视频质量将有所下降。针对于此,Haili Wang 等<sup>[6]</sup>提出了一种更加有效的方法,它不仅说

**基金项目:**国家高技术研究发展计划(863)(the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2006AA01Z317)。

**作者简介:**雷亚锋(1978-),硕士研究生,主要研究方向:视频编码与视频分析;高鹏(1966-),博士,教授,主要研究方向:视频编码、计算机视觉;

吴枫(1969-),博士,研究员,主要研究方向:多媒体处理和编码、视频分割、多媒体传输等。

**收稿日期:**2007-10-23

**修回日期:**2008-01-15

明了 Normal4x4 类型,而且也说明了 LumaDC4x4 和 ChromaDC2x2 类型。

本文中,对 H.264 全零 DCT 块的早期判断有非常大的改进。对 Normal4x4 类型 DCT 系数的动态范围做了全面的分析并且得出了更加准确的充分条件。另外,也理论上研究了 LumaDC4x4 和 ChromaDC2x2 类型并且提供了这两种类型在 Hadamard 变换后被量化成零的充分条件。最终,本文所述的方法在没有视频质量下降的前提下,有效的减少了 DCT 变换和量化计算。

## 2 H.264 中变换和量化

和前期的视频编码标准一样,H.264 利用了预测残差变换编码。然而,在 H.264 中,DCT 变换用在 4x4 块中,并且依靠编码残差数据的类型进行三次变换:Normal4x4,LumaDC4x4,和 ChromaDC2x2<sup>[7]</sup>。在编码器中,变换编码及量化的流程如图 1 所示。

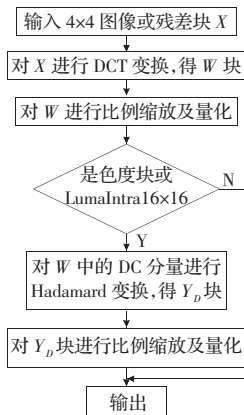


图 1 编码器中变换编码及量化流程

### 2.1 Normal4x4 类型变换和量化

Normal4x4 变换是整数变换,避免了反变换的错误匹配问题。变换的相应部分仅仅只需要加法和移位操作。并且变换器集成了缩放比例乘法操作避免了量化的分开。对于一个 4x4 的残差块  $e(x,y), 0 \leq x,y \leq 3$ ,则整数变换被定义为:

$$E(u,v) = \sum_{x=0}^3 \sum_{y=0}^3 e(x,y) A(x,u) A(y,v) \quad (1)$$

其中:

$$A(m,n) = \left\langle \frac{2.5C(n)}{\sqrt{2}} \cos \frac{(2m+1)n\pi}{8} \right\rangle \quad (2)$$

这里:  $C(n) = \begin{cases} 1/\sqrt{2}, & n=0 \\ 1, & \text{其它} \end{cases}$ 。

操作  $\langle x \rangle$  指距  $x$  最小的整数。 $E(u,v)$  是整数 DCT 系数; $Q_p$  是量化参数,取值从 0~51, $Z(u,v)$  是被量化的系数, $0 \leq u,v \leq 3$ ,它被定义为:

$$\begin{aligned} |Z(u,v)| &= \lfloor |E(u,v)| \cdot M(u,v) + f \gg q \text{ bits} \\ \text{sign}(Z(u,v)) &= \text{sign}(E(u,v)) \end{aligned} \quad (3)$$

其中: $q \text{ bits} = 15 + \text{floor}(Q_p/6)$ ;“ $\gg$ ”指二进制右移操作; $M(u,v)$  是与  $Q_p$  相关的乘数因子,根据位置能够分为三类,如表 1 所示, $f$  的定义如下:

$$f = \begin{cases} \langle 2^{q \text{ bits}} / 3 \rangle, & \text{帧内块} \\ \langle 2^{q \text{ bits}} / 6 \rangle, & \text{帧间块} \end{cases}$$

表 1 乘数因子 M

$Q_p, \%6$	(1,1),(1,3)	Others	(0,0),(0,2)
	(3,1),(3,3)		(2,0),(2,2)
0	5 243	8 066	13 107
1	4 660	7 490	11 916
2	4 194	6 554	10 082
3	3 647	5 825	9 362
4	3 355	5 243	8 192
5	2 893	4 559	7 282

### 2.2 LumaDC4x4 类型的变换和量化

如果宏块是用帧内 16x16 模式进行编码,那么每个 4x4 残差块首先用上面所描述的 Normal4x4 类型进行变换。然后每个 4x4 的块的直流分量再用 4x4Hadamard 变换。如下所示:

$$Y_4 = \frac{H_4 E_4 H_4^T}{2} \quad (4)$$

$$\text{其中: } H_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$E_4$  是 4x4 直流分量, $Y_4$  是变换以后的块。被量化的直流分量记为:

$$\begin{aligned} |Z_4(u,v)| &= \lfloor |Y_4(u,v)| \cdot M(0,0) + 2f \gg (q \text{ bits} + 1) \\ \text{sign}(Z_4(u,v)) &= \text{sign}(Y_4(u,v)) \end{aligned} \quad (6)$$

### 2.3 ChromaDC2x2 类型变换和量化

4x4 色度块的变换用 Normal4x4 类型。但色度系数的每一个 4x4 块的直流分量聚合在 2x2 的块  $E_2$  中并且进一步用 2x2Hadamard 变换进行处理。

$$Y_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} E_2 \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

执行 2x2 输出块  $Y_2$  的量化:

$$\begin{aligned} |Z_2(u,v)| &= \lfloor |Y_2(u,v)| \cdot M(0,0) + 2f \gg (q \text{ bits} + 1) \\ \text{sign}(Z_2(u,v)) &= \text{sign}(Y_2(u,v)) \end{aligned} \quad (8)$$

## 3 本文的算法

### 3.1 在 Normal4x4 类型中全零 DCT 块的预测

对 Normal4x4 类型,DCT 系数  $E(u,v)$  被量化为零的充分条件是:

$$|E(u,v)| < T(u,v), T(u,v) \triangleq \frac{2^{q \text{ bits}} - f}{M(u,v)} \quad (9)$$

从式(1)中,能够得到:

$$|E(u,v)| \leq \sum_{x=0}^3 \sum_{y=0}^3 |e(x,y)| \cdot |A(x,u)| \cdot |A(y,v)| \triangleq B(u,v) \quad (10)$$

其中  $B(u,v)$  为:

$$B(u,v) = \sum_{x=0}^3 \sum_{y=0}^3 E_a \otimes A_a(u,v) \quad (11)$$

这里  $E_a = [e(x,y)]_{4 \times 4}$ ,  $A_a(u,v) = [|A(x,u)| \cdot |A(y,v)|]_{4 \times 4}$ ,  $\otimes$  指  $E_a$  中的每个元素与数组  $A_a(u,v)$  中对应位置上的元素相乘。

通过研究  $B$  的特性,能获得每个将被量化为零的 DCT 系数的充分条件。以  $u=v=1$  为例:

$$A_a(1,1) = \begin{bmatrix} 4 & 2 & 2 & 4 \\ 2 & 1 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 1 & 2 \\ 4 & 2 & 2 & 4 \end{bmatrix} \quad (12)$$

为了简单起见,假设没有失真。一个 4x4 块可以分成 4 部分:  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ , 表述如下:

$$\begin{aligned} A_1 &= \{(x, y) | x=0, 3, y=0, 3\} \\ A_2 &= \{(x, y) | x=0, 3, y=1, 2\} \\ A_3 &= \{(x, y) | x=1, 2, y=1, 2\} \\ A_4 &= \{(x, y) | x=1, 2, y=0, 3\} \end{aligned} \quad (13)$$

每一个区域  $A_i$ ,  $1 \leq i \leq 4$  的绝对值残差和(SAD)记为  $S_i$ , 则:

$$S_i = \sum_x \sum_y |e(x, y)|, \forall (x, y) \in A_i, 1 \leq i \leq 4 \quad (14)$$

整个 4x4 块的 SAD 值为:  $SAD = \sum_{i=1}^4 S_i$ 。因此,由式(11)~式(14)

能得到:

$$B(1, 1) = 2SAD + 2S_1 - S_3 \quad (15)$$

从式(9)和式(10),能得到判断被量化的 DCT 系数为全零的充分条件是:

$$B(u, v) < T(u, v) \quad (16)$$

因此,在(1, 1)处,量化以后的 DCT 系数是零的充分条件是:

$$SAD < \frac{T(1, 1)}{2} + \frac{S_3 - 2S_1}{2} \quad (17)$$

同理,可以计算出其它位置的充分条件(见表 2)。根据表 1 中的三类,从表 2 中能够定义三个阈值  $Th_i$ ,  $1 \leq i \leq 3$ ,以判断在每一类中的全零 DCT 系数。阈值  $Th_i$  定义为:

$$Th_1 = \frac{T(1, 1)}{2} + \frac{1}{2} \times \min\{S_3 - 2S_1, S_4 - 2S_2, S_2 - 2S_4, S_1 - 2S_3\} \quad (18)$$

$$Th_2 = \frac{T(0, 1)}{2} + \frac{1}{2} \times \min\{S_2 + S_3, S_1 + S_4, S_3 + S_4, S_1 + S_2\} \quad (19)$$

$$Th_3 = T(0, 0) \quad (20)$$

表 2 对 4x4 块判断 DCT 系数量化为零的充分条件

条件	位置(u, v)
$SAD < (T(1, 1) + S_3 - 2S_1)/2$	(1, 1)
$SAD < (T(1, 1) + S_4 - 2S_2)/2$	(1, 3)
$SAD < (T(1, 1) + S_2 - 2S_4)/2$	(3, 1)
$SAD < (T(1, 1) + S_1 - 2S_3)/2$	(3, 3)
$SAD < (T(0, 1) + S_2 + S_3)/2$	(0, 1), (2, 1)
$SAD < (T(0, 1) + S_1 + S_4)/2$	(0, 3), (2, 3)
$SAD < (T(0, 1) + S_3 + S_4)/2$	(1, 0), (1, 2)
$SAD < (T(0, 1) + S_1 + S_2)/2$	(3, 0), (3, 2)
$SAD < T(0, 0)$	(0, 0), (0, 2), (2, 0), (2, 2)

如果  $SAD < Th_i$ , 那么在第  $i$  类(表 1 中)的所有 DCT 系数将量化为零。因此能得到下面的充分条件:

$$\begin{aligned} SAD &< TS \\ TS &\triangleq \min\{Th_1, Th_2, Th_3\} \end{aligned} \quad (21)$$

在这个条件下, 4x4 块的所有的 DCT 系数将被量化为零。

### 3.2 LumaDC4x4 和 ChromaDC2x2 类型预测

对 LumaDC4x4 和 ChromaDC2x2 类型, 4x4DCT 转换以后的直流分量经过 Hadamard 变换和量化。这个过程比起 Normal4x4 类型有所不同。因此,在式(21)的条件下,不能保证被量化的直流分量系数是零。对 LumaDC4x4 类型, 如果下式成立,则在式(6)中的直流系数将被量化为零。

$$|Y_4(u, v)| < 2 \cdot \frac{2^{-q \text{ bits}} - f}{M(0, 0)} = 2Th_3 \quad (22)$$

分析式(4)、式(5)后得到:

$$|Y_4(u, v)| \leq \frac{1}{2} \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 |E_4(i, j)|, 0 \leq u, v \leq 3 \quad (23)$$

设  $E_4(i, j)$  是一个宏块中 4x4 块  $(i, j)$  的直流系数。SAD  $(i, j)$  作为 4x4 块  $(i, j)$  的 SAD 值, 根据式(10), 得到:

$$|E_4(i, j)| \leq SAD(i, j) \quad (24)$$

把式(24)代入式(23), 得到:

$$|Y_4(u, v)| \leq \frac{1}{2} \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 SAD(i, j) = \frac{1}{2} SAD_{16} \quad (25)$$

$SAD_{16}$  是 16x16 宏块的 SAD 值。整理式(24)、式(25), 能得到如下充分条件:

$$SAD_{16} \leq 4Th_3 \quad (26)$$

在这个条件下, 所有的 LumaDC4x4 类型的直流分量将被量化为零。同理能够得到 ChromaDC2x2 类型的充分条件:

$$SAD_{4c} \leq 2Th_3 \quad (27)$$

$SAD_{4c}$  是 8x8 色度块的 SAD 值。

### 3.3 用本文的方法对 H.264 进行优化

基于上面的分析, 本文提出下面的方法来减少多余的 DCT 变换、量化(Q)、反量化(IQ)和反 DCT 变换(IDCT), 以此来对 H.264 进行编码优化。

**步骤 1** 如果目前的宏块用帧内 16x16 模式进行编码, 转入步骤 2。否则转到步骤 4。

**步骤 2** 如果  $SAD_{16} < 4Th_3$ , 则  $f_{16} = 1$ ; 否则  $f_{16} = 0$ ; 执行步骤 3。

**步骤 3** 对于亮度块, 如果  $SAD < TS$ , 并且  $f_{16} = 1$ , 则不执行 DCT 变换、量化、反量化、反 DCT 变换; 否则如果  $SAD < TS$  并且  $f_{16} = 0$ , DCT、Q、IQ、IDCT 仅仅执行到直流分量。否则如果并且  $f_{16} = 1$ , DCT、Q、IQ、IDCT 仅仅执行到 AC 系数。否则, DCT、Q、IQ、IDCT 执行所有的 DCT 系数。执行步骤 5。

**步骤 4** 对亮度块, 如果  $SAD < TS$ , 则跳过 DCT、Q、IQ、IDCT 的执行, 否则 DCT、Q、IQ、IDCT 执行所有的 DCT 系数。执行步骤 5。

**步骤 5** 如果  $SAD_{4c} \leq 2Th_3$ , 则  $f_c = 1$ ; 否则  $f_c = 0$ 。执行步骤 6。

**步骤 6** 对色度块, 如果  $SAD < TS$ , 并且  $f_c = 1$ , 则不执行 DCT 变换、量化、反量化、反 DCT 变换; 否则如果  $SAD < TS$  并且  $f_c = 0$ , DCT、Q、IQ、IDCT 仅仅执行直流分量。否则如果  $SAD \geq TS$  并且  $f_c = 1$ , DCT、Q、IQ、IDCT 仅仅执行 AC 系数。否则, DCT、Q、IQ、IDCT 执行所有的 DCT 系数。

## 4 实验结果

用 H.264 的参考软件 JM9.0<sup>[10]</sup> 来测本文所提到的方法。在实验中, 设置参考帧的数量为 1, 采用搜索半径为 32 的 Hex 快速运动估计算法。CIF 格式的视频序列将在 QP 为 24、28、32、36 和 40 情况下分别被编码 100 帧。

首先, 本文提出的方法大大降低了编码复杂度。在下面两个条件计算 DCT、Q、IQ 和 IDCT 复杂度的减少: (1) 包括文献 [5] 和文献 [8] 的快速算法和本文所提到的快速算法都仅仅执行 Normal4x4 类型; (2) 所有的 DCT 和量化都执行快速算法。在上述两个条件下, 计算量的减少定义为:

$$\Delta T = \frac{T_{org} - T}{T_{org}} \times 100\% \quad (28)$$

在这里  $T$  是 DCT、Q、IQ 和 IDCT 的编码时间,  $T_{org}$  是 DCT、Q、IQ

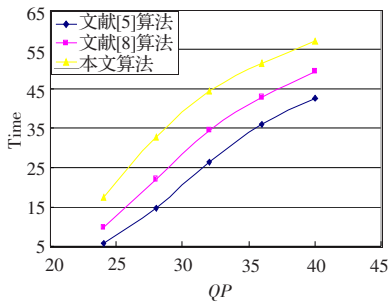


图2 在条件1下,时间复杂度的减少量随QP的变化曲线

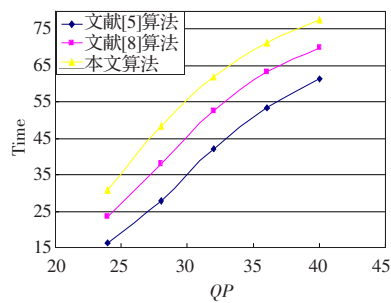


图3 在条件2下,时间复杂度的减少量随QP的变化曲线

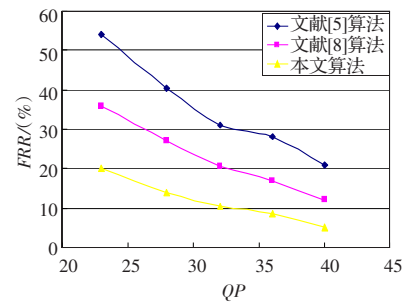


图4 交流系数零块的FRR(News)

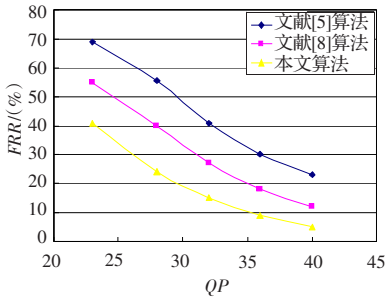


图5 交流系数零块的FRR(Foreman)

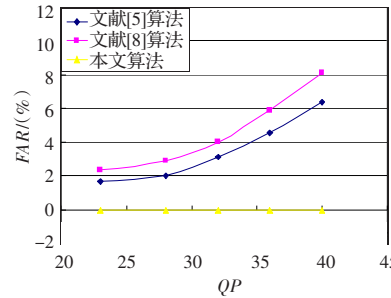


图6 直流系数零块的FAR(Foreman)

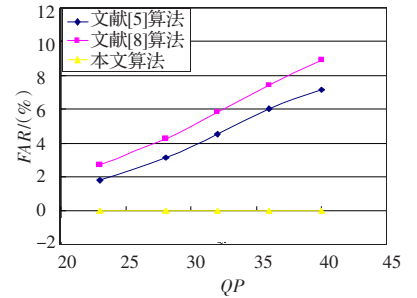


图7 直流系数零块的FAR(News)

和IDCT在原始编码器消耗的编码时间。在条件1和条件2下的编码时间结果如图2、图3所示。在图2、图3中,很明显的看到,本文所提出的方法在减少DCT、Q、IQ和IDCT的时间复杂度方面能达到很好的效果。

其次,本文的方法在错误拒绝率(FRR)和错误接受率(FAR)上也有很大改进。错误拒绝率(FRR)和错误接受率(FAR)可以用来衡量直流系数零块和交流系数零块的预期效果。FRR越小,它所对应的算法就更加有效,就能探测到直流或者交流系数零块。FAR越小,视频质量的损耗就越小。所以,越是有有效的预测方法,FAR和FRR的值就越小。通过实验,比较了交流系数零块的FRR值,图4和图5所示。从图中能够看到,本文所提到的方法优于其它两种方法,这是因为,所用的方法设置了合适的阈值来作为提前终止的条件。对直流系数零块的FAR值如图6、图7所示。实验表明,通过本文的方法所提供的阈值比起其它两种方法能更有效的判断出直流系数零块。

## 5 结束语

本文提出了一个早期判断DCT系数量化为零的方法,以此对H.264编码进行优化。对Normal4x4的DCT系数的动态分布进行了理论分析,得出比文献[5]和文献[8]更有效的条件以减少DCT和量化的复杂度。另外,对LumaDC4x4和ChromaDC2x2系数也进行了理论的研究并提出了充分条件。最终,所提到的方法在没有视频质量下降的情况下,很明显地缩减了DCT变换和量化的计算量。用H.264的参考软件JM9.0来测试本文所提到方法的性能。实验结果证明,所提到的方法在计算复杂度的减少,编码的视频质量以及错误接受率和错误拒绝率方面都优于其它两种方法。

(上接58页)

## 参考文献:

[1] 蔡山,张浩,陈洪辉,等.基于最小二乘法的分段三次曲线拟合方法研究[J].科学技术与工程,2007,7(3):352-355.  
[2] Kamat H A, Eassa M H. Solving curve fitting problems using genetic programming[J]. IEEE MELECON, 2002: 316-322.

## 参考文献:

[1] Advanced Video Coding for Generic Audiovisual Services ITU-T Rec.H.264(E)[S].2005.  
[2] Huang Y W, Hsieh B Y, Chen T C, et al. Analysis, fast algorithm, and VLSI architecture design for H.264/AVC intra frame coder[J]. IEEE Trans Circuits Syst Video Technol, 2005, 15(3): 378-401.  
[3] Yu A, Lee R, Flynn M. Performance enhancement of H.263 encoder based on zero coefficient prediction[C]//Proc ACM Int Multimedia Conf, 1997: 21-29.  
[4] Zhou X, Yu Z, Yu S. Method for detecting all-zero DCT coefficients ahead of discrete cosine transformation and quantization[J]. Electron Lett, 1998, 34(19): 1839-1840.  
[5] Sousa L A. General method for eliminating redundant computations in video coding[J]. Electron Lett, 2000, 36(4): 306-307.  
[6] Pao I M, Sun M T. Modeling DCT coefficients for fast video encoding[J]. IEEE Trans Circuits Syst Video Technol, 1999, 19(4): 608-616.  
[7] Malvar H S, Hallapuro A, Karczewicz M, et al. Low complexity transform and quantization in H.264/AVC[J]. IEEE Trans Circuits Syst Video Technol, 2003, 13(6): 598-603.  
[8] Kim G Y, Moon Y H, Kim J H. An early detection of all-zero DCT blocks in H.264[C]//Proc IEEE ICIP, 2004: 453-456.  
[9] Wang Han-li, Kwong S, Kok C W. Efficient prediction algorithm of integer DCT coefficients for H.264/AVC optimization [J]. IEEE Transactions on circuits and Systems for Video Technology, 2006, 16(4).  
[10] H.264/AVC Reference Software JM9.0[EB/OL]. (2005-05). <http://iphome.hhi.de/suehring/tml>.  
[3] 包健, 赵建勇, 周华英. 基于BP网络曲线拟合方法的研究[J]. 计算机工程与设计, 2005, 26(7): 1840-1841.  
[4] 李德毅, 杜鹃. 不确定性人工智能[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.  
[5] 李德毅, 刘常昱. 论正态云的普适性[J]. 中国工程科学, 2004, 6(8): 28-34.  
[6] 蒋嵘, 李德毅, 范建华. 数值型数据的泛概念树的自动生成方法[J]. 计算机学报, 2000, 23(5): 470-476.