

文章编号:1001-9081(2010)06-1622-04

基于结构方向信息的图像质量评价方法

王强¹, 梁德群¹, 毕胜¹, 薄瑜²

(1. 大连海事大学 信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026; 2. 河北科技师范学院 欧美学院, 河北 秦皇岛 066004)

(dlhswq2005@sina.com)

摘要:结构相似度(SSIM)方法通过度量原图像和失真图像之间的结构相似程度,达到了比传统PSNR方法更好的图像质量评价效果。但SSIM算法本身并没有充分利用图像的结构信息,在SSIM算法的基础上进一步挖掘图像结构中包含的方向信息,提出了局部结构方向相似度(LSOS),将LSOS方法和现有的SIEExt算法相结合,提出基于结构方向信息的图像质量评价算法(SOI)。实验表明,该方法能够达到比SIEExt和SSIM方法更好的图像质量评价结果。

关键词:图像质量评价;结构信息;结构相似度;结构方向相似度;人眼视觉系统

中图分类号:TP391.41 **文献标志码:**A

Image quality assessment based on structural orientation information

WANG Qiang¹, LIANG De-qun¹, BI Sheng¹, BO Yu²

(1. School of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026, China;

2. E&A College, Hebei Normal University of Science and Technology, Qinhuangdao Hebei 066004, China)

Abstract: Compared with the traditional Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) method, the Structural Similarity (SSIM) method can achieve better image assessment by measuring the SSIM between the reference image and the distortion image, but the structural information is not completely extracted. Based on SSIM method, the orientation information was further extracted and the Local Structural Orientation Similarity (LSOS) was proposed. Then, the LSOS method was incorporated with the existing SIEExt algorithm and an image quality assessment method based on Structural Orientation Information (SOI) was presented. The experiments show that the SOI model can assess the distortion image more precisely than the SIEExt and SSIM methods.

Key words: image quality assessment; structural information; Structural Similarity (SSIM); structural orientation similarity; human visual system

0 引言

图像质量评价方法分为主观和客观两种评价方法。由于图像质量的好坏最终是由人的视觉感受来判断,所以人的主观评价是最佳的评判标准。但是通过人眼来对图像进行评价会受到人的状态、专业与否等因素的影响,不能直接应用于计算机处理系统,具有费时、费力且所得结果因人而异不稳定的缺点。客观评价方法依据一定的数学模型来计算原图像与失真图像之间的相似程度,其操作简单且易于用计算机实现。峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)和均方误差(Mean Square Error, MSE)是应用最广泛的客观评价方法,但二者只是简单地将误差求和取平均,并没有考虑人的视觉特性,因此在很多情况下所得结果与人的主观评价结果产生较大偏差。

长期以来,人们试图通过模拟人的视觉系统的方法来设计相应的客观图像质量评价方法,但是由于人的视觉系统的复杂性和人们对其认识的不足等条件的限制,该设计思想目前没有得到令人满意的效果。近年来,Wang等人^[1-2]对客观图像质量评价提出了新的算法设计思想,其认为人眼视觉的主要功能是提取场景中的结构信息,通过度量原图像和失真图像之间灰度分布结构的相似程度,提出了基于结构相似度的图像质量评价方法(Structural Similarity, SSIM)。实验表

明,SSIM算法的整体性能优于PSNR。随后出现了许多SSIM算法的改进算法,其中,杨琬等人^[3]提出针对人的感兴趣区域的图像质量评价模型,对JPEG和JPEG2000图像失真类型进行讨论。王宇庆等人^[4]主要对模糊和高斯噪声的失真类型图像进行讨论,李航等人^[5]对高斯模糊和Rayleigh衰落信道模型下的JPEG2000比特流传输误差的失真类型进行讨论,但上述算法只考虑存在单个或两个失真类型存在的情况,并没有考虑同时存在多种失真类型的情况。Chen等人^[6-7]根据图像梯度中反映的幅度和方向信息对SSIM进行改进。Wang等人^[8]对SSIM算法得到的局部评价结果进行加权来改进整幅图像的评价效果,叶盛楠等人^[9]根据人眼对图像频域不同频率成分敏感程度不同,结合SSIM算法提出了基于结构信息提取的图像质量评价算法(Structural Information Extraction, SIEExt)。对比实验表明,SIEExt算法所得结果能够更好地符合人的主观评价。SSIM算法通过度量结构失真来进行图像质量评价,但算法的实现过程并没有充分利用图像中包含的结构信息。进一步挖掘图像结构中反映出的方向信息,在SSIM算法基础上,本文通过度量原始图像和失真图像的方向相似程度得到局部结构方向相似度(Local Structural Orientation Similarity, LSOS),然后结合LSOS和SIEExt算法设计思想提出了基于结构方向信息(Structural Orientation Information, SOI)的图像质量评价方法。实验表明,该方法对

收稿日期:2009-11-30。

作者简介:王强(1982-),男,河北衡水人,博士研究生,主要研究方向:图像压缩、图像质量评价;梁德群(1940-),男,辽宁大连人,教授,博士生导师,主要研究方向:图像处理、计算机视觉、数字通信的调制;毕胜(1964-),男,辽宁沈阳人,教授,主要研究方向:图像处理、计算机视觉、模式识别;薄瑜(1982-),女,吉林榆树人,助教,主要研究方向:图像处理、图像质量评价。

单个图像失真类型和混合失真类型均能达到较好的图像质量评价结果。

1 结构相似度

设原始图像和失真图像分别为 X 和 Y , 对上述两幅图像进行分块, 并从相同位置各取局部子块 A 和 B , SSIM 算法从图像组成的结构信息出发, 将图像失真表示成 3 个因素的组合: 亮度 l 、对比度 c 和结构 s , 其计算公式分别为:

$$\begin{aligned} l(A, B) &= \frac{2\mu_A\mu_B + C_1}{\mu_A^2 + \mu_B^2 + C_1} \\ c(A, B) &= \frac{2\sigma_A\sigma_B + C_2}{\sigma_A^2 + \sigma_B^2 + C_2} \\ s(A, B) &= \frac{\sigma_{AB} + C_3}{\sigma_A\sigma_B + C_3} \end{aligned}$$

其中: μ_A 和 μ_B 表示子块 A 和 B 的均值, $C_1 = (K_1L)^2$, σ_A 和 σ_B 表示子块 A 和 B 的标准差, $C_2 = (K_2L)^2$, σ_{AB} 表示子块 A 和 B 的协方差, $C_3 = C_2/2$, $K_1 = 0.01$, $K_2 = 0.03$, $L = 255$, C_1 、 C_2 和 C_3 是为了保证分式的分母不为零而添加的常数, 则子块 A 和 B 的结构相似度可以表示为:

$$SSIM(A, B) = (l(A, B))^\alpha \cdot (c(A, B))^\beta \cdot (s(A, B))^\gamma$$

其中: α 、 β 、 γ 分别为 3 个结构度量分量的加权系数。当 $\alpha = \beta = \gamma = 1$ 时, 得到 A 和 B 的结构相似度如式(1)所示:

$$SSIM(A, B) = l(A, B) \cdot c(A, B) \cdot s(A, B) = \frac{(2\mu_A\mu_B + C_1)(2\sigma_{AB} + C_2)}{(\mu_A^2 + \mu_B^2 + C_1)(\sigma_A^2 + \sigma_B^2 + C_2)} \quad (1)$$

整幅图像的平均结构相似度表示为:

$$MSSIM(X, Y) = \sum_{i,j=1}^{Num} SSIM(A_{i,j}, B_{i,j})$$

其中 Num 为图像中包含子块的个数。大量实验表明, 相对于传统的 PSNR 和 MSE 方法, SSIM 算法所得结果能够更好地与人的主观评价相符合。但也有例外情况, 如图 1 所示, 图 1(b) 中: PSNR 算法预测值为 21.2238, SSIM 算法预测值为 0.4183, SOI 算法预测值为 0.2215。图 1(c) 中: PSNR 算法预测值为 21.2247, SSIM 算法预测值为 0.5640, SOI 算法预测值为 0.1904。图 1(b) 和 (c) 的 PSNR 预测值比较接近, SSIM 算法的评价结果是图 1(c) 的图像质量高于图 1(b), 但实际上图 1(c) 损失很多边缘、纹理等图像细节, 方块效应明显, 相对于图 1(b) 具有较差的主观评价结果。显然 SSIM 算法与人的主观评价结果并不一致。本文提出的 SOI 算法, 相对 SSIM 算法能够更好地符合人的主观评价结果。



图1 不同图像质量评价方法的性能对比

2 局部结构方向相似度

SSIM 算法除了通过灰度均值和方差以外, 主要通过线性相关系数来比较原图像和失真图像的结构相似程度, 并不能完全反映图像中灰度分布的结构信息, 因此进一步挖掘图像中的结构信息能够更加充分地描述原图像和失真图像的相似程度, 以改善现有 SSIM 的性能。图像中的边缘、纹理等结构分布是影响人眼视觉系统的主要因素, 它们不仅通过单个像素本身的灰度值反映出来, 而且通过相邻像素点的灰度相关

性体现出来, 而像素间的相关信息主要通过灰度分布结构中包含的方向信息表现出来。本文首先提取每个像素所在局部区域的灰度分布方向信息, 然后在 SSIM 的基础上, 通过度量原图像和失真图像的局部方向相似程度得到局部结构方向相似度。与 SSIM 算法相比, 能够更加充分地反映原图像和失真图像的结构相似程度。

图像局部的方向信息提取方法如下: 对于图像内坐标为 (i, j) 的任意像素点, 取其邻域为 $Neigh = \{(m, n) | |m - i| \leq Len, |n - j| \leq Len\}$, 其中, Len 是点 (i, j) 邻域长度的一半; l_θ 是过该像素点且角度为 θ 的一条直线, 该直线将邻域 $Neigh$ 分为两部分, 即 $S_{\theta 1}$ 和 $S_{\theta 2}$; 点 (i, j) 的方向信息为式(2)中的 M 取最大值时所对应的方向 θ :

$$M = \max_{\theta} |f_{S_{\theta 1}} - f_{S_{\theta 2}}| = \max_{\theta} |\langle Neigh, Q_{\theta} \rangle| \quad (2)$$

其中: $0^\circ \leq \theta \leq 179^\circ$; $f_{S_{\theta 1}} = \sum_{(i,j) \in S_{\theta 1}} x_{ij}$, $f_{S_{\theta 2}} = \sum_{(i,j) \in S_{\theta 2}} x_{ij}$ 表示像素点 (i, j) 的灰度值; Q_{θ} 为与角度 θ 对应的邻域内积模板, 当 Len 为 1 时, θ 选取 8 个方向分别为逆时针 0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° 、 225° 、 270° 、 315° , 与 8 个模板对应的邻域划分情况如图 2 所示。

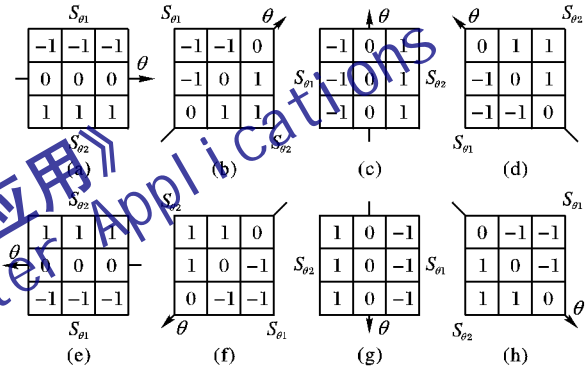


图2 邻域划分

对式(2)的分析如下: 式(2)通过分析当前像素 (i, j) 邻域内的灰度分布差异情况来得到 (i, j) 位置的灰度分布方向信息, 当该区域中存在过点 (i, j) 且方向角为 θ 的边缘时, 则方向角同为 θ 模板将使式(2)取得最大值。因此, 式(2)能够有效地反映当前像素点 (i, j) 所在边缘的方向信息。

对于原始图像和失真图像 X 和 Y , 分别取其相同位置的局部区域 A 和 B , 其包含的像素总数分别为 N , 计算 A 和 B 所有像素的方向角 θ 。设 A 和 B 具有相同方向信息的像素点个数为 S , 设常数 $C_4 = C_1 \times C_2$, 则区域 A 和 B 的方向相似程度如式(3)所示, 常数 C_4 为实验得出的经验值。

$$orien(A, B) = \frac{S + C_4}{N + C_4} \quad (3)$$

将式(3)结合 SSIM 算法的式(1)得到局部结构方向相似度如下:

$$LSOS(A, B) = l(A, B) \cdot c(A, B) \cdot s(A, B) \cdot orien(A, B)$$

则整幅图像的平均结构方向相似度表示为:

$$MLSOS(X, Y) = \sum_{i,j=1}^{Num} LSOS(A_{i,j}, B_{i,j})$$

3 基于结构方向信息的图像质量评价方法

SIEExt 算法^[9] 分析了人眼视觉系统对不同频率成分的敏感程度, 根据各个频率段分布及其能量大小将图像中的频率成分分为低频分量 (F^l)、结构信息分量 (F^s) 和次要细节分量 (F^m)。其中, 结构信息分量是形成图像基本结构信息的频率居中的部分, 该分量在人眼对图像的理解中起主要作用。次

要细节分量为图像中的高频部分,其作用是进一步对主要边缘的细节补充。SIExt 算法对各个频率分量进行失真程度评价采用的是 SSIM 算法,本文用 LSOS 算法替换 SIExt 中的 SSIM 算法,得到基于结构方向信息的图像质量评价方法 (SOI),该方法具体实现步骤如图 3 所示。

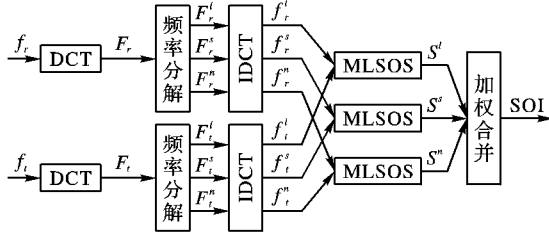


图 3 本文算法的系统结构

图 3 中 f_i 和 F_i 分别为原始图像及其离散余弦变换 (Discrete Cosine Transform, DCT) 结果; f_i^l 和 F_i^l 分别为失真图像及其 DCT 结果; s^l, s^s 和 s^h 分别为 f_i^l 与 f_i^l, f_i^s 与 f_i^s, f_i^h 与 f_i^h 在 MLSOS 意义下的相似程度。离散余弦反变换 (Inverse Discrete Cosine Transform, IDCT) 为上述三者通过系数 w^l, w^s 和 w^h 进行加权求和,得到最终 f_i 和 f_i 的相似程度。

4 实验结果及分析

本文实验数据采用美国 TEXAS 大学图像视频工程实验室的 LIVE 图像质量评价数据库^[10-11]。该库由 29 幅彩色图像经过 5 种类型的失真处理得到,这些失真模型包括: JPEG2000 压缩、JPEG 压缩、白噪声 (White noise)、高斯模糊 (Gaussian blur) 和 Rayleigh 衰落 (Fast Fading, FF) 信道模型下的 JPEG2000 比特流传输误差,共有 779 幅失真图像。该库还包含了所有图像的主观差异评分值 (DMOS),DMOS 值越小,图像主观质量越好。客观数据与主观评价分数之间的非线性关系采用文献[12]中采用的 Logistic 函数来补偿,如式(4)所示。

$$f(x) = \frac{\beta_1}{1 + \exp(\beta_2(x - \beta_3)^\beta + \beta_4)} \quad (4)$$

采用 4 个性能指标^[13]来评价算法的好坏:非线性补偿后的客观图像质量评价值和主观评分的线性相关性 (CC)、Spearman 秩相关系数 (SROCC)、均方差的平方根 (RMS) 和绝对误差均值 (MAE)。实验中,SSIM 算法的参数设置情况为^[2]: $K_1 = 0.01, K_2 = 0.03, L = 255, \alpha = \beta = \gamma = 1$ 。SIExt 和 SOI 的参数设置情况为^[9]: $\alpha = \beta = 1, \gamma = 2, C_1 = 3, C_2 = 30, C_3 = C_2/2, C_4 = C_1 \times C_2, t_e = 6, t_f = 0.03 \times \text{sqrt}(\text{Width} \times \text{Height}), w^l = 0.05, w^s = 0.85, w^h = 0.1$ 。

将本文方法与 PSNR、UQI 算法、SSIM 算法和 SIExt 算法进行性能比较。对于交叉失真数据库,从表 1 可以看出,相对 PSNR、UQI 算法、SSIM 算法和 SIExt 算法而言,本文算法的预测质量值与 DMOS 值具有较好的相关性。

结合表 1 和图 4~8 可以看出,对于 PSNR 和 UQI 算法来说,不同类型的单个失真数据点集收敛于不同的曲线,所以对于交叉失真类型,总体数据发散程度较大,得到的性能指标不理想。对于单个失真类型,SSIM 算法所得结果相对补偿曲线发散程度较小,但白噪声失真类型与其余 4 种失真类型的补偿曲线偏差较大。SIExt 就上述问题有了很大程度改善,交叉失真数据相对非线性补偿曲线发散程度较小,SOI 算法的数据发散程度较 SIExt 算法进一步减小。另外从图 6 中看出,当 SSIM 算法对图像的评价结果在 0~0.7 (即图像失真程度较大)时,其非线性补偿曲线对应的主观评价数值基本相同,这导致的结果是人眼看起来质量相同的图像,但是客观评价算

法对其图像质量评价的结果却有较大的偏差,显然这是不合理的,除此以外,所有数值点分布在整个数值分布区间并不均匀。图 4~5 的补偿曲线对上述缺点有所改善,但是点集相对非线性补偿曲线的发散程度较大。从图 7 可以看出,SIExt 算法就上述问题有了较大改善。从图 8 看出,无论是数据点集相对非线性补偿曲线的发散程度,还是客观评价结果相对主观评价的合理性,SOI 算法较其他对比算法性能更优。

表 1 不同图像质量评价算法的性能比较

评价方法	性能指标			
	CC	SROCC	RMS	MAE
PSNR	0.8240	0.8197	9.1236	7.3249
UQI ^[1]	0.8587	0.8585	8.2540	6.3154
SSIM ^[2]	0.9031	0.8999	6.9162	5.3191
SIExt ^[9]	0.9160	0.9183	6.4602	4.9366
SOI	0.9195	0.9201	6.3311	4.8799

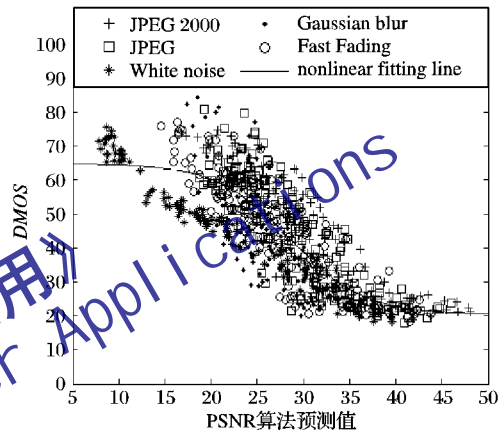


图 4 PSNR 图像质量评价结果相对 DMOS 值的散点图

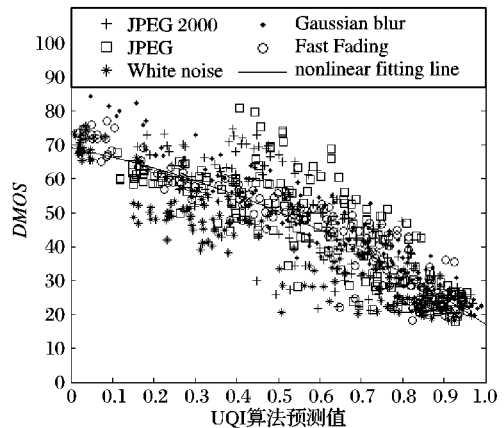


图 5 UQI 图像质量评价结果相对 DMOS 值的散点图

对于单个失真类型数据库,从表 2 和图 9~13 可以看出,SOI 算法得到的预测图像质量值与 DMOS 均保持了较好的相关性,除了 JPEG 图像库以外,SOI 值与 DMOS 值的线性相关系数均达到了 0.95 以上。

表 2 SOI 算法对不同图像失真类型的实验结果

失真类型	性能指标			
	CC	SROCC	RMS	MAE
JPEG2000	0.9532	0.9481	4.8993	3.9740
JPEG	0.9364	0.9046	5.6103	4.1493
White noise	0.9754	0.9734	3.5231	2.8309
Gaussian blur	0.9641	0.9608	4.1743	3.3603
Fast fading	0.9667	0.9627	4.2113	3.1101

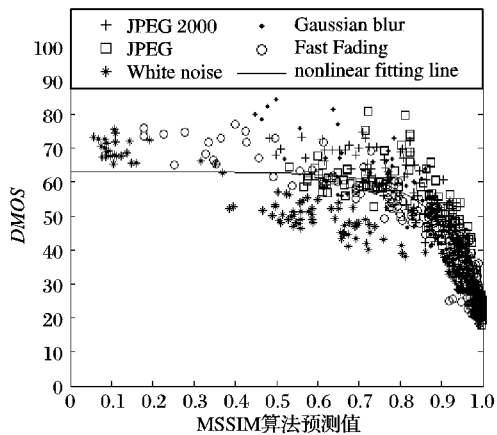


图6 SSIM 图像质量评价结果相对 DMOS 值的散点图

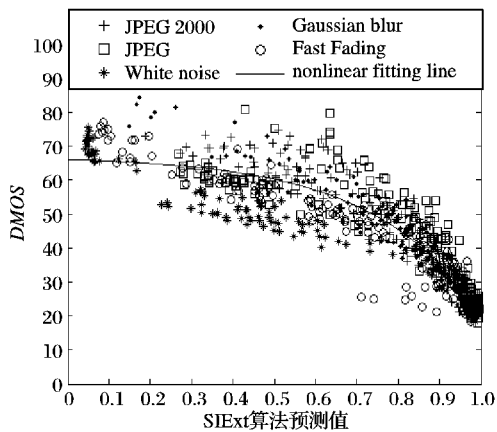


图7 SIEExt 图像质量评价结果相对 DMOS 值的散点图

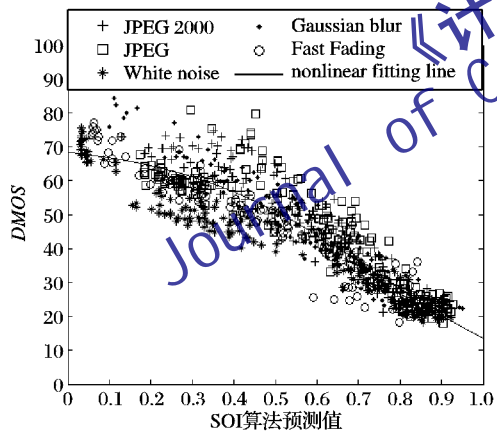


图8 SOI 图像质量评价结果相对 DMOS 值的散点图

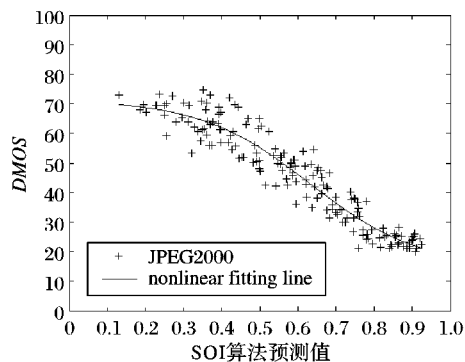


图9 SOI 算法相对 JPEG2000 单个失真图像库 DMOS 值的散点图

结构方向信息的客观图像质量评价方法(SOI)。实验结果表明,SOI 算法不仅能够对单个失真类型的图像进行较好的评价,而且对交叉失真类型的图像也能够较准确地进行质量预测。

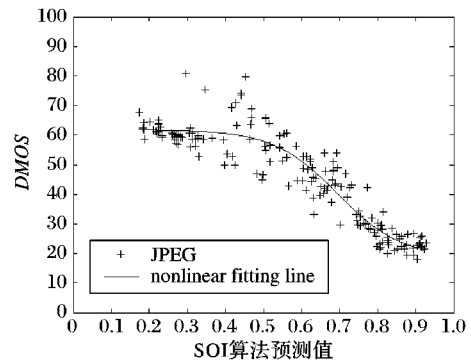


图10 SOI 算法相对 JPEG 单个失真图像库 DMOS 值的散点图

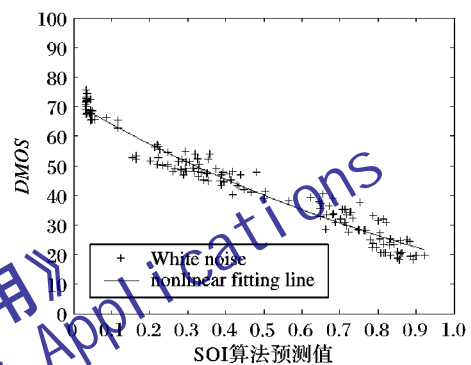


图11 SOI 算法相对白噪声单个失真图像库 DMOS 值的散点图

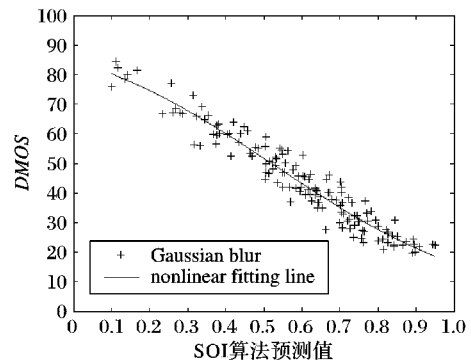


图12 SOI 算法相对高斯模糊单个失真图像库 DMOS 值的散点图

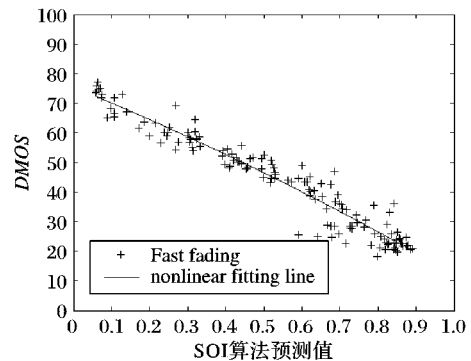


图13 SOI 算法相对 Fast Fading 单个失真图像库 DMOS 值的散点图

参考文献:

- [1] WANG ZHOU, BOVIK A C. A universal image quality index [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2002, 9(3): 81-84.
- [2] WANG ZHOU, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.

(下转第 1628 页)

5 结语

通过进一步挖掘图像子块中包含的结构信息,提出了 LSOS 的概念,并将该相似度与 SIEExt 算法相结合,提出了基于

第2步 运动搜索。

设 ref 为当前参考帧,另设两个变量 t 和 s ,且 $t = ref_Num/4, s = ref_Num\%4$;

1) 若 $0 \leq ref < t$,当前参考帧属于最接近当前帧的参考帧,使用模板0进行搜索;

2) 若 $t \leq ref < (2t + s/3)$,当前参考帧属于比较接近当前帧的参考帧,使用模板1进行搜索;

3) 若 $(2t + s/3) \leq ref < (3t + s/3 + s/2)$,当前参考帧属于偏离当前帧的参考帧,使用模板2进行搜索;

4) 若 $(3t + s/3 + s/2) \leq ref$,当前参考帧属于远离当前帧的参考帧,经过前面参考帧的运动搜索,每帧都对运动矢量进行修正,可以认为此时的运动矢量已经很接近最佳参考点,所以只对所预测的中心点进行计算。

第3步 判断是否已到最后一个参考帧。若是,结束算法;若不是,返回第1步。

3 实验结果与分析

为了验证新算法的性能,使用 H. 264/AVC 参考模型 JM10.2 在相同条件下和本文算法进行了计算机仿真对比实验。实验中采用 2 个 QCIF 格式的视频序列和 4 个 CIF 格式的视频序列。主要的编码参数设置如下:搜索范围为 16,5 个参考帧,帧率为 30 fps, QP 值为 28,编码结构为 IPPP,对每一个序列编码帧数为前 50 帧,CAVLC 熵编码,Hadamard 变换,率失真优化(RDO)。实验结果如表 2 所示,其中 PSNR 为 Y 分量。

从表 2 可以看出,与参考模型相比,本文所提出的算法可平均减少 79.84% 的运动搜索的点数,从而大幅度减少运动搜索时间,提高编码速度。同时 PSNR 平均只下降了 0.07 dB。本文提出的快速搜索算法有以下两个特点。

1) 本文充分利用了最佳参考帧位置的统计特性,将参考帧分成 4 种类型,对不同类型的参考帧使用不同的搜索模板,从而有效地减少运动搜索的点数,在图像质量和比特率变化很小的情况下,可以较大幅度提高编码速度。

2) 本文的多参考帧运动搜索的基本搜索模式采用菱形搜索模板,其搜索方式相对简单,易于硬件实现,而参考模型搜索模式较多,判断复杂,硬件实现较困难。

表2 本文算法与参考模型的实验结果比较

格式	序列	搜索点数			PSNR/dB		
		UMH	本文算法	变化率/%	UMH	本文算法	变化量
QCIF	Coastguard	38 044 318	6 782 469	-81.65	34.02	33.94	-0.08
	Silent	17 559 837	4 239 501	-65.19	35.95	35.92	-0.03
CIF	Bus	162 673 808	32 120 036	-79.82	34.86	34.76	-0.10
	Coastguard	171 476 941	29 945 481	-82.80	34.35	34.31	-0.04
	Silent	69 504 474	17 524 088	-64.18	35.96	35.92	-0.04
	Stefan	122 597 329	26 662 909	-76.64	35.65	35.52	-0.13
平均值		96 976 118	19 545 747	-79.84	—	—	-0.07

注:平均值只保留两位小数(四舍五入)。

4 结语

本文根据最佳参考帧位置的统计特性,提出了一个低复杂度的快速多参考帧搜索算法。实验结果表明,本文提出的算法在保持图像质量和码率的前提下平均可以节省接近 80% 的搜索点数,大幅度提高编码速度,这对 H. 264 编码的实时和硬件实现很有利。

参考文献:

- [1] WIEGAND T, SULLIVAN G J, LUTHRA A. Draft ITU-T recommendation and final draft international standard of joint video specification. Part 2: [S. n.], 2003.
- [2] Joint Video Team (JVT) reference software[EB/OL]. [2009-08-25]. <http://bs.hhi.de/~suehring/tml/download/>.
- [3] 黄军浩,毕笃彦,许悦雷,等.基于 H. 264 的多参考帧运动估计快速算法[J].计算机工程,2006,32(12):238-290.
- [4] ZHU SHAN, MA KAI-KUANG. A new diamond search algorithm for fast block-matching motion estimation [J]. ICICS IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(2): 287-290.
- [5] ZHANG SHUFANG, WANG YANLING, KANG JIN-HUA, et al. A new approach to fast multiple reference frame motion estimation for H. 264 [C]// ISCSCT '08: International Symposium on Computer Science and Computational Technology. Washington, DC: IEEE Press, 2008, 2: 254-258.
- [6] SU Y-P, SUN M-T. Fast multiple reference frame motion estimation for H. 264/AVC[J]. IEEE Transactions on Circuits and System for Video Technology, 2006, 16(3): 447-452.

(上接第 1625 页)

- [3] 杨琬,吴乐华,李淑云,等.基于感兴趣区域的图像质量评价方法[J].计算机应用,2008,28(5):1310-1312.
- [4] 王宇庆,刘维亚,王勇.一种基于局部方差和结构相似度的图像质量评价方法[J].光子·激光,2008,19(11):1546-1553.
- [5] 李航,路羊,崔慧娟,等.基于频域的结构相似度的图像质量评价方法[J].清华大学学报:自然科学版,2009,49(4):559-562.
- [6] CHEN GUAN-HAO, YANG CHUN-LING, PO LAI-MAN, et al. Edge-based structural similarity for image quality assessment [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Washington, DC: IEEE, 2006: 14-19.
- [7] CHEN GUAN-HAO, YANG CHUN-LING, XIE SHENG-LI. Gradient-based structural similarity for image quality assessment [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing. Washington, DC: IEEE, 2006: 2929-2932.
- [8] WANG ZHOU, SHANG XIM-LI. Spatial pooling strategies for perceptual image quality assessment [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing. Washington, DC: IEEE, 2006: 2945-2948.
- [9] 叶盛楠,苏开娜,肖创柏,等.基于结构信息提取的图像质量评价[J].电子学报,2008,36(5):856-861.
- [10] SHEIKH H R, WANG ZHOU, CORMACK L, et al. LIVE Image Quality Assessment Database Release 2 [EB/OL]. [2010-05-10]. <http://live.ece.utexas.edu/research/quality>.
- [11] SHEIKH H R, SABIR M F, BOVIK A C. A statistical evaluation of recent full reference image quality assessment algorithms [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(11): 3440-3451.
- [12] ROUSE D M, HEMAMI S S. Understanding and simplifying the structural similarity metric [C]// Proceedings of 15th IEEE International Conference on Image Processing. Washington, DC: IEEE, 2008: 1188-1191.
- [13] Video Quality Experts Group. Final report from the video quality experts group on the validation of objective models of video quality assessment [EB/OL]. [2000-03-05]. <http://www.vqeg.org/>.