

基于 Canny 边缘检测的 Catmull-Rom 图像放大*

陈利平, 刘文华

(湖南工学院 计算机与信息科学系, 湖南 衡阳 421002)

摘要: 为了较好地保持图像的边缘信息, 提出一种基于 Canny 边缘检测的 Catmull-Rom 图像插值放大算法。首先用 Canny 算子检测出原图像的边缘; 然后, 根据插值目标图像未知像素点时, 目标图像与原图像的相似性, 如果未知像素点为边缘点, 则调整 Catmull-Rom 的切向和切向长度。实验结果表明, 该算法比传统算法的边缘更加清晰, 保持了边缘的尖锐特征, 减少了锯齿, 提高了图像的质量。

关键词: Canny 算子; Catmull-Rom 样条; 边缘保持; 图像放大

中图分类号: TP393.04 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2012)10-3993-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.10.105

Catmull-Rom image expansion based on Canny edge detection

CHEN Li-ping, LIU Wen-hua

(Computer & Information Science Dept. Hunan Technology College, Hengyang Hunan 421002, China)

Abstract: In order to better maintain the image of the edge information, this paper presented a Catmull-Rom enlarge image interpolation algorithm based on Canny edge detection. The detected low-resolution images of the edge with the Canny operator, and interpolated unknown point according to the similarity of source images and destination images, then modified Catmull-Rom's tangent direction and length if the interpolation point was the edge point. Experimental results show that the algorithm more clear edge than the standard traditional algorithm, it can keep the edge sharp features, reduce aliasing and improve image quality.

Key words: Canny operator; Catmull-Rom spline; edge retention; image interpolation

0 引言

经典的插值方法有最近邻插值、双线性插值^[1]、双三次插值^[2]、样条插值、Catmull-Rom 样条插值^[3]与 B 样条插值等。这些方法都是不基于边缘的图像插值放大方法, 它们不需要图像边缘的信息, 而是根据每个像素的位置及与相邻像素值的全局相关不变性来估计的。因此, 放大的图像会退化图像的高频部分, 使图像细节变得模糊, 丢失重要的边缘特征, 同时也存在块和锯齿现象。

研究表明, 人眼对于图像边缘部分特别敏感。因此, 在放大图像的同时, 消除插值图像边缘细节模糊是提高图像整体视觉效果的关键。很多学者提出不同的基于边缘的放大方法^[4-8]是根据原图的边缘来放大图像或者进行插值, 进而改进图像的主观质量。文献[4]对图像边缘的梯度变化进行研究, 并将梯度变化信息附加在高分辨率图像, 该方法虽然能够在一定程度上提高插值图像的质量, 但是受图像噪声的影响比较严重。文献[5]用边缘自适应方法插值, 对于去除图像的锯齿效果比较有效, 但对小面积区域进行了重复处理。文献[6]提出一种基于局域协方差的边缘插值方法, 通过保持低分辨图像的局部几何特征来提高插值图像质量, 但计算量大、运行速度慢。文献[7]在文献[5]的基础上提出了一种改进方法 iNEDI(improved new edge directed interpolation), 可以获得比 NEDI 更好的质量效果, 缺点还是计算量太大。文献[8]提出的 ICBI(iterative curvature based interpolation)方法, 首先沿二次倒数较低的

方向插值, 然后用迭代精化的方法修改插值的像素值来最小化误差; 该方法插值提高了图像质量, 但计算量大。

本文提出了一种基于 Canny 边缘检测的 Catmull-Rom 图像放大算法。算法分为三步: a) 用 Canny 算子检测原图像的边缘; b) 将原图像赋值给目标图像部分像素点; c) 若待插值点为边缘点, 则调整 Catmull-Rom 的切向和切向长度来计算插值点。实验结果表明, 该算法比标准的 Catmull-Rom 算法的边缘更加清晰, 保持了图像边缘的尖锐特征, 减少了插值误差, 提高了插值图像的质量。

1 Canny 边缘检测

1.1 高斯滤波平滑图像

Canny^[9]算子首先选用合适的一维高斯函数, 分别按行和列对图像 $P(x, y)$ 进行平滑去噪。高斯函数为

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

其中: σ 为高斯曲线标准差, 控制平滑程度。

1.2 微分算子计算梯度和方向

用微分算子 $(-1, 0, 1)$ 和 $(-1, 0, 1)'$ 对高斯滤波后的图像计算方向导数, 然后用二阶范数计算梯度。

1.3 对梯度幅值进行非极大值抑制

为了提取单像素宽边缘, 必须细化梯度幅值图。在梯度幅值图像中, 极大值所在位置附近可能产生屋脊带, 只有细化这

收稿日期: 2012-01-06; 修回日期: 2012-02-22 基金项目: 2011 年湖南省科技计划资助项目(2011GK3150)

作者简介: 陈利平(1966-), 女, 湖南长沙人, 副教授, 硕士, 主要研究方向为计算机视觉、计算机图形图像处理(chenliping@mail.zjucadcg.cn); 刘文华(1980-), 男, 讲师, 硕士, 主要研究方向为计算机网络、计算机视觉。

些屋脊带才能精确确定边缘位置,保留幅值局部变化最大的点,这一过程就是非极大值抑制。

1.4 用双阈值算法检测和连接边缘

对经过非极大值抑制和梯度直方图分类的子图像分别使用高、低两个阈值,将梯度小于阈值的像素灰度置为 0,分割得到两个阈值边缘图像,用双阈值算法检测和连接边缘。

2 Catmull-Rom 样条切向调整

2.1 Catmull-Rom 样条

Catmull-Rom 样条^[10]是三次插值样条中的一种。如图 1 所示, P_i 点的切向 D_i 是由 P_i 的前一点 P_{i-1} 与下一点 P_{i+1} 来计算,即为 $D_i = \frac{1}{2}(P_{i+1} - P_{i-1})$ 。Catmull-Rom 曲线方程为

$$P(s) = s \cdot h \cdot C = \begin{bmatrix} s^3 & s^2 & s & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 & -2 & 1 & 1 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_i \\ P_{i+1} \\ D_i \\ D_{i+1} \end{bmatrix}$$

$s \in [0.0, 1.0]$ (2)

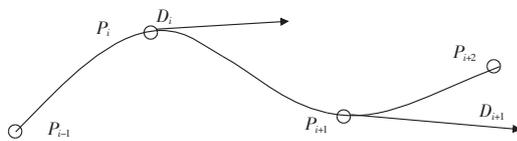


图 1 Catmull-Rom 曲线示意图

Catmull-Rom 样条具有 C^1 连续,局部控制和插值,但不能在控制点的凸包内。

2.2 Catmull-Rom 样条切向调整

由于 Catmull-Rom 样条具有 C^1 连续,因此它表示光滑的曲线。实际中有时需要夸大曲线,曲线需要张紧,甚至几乎线性,此时不需要曲线 C^1 连续。文献[11]中描述了三个参数(张力因子、连续性因子和偏差因子)调节动画中的关键帧的位置,从而使 Catmull-Rom 在表示现实方面具有高度的灵活性。

在连续的曲线中引入张力因子、连续性因子来控制曲线的张紧度和不连续性。假设 t 为张力因子, c 表示连续性因子,源切向矢量 DS_i 与目标切向矢量 DD_i 是不同的,分别用式(3)(4)来表示。

$$DS_i = (1-t)(1-c) \cdot (P_i - P_{i-1})/2 + (1-t)(1+c) \cdot (P_{i+1} - P_i)/2$$

(3)

$$DD_i = (1-t)(1+c) \cdot (P_i - P_{i-1})/2 + (1-t)(1-c) \cdot (P_{i+1} - P_i)/2$$

(4)

当 P_i 与 P_{i+1} 的差超过最大阈值时(即 $|P_i - P_{i+1}| > \text{threshold}$),如图 4(a)~(d)所示,在插值这些点时,调整连续性因子($c=1$)和张力因子($t=-1$),使 P_i 与 P_{i+1} 点的切向为水平, D_i 与 D_{i+1} 的切向长度为 $(P_{i+1} - P_i)$ 。其他 P_i 与 P_{i+1} 的差小于一定阈值时,则可通过调整张力因子($t=0.3$)来张紧,减少过度光滑,如图 4(e)所示。切向调整结果如图 2 所示。

3 基于 Canny 算子检测的自适应 Catmull-Rom 插值算法

在以上论述的基础上,本文提出了基于 Canny 算子检测的

自适应 Catmull-Rom 插值算法。

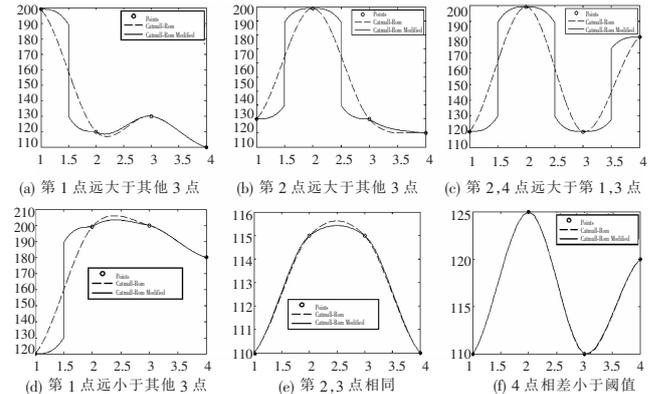


图 2 切向矢量调整图

3.1 扩充原图像

为了实现对图像边界区域的插值运算,特对原图像的边界进行插值节点的补充,图像向左扩充一列,向右扩充二列,即矩阵 $P = \{P_{(i,j)}; 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n\}$ 扩充为 $P_2 = \{P_{(i,j)}; 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n+3\}$;向上扩充一行,向下扩充二行,即矩阵 $P_2 = \{P_{(i,j)}; 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n+3\}$ 扩充为 $P_2 = \{P_{(i,j)}; 1 \leq i \leq m+3, 1 \leq j \leq n+3\}$ 。

3.2 Canny 算子检测边缘

首先用一维高斯函数(σ 为图像宽度的 0.2%),分别按行和列对扩充图像 $P(i, j)$ 进行平滑去噪。然后用微分算子 $(-1, 0, 1)$ 和 $(-1, 0, 1)'$ 计算梯度和方向。接着对梯度幅值进行非极大值抑制。最后用累计直方图计算图像的两个阈值,大于高阈值的一定是边缘;小于低阈值的一定不是边缘;若介于两个阈值之间,则检测该像素的邻接像素是否有超过高阈值的边缘像素(若有,则它是边缘,否则不是),判定为边缘点的像素组成的图像组成原图像的边缘图 $C = \{C(i, j); 1 \leq i \leq m+3, 1 \leq j \leq n+3\}$ 。

3.3 简单映射

假设输入图像是一 $m \times n$ 的数字图像, $P_{(i,j)}$ ($1 \leq i \leq m; 1 \leq j \leq n$) 表示输入图像中第 i 行、第 j 列像素的灰度值,数字图像在水平与垂直方向的伸缩比分别为 S_i 倍与 S_j 倍, $Z(l, k)$ 表示目标图像中第 l 行、第 k 列像素的灰度值,则目标图像部分相似根据式(5)映射 $E: P \rightarrow Z$ 。如图 3 所示。

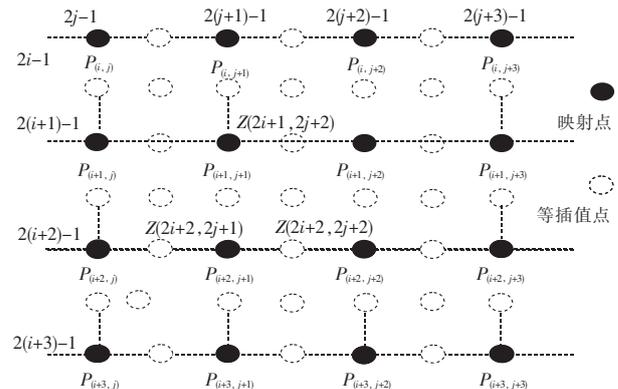


图 3 原图像 P 像素映射到目标图像 Z

$$E(P_{(i,j)}) = Z(S_i x(i-1) + 1, S_j x(j-1) + 1) \quad i = 1 - m, j = 1 - n \quad (5)$$

3.4 插值未知像素点

原图像和目标图像之间对应位置处有边缘的相似性,即如

果该点为原图像中的边缘点,则它也是目标图像中的边缘点。若 $C_{(i,j+1)}$ 不等于 1,则 $P_{(i,j+1)}$ 不是边缘点, $P_{(i,j+1)}$ 与 $P_{(i,j+2)}$ 的切矢分别为它们的前一点与后一点之差,即 $D_{(i,j+1)} = (P_{(i,j+2)} - P_{(i,j)})/2$ 、 $D_{(i,j+2)} = (P_{(i,j+3)} - P_{(i,j+1)})/2$;若 $C_{(i,j+1)}$ 等于 1,则根据下面的方法判断边缘点的类型,调整插值点的切向方向和切向长度,然后再计算插值点。在计算 Catmull-Rom 插值时,选取 16 个点 ($P_{(i+k,j+l)}$; $1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n, 1 \leq k \leq 4, 1 \leq l \leq 4$) 先计算水平方向的插值,然后再计算垂直方向的插值。

a) $P_{(i+1,j+1)}$ 为边缘点,且边缘为 135° 边,若条件

$$|P_{(i+1,j+1)} - P_{(i+2,j+2)}| > T$$

$$|P_{(i+1,j+1)} - P_{(i+2,j+2)}| \gg |P_{(i+1,j+2)} - P_{(i+2,j+2)}|$$

成立,则将 $D_{(i+1,j+1)}$ 、 $D_{(i+1,j+2)}$ 的切向为水平, $D_{(i+1,j+2)} = (P_{(i+1,j+2)} - P_{(i+1,j+1)})$, $D_{(i+1,j+2)} = (P_{(i+2,j+1)} - P_{(i+1,j+1)})$, $D_{(i+1,j+1)} = 0$ 。

b) $P_{(i+1,j+1)}$ 为边缘点,且边缘为 45° 边,若条件

$$|P_{(i+1,j+2)} - P_{(i+2,j+1)}| > T_2$$

$$|P_{(i+1,j+2)} - P_{(i+2,j+1)}| \gg |P_{(i+1,j+1)} - P_{(i+2,j+2)}|$$

成立,则将 $D_{(i+1,j+1)}$ 、 $D_{(i+1,j+2)}$ 的切向为水平, $D_{(i+1,j+2)} = (P_{(i+1,j+2)} - P_{(i+1,j+1)})$, $D_{(i+1,j+1)} = 0$ 。

c) $P_{(i+1,j+1)}$ 为边缘点,且边缘为 0° 边,若条件

$$|P_{(i+1,j+1)} - P_{(i+2,j+2)}| > T_2$$

$$|P_{(i+1,j+2)} - P_{(i+2,j+1)}| > T_2$$

$$(P_{(i+1,j+1)} - P_{(i+2,j+2)}) \times (P_{(i+1,j+2)} - P_{(i+2,j+1)}) > 0$$

成立,则将 $D_{(i+1,j+1)}$ 、 $D_{(i+2,j+1)}$ 的切向为水平, $D_{(i+2,j+1)} = (P_{(i+2,j+1)} - P_{(i+1,j+1)})$, $D_{(i+1,j+1)} = 0$ 。

d) $P_{(i+1,j+1)}$ 为边缘点,且边缘为 90° 边,若条件

$$|P_{(i+1,j+1)} - P_{(i+2,j+2)}| > T_2$$

$$|P_{(i+1,j+2)} - P_{(i+2,j+1)}| > T_2$$

$$(P_{(i+1,j+1)} - P_{(i+2,j+2)}) \times (P_{(i+1,j+2)} - P_{(i+2,j+1)}) < 0$$

成立,则将 $D_{(i+1,j+1)}$ 、 $D_{(i+1,j+2)}$ 的切向为水平, $D_{(i+1,j+2)} = (P_{(i+1,j+2)} - P_{(i+1,j+1)})$, $D_{(i+1,j+1)} = 0$ 。

4 实验结果与分析

第 3 章算法中描述的图像为灰度图像,而对彩色图像的放大,本文是将图像从 RGB 空间转换到 YUV 空间,然后对 Y 采用第 3 章算法,对 U、V 分量采用双线性插值算法,实验结果表明这种方式减少了计算成本,而且避免了色彩瑕疵。

本文在 Intel® Core™ 2 Duo CPU E4600 2.4 GHz 处理器和 2 GB 内存的 PC 机上用 MATLAB 2009 实现了本文算法,并采用如图 4 所示的 8 幅图像作为测试图像。

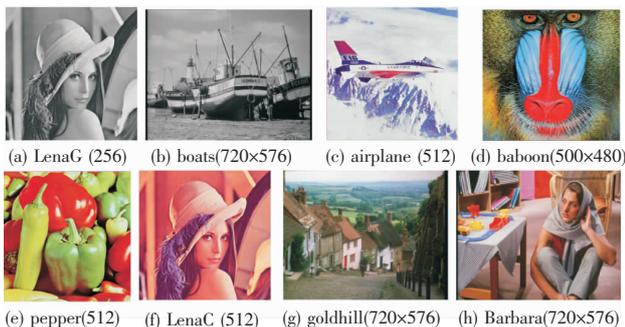


图 4 8 幅测试图像

表 1、2 为分别为图 4 中的图像缩小 1 倍后,再分别用双线性、双三次、Catmull-Rom、ICBI、iNEDI 和本文算法放大 1 倍的

PSNR 值和 MSSIM 值。由表 1、2 知,本文算法所得到图像的 PSNR 值和 MSSIM 值均优于双线性、双三次和 Catmull-Rom,与 ICBI、iNEDI 算法相比也有所提高。

表 1 各种算法的 PSNR 值/dB

图像	算法					
	bilinear	bicubic	Catmull-Rom	ICBI	iNEDI	本文算法
LenaG	25.1244	27.5113	27.5145	27.5278	27.3510	27.7277
boats	29.0191	29.4943	29.5068	29.3372	29.1356	29.7037
airplane	25.5127	28.6613	28.6044	28.5680	28.2930	28.9096
baboon	21.3690	21.7006	21.6558	21.6667	21.5623	21.88471
pepper	27.6076	29.0046	29.0080	29.0216	28.8705	29.1289
goldhill	29.3670	29.5981	29.5913	29.5660	29.2748	29.8392
LenaC	27.7171	29.8782	29.8871	29.8941	29.7157	30.1617
Barbara	24.8648	25.0219	25.0219	24.9393	24.7240	25.2551

表 2 各种算法的 SSIM 值

图像	算法					
	bilinear	bicubic	Catmull-Rom	ICBI	iNEDI	本文算法
LenaG	0.8625	0.8764	0.8735	0.8763	0.8707	0.8793
boats	0.9631	0.9616	0.9636	0.9613	0.9593	0.9669
airplane	0.9560	0.9693	0.9709	0.9692	0.9677	0.9747
baboon	0.8823	0.8951	0.8937	0.8896	0.8847	0.9073
pepper	0.9633	0.9674	0.9686	0.9670	0.9658	0.9709
goldhill	0.9472	0.9478	0.9492	0.9460	0.9434	0.9547
LenaC	0.9509	0.9589	0.9589	0.9564	0.9546	0.9622
Barbara	0.9163	0.9205	0.9205	0.9188	0.9144	0.9296

图 5 为各种不同算法的放大效果,(a) 为输入原图,(b) ~ (g) 分别为相关算法对原图像放大 2 倍后的效果图。显然,双线性、双三次和 Catmull-Rom 均存在较为明显的边缘模糊现象;而本文算法与 ICBI、iNEDI 算法相比图像边缘比较清晰,具有较好的视觉效果。

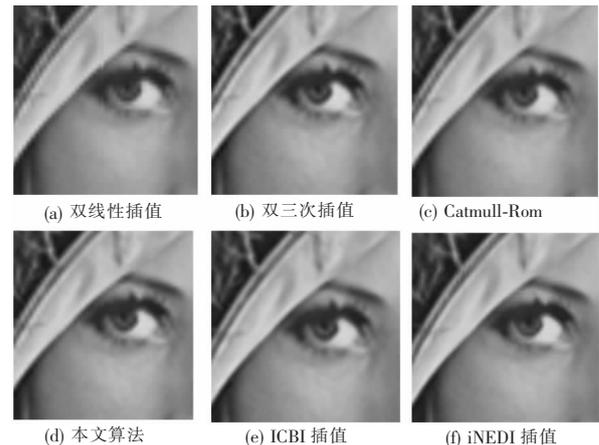


图 5 Lena 局部放大 2x2 结果对比

为了比较上述几种插值方法的处理速度,并对图像采样过程中的插值时间进行了测试,结果列于表 3。其中,双线性的计算时间最少,本文算法、双三次和 Catmull-Rom 差不多,iNEDI 插值的计算时间最多,约为双三次的 200 倍。

表 3 原图像放大的 CPU 时间 /s

图像	算法					
	bilinear	bicubic	Catmull-Rom	ICBI	iNEDI	本文算法
LenaG	0.218	2.012	1.997	30.483	274.562	2.215
boats	1.342	12.870	12.589	220.663	1987.253	13.478
airplane	2.824	26.739	26.551	444.525	2664.184	21.513
baboon	2.574	24.445	24.213	405.382	2427.035	19.797
pepper	2.792	26.895	26.582	444.011	2664.497	21.403
goldhill	4.259	42.276	42.423	710.258	4271.529	33.899
LenaC	2.792	26.739	26.551	439.756	2661.389	21.399
Barbara	4.212	42.261	42.401	709.123	4270.102	33.891

5 结束语

本文提出了一种基于 Canny 边缘检测的自适应 Catmull-Rom 图像放大方法。在 Canny 算子检测原图像的基础上,判断目标图像中未知像素点的类型;若未知点为边缘点,则判断边缘点类型;根据边缘点类型调整 Catmull-Rom 样条的切向方向和切向大小。本文算法很大程度上消除了传统插值方法在边缘的模糊和锯齿现象,有效地降低了插值误差,保持了边缘的尖锐特征,提高了插值图像质量。实验结果表明,本文算法在 PSNR 和 MSSIM 上优于其他算法,在视觉效果上也达到了 ICBI 和 iNEDI 的效果,而计算时间只是它们的 1/60。

但本文算法也有待改进,如本文只考虑了 0° 、 45° 、 90° 、 135° 边,还可以考虑其他角度的边;以及采用半像素精度,进一步提高插值后图像的视觉效果。

参考文献:

- [1] BLU T, THÉVENAZ P, UNSER M. Linear interpolation revitalized [J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2004, 13(5):710-719.
- [2] KEYS R G. Cubic convolution interpolation for digital image processing[J]. *IEEE Trans on Acoustics, Speech, Signal Processing*, 1981, 29(6):1153-1160.
- [3] LEHMANN T M, GONNER C, SPITZER K. B-spline interpolation in medical image processing[J]. *IEEE Trans on Medical Imaging*, 2001, 20(7):660-665.
- [4] SUN Jian, XU Z B, SHUM H-Y. Image super-resolution using gradient profile prior [C]//Proc of CVPR. USA: IEEE Computer Society, 2008.
- [5] BATTIATO S, GALLO G, STANCO F. A locally adaptive zooming algorithm for digital images[J]. *Image and Vision Computing*, 2002, 20(11):805-812.
- [6] LI X, ORCHARD M T. New edge-directed interpolation[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2001, 10(10):1521-1527.
- [7] ASUNI N, GIACHETTI A. Accuracy improvements and artifacts removal in edge based image interpolation [C]//Proc of the 3rd International Conference on Computer Vision Theory and Applications. 2008:58-65.
- [8] GIACHETTI A, ASUNI N. Fast artifacts-free image interpolation [C]//Proc of SIGGRAPH. Leeds, UK: BMVC, 2008:123-132.
- [9] 郑南宁. 机器视觉与模式识别[M]. 北京:国防工业出版社, 1998: 66-69.
- [10] Introduction to Catmull-Rom splines [EB/OL]. <http://www.mvps.org>.
- [11] KOCHANEK D H U, BARTELS R H. Interpolating splines with local tension, continuity, and bias control [J]. *Computer Graphics*, 1984, 18(3):33-41.
- [12] WANG Zhou, BOVIK A C. Mean squared error; love it or leave it? [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2009, 26(1):98-117.
- [13] WANG Zhou, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment; from error visibility to structural similarity[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2004, 13(4):600-612.