

基于结构相似度的全景相机立体像对图像质量评价

高露露^{1,2} 刘建军^{2,*} 任鑫² 李春来²

¹中国科学院大学, 北京 100049

²中国科学院国家天文台, 中国科学院月球与深空探测重点实验室, 北京 100012

摘要 从嫦娥三号全景相机的特点(双目相机)出发,提出了一种针对图像像对质量进行评价的方法,即结构相似度(SSIM)的评价方法。在分析了嫦娥三号全景相机成像原理以及以往采用的评价因子的基础上,运用此方法对全景相机所获得的图像像对进行了质量评价。该评价因子能够很好地适用于嫦娥三号全景相机所获得图像像对的质量评价,并且优于常用的一般评价因子。实验表明此评价方法在像对质量评价上具有一定的优势。为后续全景相机图像进行立体图像匹配提供参考。

关键词 全景相机; 图像质量评价; 立体像对; 结构相似度

中图分类号 V19 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.071004

Image Quality Evaluation of Panoramic Camera Steropair based on Structural Similarity

Gao Lulu^{1,2} Liu Jianjun² Ren Xin² Li Chunlai²

¹University of Chinese academy of Sciences, Beijing 100049, China

²Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

Abstract Aiming at the characteristics of the ChangE' 3 panoramic camera (binocular camera), an application of image quality evaluation method based on the structural similarity (SSIM) is proposed. After analyzing the ChangE' 3 panoramic camera imaging principle and the traditional evaluation factors, the method is used for the quality evaluation of image pairs obtained by the panoramic camera. The evaluation factors can be applied to ChangE' 3 evaluation of panoramic camera image pairs, and the method is superior to the common evaluation factors. Experiments show that this evaluation method as the quality evaluation factor is better than ever before, and it can apply in the assessment of stereo image matching subsequently.

Key words panorama camera; image quality assessment; stereo pair; structural similarity

OCIS codes 100.2960; 110.3000; 040.1490

1 引言

近年来,由于遥感技术的发展,人们获得大量的图像数据,在此基础上发展起来的图像质量评价成为研究热点。宏观上,图像质量评价分为主观评价和客观评价两种^[1]。主观评价以人为主体,这在很大程度上限制了其发展,不仅费时费力,而且由于评价的主体不一样,往往不能达到理想的评价结果,因此没有得到很好的发展。客观评价方法有很成熟的评价因子。例如早期的峰值信噪比(PSNR)、均方误差(MSE)等,它们因其计算简单、物理意义明显而得到广泛的应用,但是由于它们在主、客观统一上没有达到很好的匹配效果,所以局限性很大。因此,在此基础上发展了一系列从人眼视觉角度考虑的图像质量评价的客观算法。然而图像质量客观评价算法也是层出不穷,典型的有基于人眼视觉系统(HVS)的图像质量评价模型^[2,3]和基

收稿日期: 2014-03-10; 收到修改稿日期: 2014-03-15; 网络出版日期: 2014-06-23

基金项目: 国家自然科学基金(41371414, 11273037)

作者简介: 高露露(1988—),女,硕士研究生,主要从事图像处理、图像质量评价等方面的研究。E-mail: gaoll@bao.ac.cn

导师简介: 李春来(1965—),男,研究员,主要从事月球与深空探测、陨石学、行星遥感等方面的研究。

E-mail: licl@nao.cas.cn

* 通信联系人。E-mail: liujj@nao.cas.cn

于结构相似度(SSIM)的图像质量评价方法^[4]。其中基于结构相似度的图像评价方法得到了更为广泛的发展。

Wang等^[5]在对图像质量研究多年的基础上,提出了基于结构相似度(SSIM)的图像质量评价理论。该理论认为:人眼视觉的主要功能是高度自适应地从图像中提取结构化信息。因此对图像结构失真程度的度量是对图像视觉质量的最好近似。近年来结构相似性理论受到了学者更多的重视,得到了进一步的研究。例如有关学者研究了基于频域的结构相似度的评价方法^[6],将SSIM的应用拓展到了频域,是SSIM的一种典型拓展应用。也有学者将这一方法应用到了彩色图像融合的质量评价中^[7]。此外,曾凯等^[8]利用结构相似性对光电成像干扰图像进行评价。于彤等^[9]则在结构相似度的基础上提出了多尺度边缘结构相似性的图像质量评价方法,将边缘信息和图形其他信息分别进行处理,从而得到了较好的主客观统一性。谢小甫等^[10]和Zhang等^[11]将结构相似度的方法应用到无参考图像质量评价。可见结构相似度这一图像质量评价方法的强大生命力。

本文将探讨基于结构相似度的图像质量评价方法引入到嫦娥三号全景相机图像质量评价的可行性和合理性,对全景相机在不同视角同时拍摄的两幅立体像对的图像质量进行评价,为后续用全景相机图像进行立体图像匹配提供参考。这将是一个非常有意义的应用拓展。

2 全景相机成像原理

CE-3任务的月球探测器由着陆器和巡视器组成,对着陆区开展就位探测和巡视勘察。巡视器上配置了两台全景相机,获取巡视区月表的三维光学影像,用于巡视区地形地貌研究、巡视区撞击坑调查与研究及巡视区月球地质构造解析和综合研究等。

巡视器上的全景相机由相机A和相机B组成,共同安装在巡视器桅杆上,两台相机光轴分别内扣 1° ,二者的相对位置需精确测定。每台相机均由光学系统、机械系统、电子学以及热控等几部分组成。

全景相机是一套“双眼”光学仪器,两台相机共同安装在巡视器桅杆上,投影中心之间的距离定义为基线长度,类似于人眼的眼基线。它利用人眼的双目立体成像原理(见图1),以二维平面图像的形式获取、产生和传输一个场景。一次获取的左、右相机图像对构成一个立体像对,通过在立体像对上量取同一个目标的名像点坐标,计算视差信息,由此可以恢复出该目标的深度或距离信息。

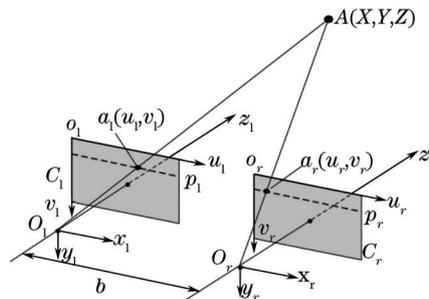


图1 CE-3全景相机立体成像原理图

Fig.1 Principle diagram of the stereo imaging by panorama camera

3 常用图像质量评价指标

在以往相机的图像质量评价中,主要是应用了灰度均值和方差、信噪比、信息熵、清晰度和边缘强度等客观评价因子^[12]。

3.1 灰度均值和方差

灰度均值是图像中所有像元的灰度值之和与像元数的比值,表达图像的整体辐射状况。计算公式为:

$$\mu = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n f(i, j), \quad (1)$$

灰度方差反映了图像灰度的层次信息,计算公式为:

$$\sigma^2 = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n [f(i,j) - \mu]^2, \quad (2)$$

式中 m, n 为图像的高度和宽度, $f(i,j)$ 为图像上 (i,j) 点的灰度值。

灰度均值越大说明图像所接收的光能越大, 越能清楚地显示出景物信息, 图像质量越好。图像的方差越大, 说明图像灰度层次较为丰富, 图像质量较好。

3.2 信息熵

熵是信息论中非常重要的概念, 代表了事物的不确定程度, 信息的不确定程度称为信息熵。熵是图像所具有的信息量的度量, 反映图像包含地物信息详细程度的指标。计算公式如下:

$$f = - \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} p(i,j) \log p(i,j). \quad (3)$$

从概率论的观点看, 信息容量的概念具有宏观统计的性质。熵越大, 图像纹理的复杂度越高, 意味着图像信息量越大, 图像质量越好。

3.3 清晰度

清晰度是衡量数字图像质量优劣的一个重要指标, 可采用梯度函数衡量。梯度是指图像中像素值之间的差异。能量梯度函数用相邻点的差分计算一个点的梯度值^[13]。根据能量梯度函数建立的图像清晰度评价函数为:

$$f(I) = \sum_x \sum_y \{ [f(i+1,j) - f(i,j)]^2 + [f(i,j+1) - f(i,j)]^2 \}. \quad (4)$$

清晰度越高, 灰度随位置的变化越敏锐, 细节变化越快, 可辨程度越高, 图像的质量就越好。

3.4 边缘强度

边缘强度从图像频域的高频分量的角度来描述图像的细节与边缘形状特征^[14]。边缘是图像关于形状特征的重要信息。边缘是图像的高频信息, 但不同于噪声信号, 它是有方向性的, 可通过各向异性的滤波器来提取。用 45° 和 135° 是两个归一化边缘算子 E_1, E_2 分别对图像进行卷积计算, 相加后得到图像边缘 $e(x,y)$, 即:

$$e(x,y) = E_1[f(i,j)] + E_2[f(i,j)], \quad E_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{6} & -\frac{1}{6} & -\frac{1}{6} \\ -\frac{1}{6} & \frac{4}{6} & -\frac{1}{6} \\ -\frac{1}{6} & -\frac{1}{6} & \frac{1}{6} \end{bmatrix}, \quad E_2 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{6} & -\frac{1}{6} & \frac{1}{6} \\ -\frac{1}{6} & \frac{4}{6} & -\frac{1}{6} \\ \frac{1}{6} & -\frac{1}{6} & -\frac{1}{6} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

定义

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{m \times n} \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n e^2(x,y) \quad (6)$$

为边缘平均强度。实验表明, 边缘强度越大, 图像能够反映的目标边缘形状特征越明显, 图像质量越好。

以上是常用的图像质量评价因子, 这些因子从一定方面反映了图像的质量, 但是没有充分考虑到全景相机这种以像对的形式获取的情况, 因此本文的主要任务是利用结构相似度评价全景相机的像对质量, 验证评价的可行性以及合理性, 并利用计算结果分析嫦娥三号全景相机在获得立体图像方面的能力。

4 图像结构相似度

大多数客观评价是通过数学模型等来衡量图像的质量, 没有充分考虑人眼视觉系统的特性, 因此不能真实反映图像的视觉感知质量, 甚至导致和人眼主观判别相反的结论^[15]。有学者提出, 观察者在观察中更加注意目标的结构信息, 对一幅图像的观察往往更关注图像的轮廓和边缘信息。基于上述研究, 学者提出了 SSIM 的全参考图像质量评价方法。其算法流程如图 2 所示。

该评价算法包含了图像的亮度、对比度以及结构信息三个方面^[4]。

$$S(x,y) = f[l(x,y), c(x,y), s(x,y)], \quad (7)$$

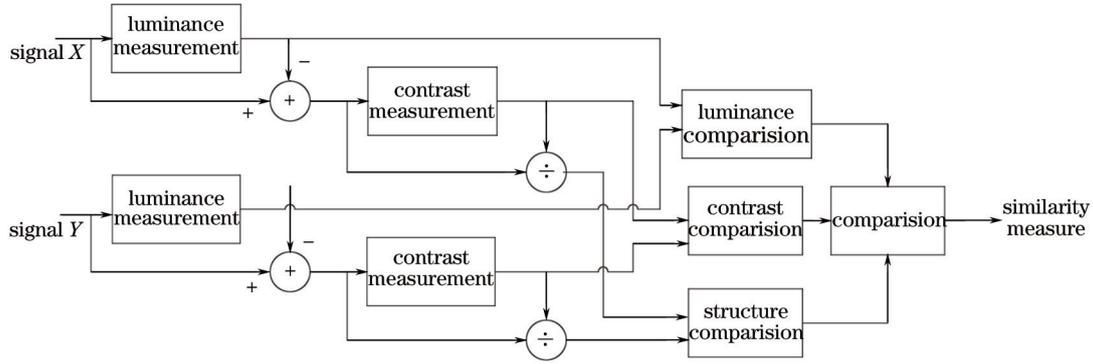


图2 SSIM 操作流程

Fig.2 Operation process of SSIM

对图像进行分块,每幅图像单独进行如下运算:

$$\mu_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (8)$$

$$\sigma_x = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^2 \right]^{1/2}, \quad (9)$$

式中 $l(x,y)$ 是图像的亮度信息,是 μ_x 和 μ_y 的函数:

$$l(x,y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1}, \quad (10)$$

μ_x 、 μ_y 表示图像 X 、 Y 的灰度均值,并且定义: $C_1 = (K_1L)^2$, 其中 L 是像素值(对于 8 bit 灰度图像为 255)的动态范围, K_1 是一个远小于 1 的常数。

$c(x,y)$ 是图像的对比度,是 σ_x 和 σ_y 的函数:

$$c(x,y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2}, \quad (11)$$

σ_x 和 σ_y 表示图像 X 、 Y 的灰度方差,其中 $C_2 = (K_2L)^2$, $K_2 \ll 1$ 。

$s(x,y)$ 是图像的结构信息:

$$s(x,y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3}, \quad (12)$$

其中

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y), \quad (13)$$

得到 SSIM 函数如下:

$$\text{SSIM}(x,y) = [l(x,y)]^\alpha [c(x,y)]^\beta [s(x,y)]^\gamma, \quad (14)$$

式中 C_1 、 C_2 、 C_3 这三个常数的引进是为了避免当(4)式、(5)式、(6)式中的分母十分接近零时出现不稳定性。 $\alpha > 0$ 、 $\beta > 0$ 、 $\gamma > 0$ 是常量指数,是用于调整这三个分量的相对重要性。为了使表达式得到简化,在此处取 $\alpha = 1$ 、 $\beta = 1$ 、 $\gamma = 1$ 且 $C_3 = C_2/2$ 。从而得到 SSIM 的一个简化方程:

$$\text{SSIM}(x,y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_x\sigma_y + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}. \quad (15)$$

5 实验结果

选取嫦娥三号全景相机样机在 2013 年 7 月份联试期间环拍的图像数据作为实验数据,图 3 所示是全景相机环拍的视角图。实验过程中,共环拍 2 圈,箭头所指向的顺光成像为拍摄的起点,顺时针拍摄一圈然后在逆时针拍摄一圈,每圈拍摄 28 对,共计 56 对图像(即图 4 中横坐标表示的图像编号)。计算了全景相机的

左相机和右相机56个像对之间的结构相似度,其值如图4所示。

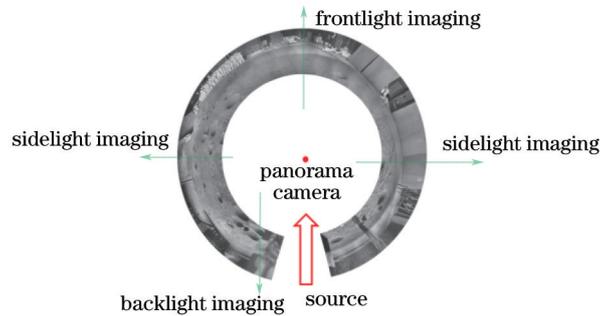


图3 全景相机环拍方位示意图

Fig.3 Orientation diagram around a circle of panorama camera

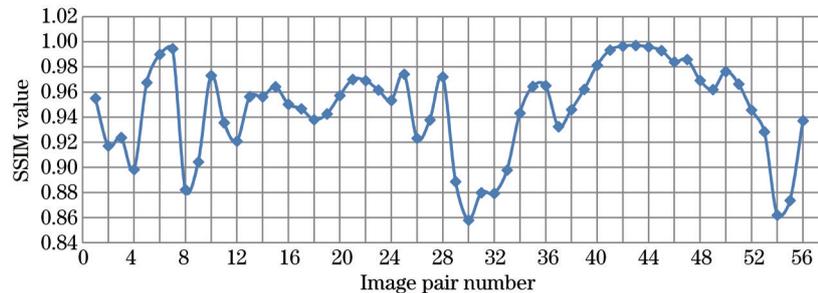


图4 SSIM 值分布图

Fig.4 Distribution diagram of SSIM

表1 第38像对图像的客观评价因子值

Table 1 Image pairs objective evaluation indexes of number 38

No	Gray value	Gray variance	Comentropy	Definition	Edge strength	
38	132.0895	25.4195	6.6137	8.4314	60.7525	(L)
	131.3870	25.1651	6.6339	7.1325	56.3481	(R)

6 实验结果分析

由实验结果可以得出:

1) 左右相机图像质量的SSIM值达到0.9以上的比例是89.5%,0.8以上的比例达到100%,这充分说明了全景相机的左右图像的像对质量高。

2) 在第4、8、11、18、24、26、30、31、38、55像对发生了SSIM值突变的情况。其中第4、26、30、55像对的图像都出现了严重的遮挡,而第8、11像对的图像出现了明显的噪声。由此可见,图像像对中有一幅图像在出现严重遮挡、模糊以及噪声时,SSIM值出现了明显的下降趋势,采用基于结构相似度的图像像对质量评价是合理的。当出现SSIM明显下降的图像像对,可以判断其不利于进行后续的图像立体处理。

3) 第38像对的图像没有出现上述噪声、遮挡、模糊的现象,目视判别图像质量良好。从常用的图像质量评价指标可以看出(见表1),图像像对之间的客观评价指标相近,尽管右相机清晰度和边缘强度略差,但很难作为像对质量的评价标准。此时SSIM值却发生了突变,这说明SSIM不仅考虑到了单幅图像的特点,而且考虑了全景相机和左右相机之间的图像质量信息。从后续的图像立体处理来看,由于第38像对存在较多的坑和石块,地形复杂,两台相机视差导致同名点匹配明显下降。可见在评价全景相机像对质量上,SSIM具有明显的优势,可以为后续用全景相机图像进行立体图像匹配提供参考。

4) 由计算出的SSIM值、图像常用的评价因子,并结合像对同名点匹配的结果,对全景相机图像像对质量进行等级划分(见表2)。

在时全景相机图像进行立体图像处理时,优先考虑结构相似度在0.9以上的像对,其次考虑SSIM值在0.8以上的像对,对于SSIM值下降到0.8以下的像对,需要分析像对图像质量下降的原因,酌情进行立体处理。

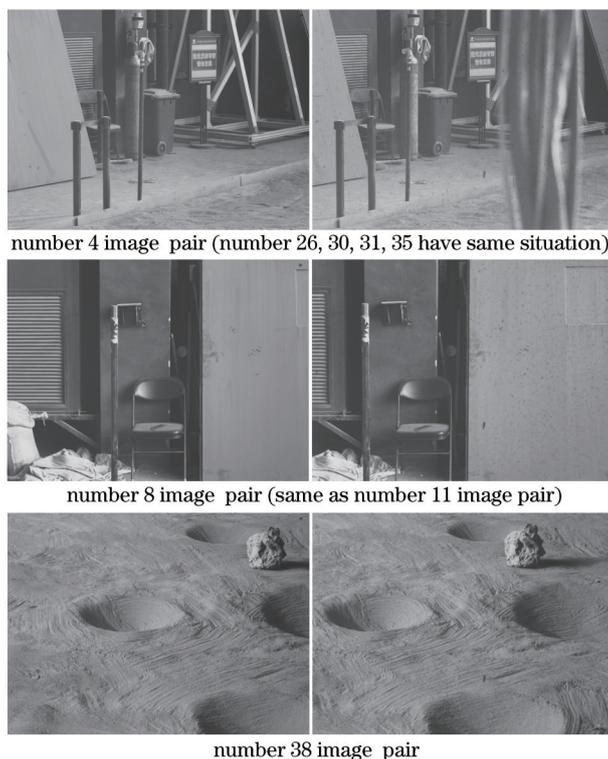


图5 左右相机的像对图像(左边为左相机图像,右边为右相机图像)

Fig.5 Images of left and right camera (the left image belongs to left camera and right image belongs to right camera)

表2 图像像对质量等级

Table 2 Quality level of the image pair

SSIM value	Quality level
$SSIM \geq 0.90$	excellent
$0.8 \leq SSIM < 0.90$	well
$SSIM < 0.8$	general

7 结 论

提出了基于结构相似度的全景相机立体像对图像质量评价方法,为后续全景相机图像进行立体匹配处理提供参考。验证了该方法的可行性,并对计算结果进行了分析,实验表明,基于结构相似度的方法在像对质量评价上具有一定的优势,为嫦娥三号月面探测获取的全景相机数据开展进一步的研究工作打下坚实的基础。

参 考 文 献

- 1 Sheikh H R, Sabir M F, Bovik A C. A statistical evaluation of recent full reference image quality assessment algorithms [J]. IEEE Transaction on Image Processing, 2006, 15(11): 3441-3452.
 - 2 Z Wang, L Lu, A C Bovik. Video quality assessment using structural distortion measurement[C]. International Conference on Image Processing, 2002, 3: 65-68.
 - 3 Video Quality Experts Group. Final report from VQEG on the validation of objective models of video quality assessment[OL]. <http://www.its.bldrdoc.gov/vqeg/projects/frtvpphase1>. [2000-3-15].
 - 4 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.
 - 5 Wang Zhou, Bovik A C. A universal image quality index[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2002, 9(3): 81-84.
 - 6 Li Hang, Lu Yang, Cui Huijuan, *et al.*. Image quality assessment based on frequency domain of structural similarities[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2009, 49(4): 559-562.
- 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.

- 7 齐 鸥, 黄应清, 蒋晓瑜. 基于色彩与结构相似性的伪彩色图像融合质量评价[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(10): 110-116.
- 8 Zeng Kai, Yang Hua, Zhai Yue, *et al.*. Quality assessment of photoelectric image interference[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(9): 2164-2168.
曾 凯, 杨 华, 翟 月, 等. 光电成像干扰图像质量评估[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(9): 2164-2168.
- 9 Yu Tong, Ma Shexiang, Liu Tiegeng. Image quality assessment based on multiscale edge structure similarity[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2009, 20(6): 843-846.
于 彤, 马社祥, 刘铁根. 基于多尺度边缘结构相似性的图像质量评价[J]. 光电子·激光, 2009, 20(6): 843-846.
- 10 Xie Xiaopu, Zhou Jin, Wu Qinzhong. No-reference quality index for image blur[J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(4): 921-924.
谢小甫, 周 进, 吴钦章. 一种针对图像模糊的无参考质量评价指标[J]. 计算机应用, 2010, 30(4): 921-924.
- 11 Jing Zhang, Thanh M Le, S H Ong, *et al.*. No-reference image quality assessment using structural activity[J]. Signal Processing, 2011, 91: 2575-2588.
- 12 Liu Jianjun, Ren Xin, Tan Xu, *et al.*. Lunar image data preprocessing and quality evaluation of CCD stereo camera on chang'E-2[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2013, 38(2): 186-190.
刘建军, 任 鑫, 谭 旭, 等. 嫦娥二号 CCD 立体相机数据预处理与数据质量评价[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(2): 186-190.
- 13 刘玉红, 琴 胡, 谢正祥. 基于信息熵和对比度的无参考图像质量评价方法: 中国, 200810070170[P]. 2009-01-14.
- 14 Li Zuolin, Li Xiaohui, Ma Lingling, *et al.*. Research of definition assessment based on no reference digital image quality [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(2): 239-246.
李祚林, 李晓辉, 马灵玲, 等. 面向无参考图像的清晰度评价方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(2): 239-246.
- 15 Cheng Guangquan, Zhang Jidong, Cheng Lizhi, *et al.*. Image quality assessment based on geometric structural distortion model[J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(7): 811-819.
程光权, 张继东, 成礼智, 等. 基于几何结构失真模型的图像质量评价研究[J]. 自动化学报, 2011, 37(7): 811-819.