

# 基于时域矩匹配的红外图像自适应非均匀性校正

冷寒冰 易波 谢庆胜 唐利霖 宫振东

中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119

**摘要** 非制冷红外焦平面阵列的响应非均匀性通常表现出与条带噪声相类似的特性。基于场景的校正算法是提高图像质量, 补偿响应特性漂移的有效措施。在深入研究矩匹配理论的基础之上, 提出了一种新的时域矩匹配非均匀性校正方法。利用相邻帧矩匹配后的图像对场景的变化列进行估计, 并在时间域对校正参数进行自适应更新。利用真实的红外图像序列验证了该算法在收敛速度和去鬼影方面的优越性和有效性。

**关键词** 图像处理; 红外焦平面阵列; 非均匀性校正; 时域矩匹配; 变化列估计;

中图分类号 TN241 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0410003

## Adaptive Nonuniformity Correction for Infrared Images Based on Temporal Moment Matching

Leng Hanbing Yi Bo Xie Qingsheng Tang Li'nao Gong Zhendong

*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China*

**Abstract** The response nonuniformity of uncooled infrared focal plane arrays is very similar to the stripe noise. Scene-based nonuniformity correction algorithm is an effective way to enhance the image quality and compensate the response drift. Based on the study of moment matching theory, a novel temporal moment matching nonuniformity correction algorithm is proposed. In the proposed algorithm, changing column is identified by the adjacent frames after moment matching, the correction coefficients are updated adaptively in temporal domain. The experimental results with the real infrared video sequences have shown that the proposed algorithm can significantly increase the convergence speed and reduce the ghosting artifacts.

**Key words** image processing; infrared focal plane array; non-uniformity correction; temporal moment matching; changing column estimation

**OCIS codes** 100.2550; 040.1240; 040.6808

## 1 引言

非制冷红外焦平面阵列(IRFPA)由于其低成本的优势,在航空测绘、工业生产、夜视监控、医疗普查等领域得到了越来越广泛的应用。由于目前制造工艺的限制,各探测元响应的非均匀性是影响成像质量和温度分辨率的主要因素。非均匀性校正(NUC)技术是去除响应非均匀性,提高系统成像质量的重要措施。

目前常用的非均匀性校正方法主要有定标类校正方法和场景类校正方法<sup>[1-3]</sup>。定标类校正方法通常依赖于黑体提供均匀的入射辐射来获得相应的校正系数,具体的方法包括了一点校正、两点校正以及多点校正方法。定标类校正方法具有算法简单,易于软硬件实现的优点,其缺点在于当探测元的响应特性发生变化时,用原有的校正系数校正后将带来较大的误差,往往需要重新定标才能解决问题。场景类校正方法的优点在于能够根据实际场景提取校正系数,可以克服探测器因温度漂移和时间漂移而带来的响应特性变化,具有自适应和智能化的优点。常用的基于场景的校正算法包括时域高通滤波算法、神经网络算法、恒定统计算法等<sup>[4-5]</sup>。这类算法通常比较复杂,需要大量的系统资源进行长时间的运算,并且对于复杂多变的红外场景,这些校正算法经常会导致“鬼影”的出现。基于场景的校正方法是当前算法研究和系统应用的重要

收稿日期: 2014-06-17; 收到修改稿日期: 2015-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(61201376)、中科院西部之光(Y229E21213)

作者简介: 冷寒冰(1978—),男,博士,副研究员,主要从事红外成像信号处理方面的研究。E-mail: lenghanbing@opt.ac.cn

方向,其研究重点主要集中在如何加快收敛速度和如何避免“鬼影”的出现<sup>[6]</sup>。

非制冷 IRFPA 具有与制冷型 IRFPA 不一样的响应特性和固定图案噪声特性。隋修宝等<sup>[7]</sup>指出,非制冷 IRFPA 的行积分读出电路具有特殊的结构,其同一列的探测元通常共享同一个读出通道,这导致了其固定图案噪声具有与条带噪声相类似的特性。因此,能够有效去除条带噪声的方法同样可应用于非制冷 IRFPA 的非均匀性校正之中。在遥感图像处理领域,条带噪声是一种常见的噪声,通常采用矩匹配非均匀性校正 (MM-NUC) 的方法对该类噪声进行去除。但由于矩匹配算法有效的前提是地物分布均匀,当不满足该假设时,通常会导致处理后的图像产生灰度畸变,出现带状效应<sup>[8]</sup>。针对该问题,韩玲等<sup>[9]</sup>提出了改进的行平滑条带滤波方法,对含有条带噪声的行均值曲线进行平滑处理后再进行矩匹配。秦雁等<sup>[10]</sup>提出了分段线性动态矩匹配非均匀性校正 (PWMM-NUC) 方法,将含噪图像分为高、中、低三个区间,在各区间内分别进行矩匹配处理。祝善友等<sup>[11]</sup>提出了基于方差补偿矩匹配非均匀性校正 (DCMM-NUC) 的方法,在实现去条带噪声的同时保留了原有地物之间的光谱分布差异。这些算法虽然改善了原始矩匹配算法的缺点,但由于只是利用单帧图像进行了处理,没有充分利用图像序列中相邻帧的相关性,因此直接用于非制冷 IRFPA 的非均匀性校正时,对条带噪声的去除并不彻底。本文利用红外图像序列,并结合时域高通滤波算法的迭代思想,提出了一种基于时域矩匹配的自适应校正算法。通过对真实红外图像序列的校正实验,证明了该算法的校正效果更为理想。

## 2 矩匹配校正原理

原始矩匹配算法假设 IRFPA 探测器在光谱响应范围内为一线性响应函数,表述如下(1)式所示,

$$X(i,j) = K(i,j)\Phi(i,j) + B(i,j). \quad (1)$$

式中  $\Phi(i,j)$  为探测元  $(i,j)$  接收到的场景的辐射通量,  $K(i,j)$  和  $B(i,j)$  分别为该探测元的增益和偏移量,  $X(i,j)$  为响应输出。

当采用两点定标校正时,其模型可表述如(2)式所示:

$$Y(i,j) = G(i,j)X(i,j) + O(i,j), \quad (2)$$

式中  $Y(i,j)$  表示探测元  $(i,j)$  校正后的响应值,  $G(i,j)$  和  $O(i,j)$  分别表示该探测元的增益校正系数和偏移量校正系数。考虑到非制冷 IRFPA 同一列的响应特性相类似,校正公式可以改写为(3)式所示:

$$Y(i,j) = G(j)X(i,j) + O(j), \quad (3)$$

式中  $G(j)$  和  $O(j)$  分别表示第  $j$  列探测元的增益校正系数和偏移量校正系数。这两个校正系数可由矩匹配方法推导出,如(4)式和(5)式所示。其中,  $\mu(j)$  和  $\sigma(j)$  分别为第  $j$  列像元的均值和方差,  $\mu(r)$  和  $\sigma(r)$  为参考均值和方差,通常设定为整帧图像的均值和方差。

$$G(j) = \sigma(r)/\sigma(j), \quad (4)$$

$$O(j) = \mu(r) - \mu(j) \cdot \sigma(r)/\sigma(j). \quad (5)$$

## 3 时域矩匹配校正方法

矩匹配及其常见的改进算法是基于单帧的处理方法,没有利用到图像序列帧与帧之间的相关性。为此,提出了一种利用图像序列进行矩匹配校正的方法,称之为时域矩匹配非均匀性校正 (TMM-NUC) 算法,其原理框图如图 1 所示。该算法的主要步骤为:首先对经过矩匹配后的相邻帧图像进行变化列检测,判断当前帧的每一列相对于前一帧的每一列是否发生改变,而后对校正系数进行时域自适应递归,最后进行非均匀性校正并输出图像序列。其中,变化列检测和校正系数的时域递归是该算法的关键步骤。

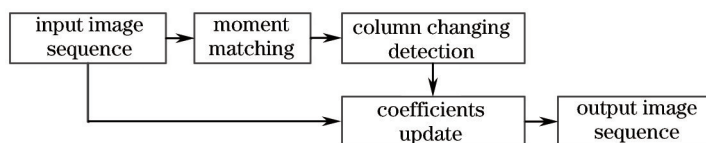


图1 TMM-NUC 算法原理框图

Fig.1 Schematic diagram of TMM-NUC algorithm

### 3.1 校正系数自适应更新

Scribner等<sup>[12]</sup>首先提出了时域高通滤波非均匀性校正(THPF-NUC)算法。在该算法中,IRFPA的固定图案噪声被认为是场景图像中的低频成分,通过时域上的高通滤波去除了固定图案噪声而实现了非均匀性校正。具体实现公式如下式所示:

$$Y_n(i,j) = X_n(i,j) - f_n(i,j), \quad (6)$$

$$f_n(i,j) = \frac{1}{K} X_n(i,j) + (1 - \frac{1}{K}) f_{n-1}(i,j), \quad (7)$$

式中  $X_n(i,j)$  为输入的待校正图像,  $Y_n(i,j)$  为校正后的图像,  $K$  为时间常数,  $n$  为帧计数。THPF-NUC算法要求场景与成像系统之间存在相对运动,且由于场景直接参与了递归过程,过亮的区域往往会导致“拖尾”现象的产生。为此,左超等<sup>[13]</sup>提出了基于双边滤波的时域高通滤波非均匀性校正(BFTH-NUC)算法,其关键改进为将原始图像先进行双边滤波,而后再参与时域递归,如(8)式所示,其中  $X_n^{BFr}(i,j)$  表示  $X_n(i,j)$  与其双边滤波输出之差。

$$f_n(i,j) = \frac{1}{K} X_n^{BFr}(i,j) + (1 - \frac{1}{K}) f_{n-1}(i,j). \quad (8)$$

BFTH-NUC算法大大降低了“鬼影”和“拖尾”现象的出现,但是没有完全解决这些问题。当图像序列帧与帧之间位移较大时(大于10 pixel),拖尾现象仍然较为突出。为此,借鉴THPF-NUC中的递归公式,提出了TMM-NUC算法,其核心递归方程如(9)式所示。其中,  $\mu_n(j)$  和  $\sigma_n(j)$  分别表示第  $n$  帧图像中第  $j$  列像元的均值和方差。比较(7)、(8)与(9)式可知,在THPF-NUC和BFTH-NUC算法中,原始场景或是场景的滤波输出参与了时域递归,而在TMM-NUC算法中,只是场景的统计量(列均值和列方差)参与了时域递归。

$$\begin{cases} \mu_n(j) = \frac{1}{K} \mu_n(j) + (1 - \frac{1}{K}) \mu_{n-1}(j) \\ \sigma_n(j) = \frac{1}{K} \sigma_n(j) + (1 - \frac{1}{K}) \sigma_{n-1}(j) \end{cases} \quad (9)$$

最终的校正公式如(10)式所示。式中  $X_n(i,j)$  为第  $n$  帧待校正图像,  $Y_n(i,j)$  为校正后的图像,  $\sigma_n(r)$  和  $\mu_n(r)$  分别为  $X_n(i,j)$  的方差和均值,  $\sigma_n(j)$  和  $\mu_n(j)$  为  $X_n(i,j)$  第  $j$  列的方差和均值。

$$Y_n(i,j) = X_n(i,j) \sigma_n(r) / \sigma_n(j) + \mu_n(r) - \mu_n(j) \sigma_n(r) / \sigma_n(j). \quad (10)$$

### 3.2 图像变化列检测

基于场景的校正算法通常需要场景始终处于运动状态,一旦场景静止,静止的场景会被误认为是固定图案噪声(FPN),从而被滤除。因此,基于场景的校正算法通常需要采取校正系数自适应更新的策略,即当场景处于运动状态时校正系数才进行更新,场景静止时校正系数不更新。Harris等<sup>[14]</sup>提出了一种像元变化检测方法,将相邻帧的差值与某阈值进行比较,大于等于该阈值的像元被认为发生了改变,其对应的校正系数参数更新,小于该阈值的像元被认为静止不动,其对应的校正系数保持不变。该方法的缺点在于,受随机噪声的影响,很难确定合适的阈值,经常会出现误判,并不能完全降低“鬼影”的出现。

考虑到所提出的TMM-NUC算法中,对校正系数的更新是按照列来进行的,为此文中提出了一种变化列检测的方法。将相邻帧的差值与某阈值  $T$  进行比较,分别统计每一列中大于该阈值的像元与列像元总数的百分比,若该百分比大于阈值  $\delta$ ,则认为该列发生了改变,反之则认为该列无变化。当某列发生改变时,对该列对应的校正系数进行更新,否则不进行更新。与Harris的变化像元检测方法相比,文中提出的方法对随机噪声不敏感,主要取决于  $\delta$  的设置。根据经验,  $\delta$  的取值范围通常为0.5~0.8。

## 4 实验结果与分析

为验证提出的TMM-NUC算法的性能,采用ULIS公司的UL03262研制了一台非制冷红外焦平面阵列相机,其分辨率大小为384 pixel × 288 pixel,图像数据有效位为8位,并用其采集了待校正的红外图像序列。该序列包含1246帧,1~872帧时相机处于运动状态,873~1246帧时相机处于静止状态。利用预先标定的盲元坐标以及邻域均值对盲元进行了补偿后,分别对其实施了上文所述的非均匀性校正算法。

其中,PWMM-NUC采用了双阈值最大类间方差(OTSU)分割方法<sup>[15]</sup>逐帧将待校正的图像分为高、中、低

三个区间,然后再进行处理。DCMM-NUC采用了文献[11]中所述的方差补偿的矩匹配校正方法。BFTH-NUC算法中,双边滤波器的参数为 $D=15$ , $\sigma_s=2.5$ , $\sigma_r=150$ ,其具体含义可参见文献[13]。TMM-NUC算法中,用于变化列检测的阈值 $T$ 取值为10,阈值 $\delta$ 取经验值0.6。并且,BFTH-NUC和TMM-NUC中的时间常数 $K$ 均取值为33。

图2(a)为第810帧待校正的图像,(b)~(f)分别给出了其经过MM-NUC、PWMM-NUC、DCMM-NUC、BFTH-NUC和TMM-NUC处理后的图像。

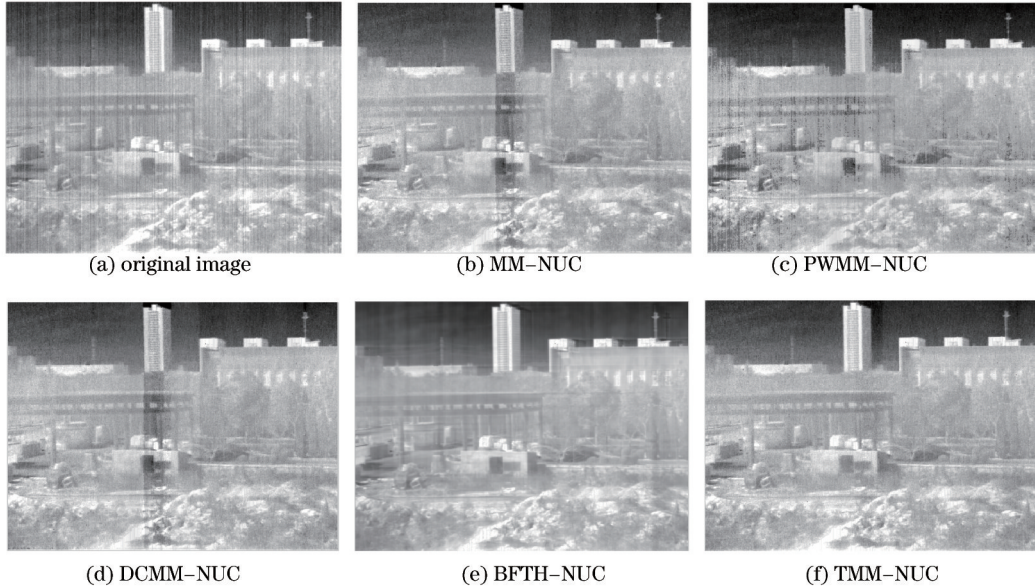


图2 各算法校正效果

Fig.2 Correction results of different algorithms

经过MM-NUC和DCMM-NUC校正后的图像明显出现了灰度畸变。虽然DCMM-NUC采用了方差补偿的方法,但该方法仅对大尺寸的遥感图像起作用。这主要是因为遥感图像的辐射特性较为单一,往往只包含了植被和水体两种辐射特征<sup>[11]</sup>,而文中所处理的红外图像辐射特征较为复杂,因此未能消除灰度畸变现象。PWMM-NUC虽然没有出现灰度畸变的情况,但是并没有彻底去除条带噪声,从图2(c)可以看出只有天空背景处的条带噪声得到了有效去除,其余地方仍有较大的条带噪声。这主要是由于条纹非均匀性的存在影响了图像分割的准确性,背景均匀的地方可以分割得较为准确,但其余地方存在的分割误差导致了条带噪声仍有残留。BFTH-NUC主要存在两个问题:1)对复杂的场景去除条带噪声较好,对简单的场景去除条带噪声效果较差,在图2(e)中的天空背景中可以较为明显地看到存在残留的条带噪声;2)场景中过亮的灰度值会导致“拖尾”现象,如图2(e)中的高楼顶端所示。TMM-NUC算法较好地解决了灰度畸变和“拖尾”的问题,在图2(f)中,过亮的楼房顶端没有出现“拖尾”现象,且条带噪声得到了有效地去除。

在IRFPA的非均匀性校正中,若想使得校正效果最优,各探测元很显然应该具有不一样的校正系数。而本文提出的TMM-NUC算法对同列像元采用了同样的校正系数,这并不是最佳的选择。与BFTH-NUC校正后的图像相比,TMM-NUC校正后的图像不够柔和,较为粗糙,图(3)中的粗糙度对比也验证了这一点,这是TMM-NUC算法先天性的缺点。但该缺点并非不可克服,完全可以进一步采用先进的去噪算法使得图像变得更为平滑,这也是下一步的重点研究内容之一。

由于MM-NUC、PWMM-NUC和DCMM-NUC是基于单帧处理的校正算法,它们不存在收敛性问题。因此重点比较了BFTH-NUC和TMM-NUC的收敛性。假定在采集该图像序列的过程中探测器没有发生漂移,采用两点校正后的图像 $I_{TPC}(i,j)$ 作为参考图像,计算如(11)式所示的均方根误差( $E_{RMS}$ ),其中 $I(i,j)$ 分别为BFTH-NUC和TMM-NUC校正后的图像,图(4)为校正后图像的 $E_{RMS}$ 对比图。由图可知,TMM-NUC校正后的 $E_{RMS}$ 值要略大于BFTH-NUC校正后的 $E_{RMS}$ 值,两者几乎都在100帧左右达到收敛状态。表1给出了图2中各算法的校正后 $E_{RMS}$ 值。由 $E_{RMS}$ 的数值可知,BFTH-NUC和TMM-NUC可以取得较优的校正效果。并且由于

TMM-NUC 相对于 BFTH-NUC 具有更少的“鬼影”,因此 TMM-NUC 可以取得更好的校正效果。

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i,j} [I(i,j) - I_{TPC}(i,j)]^2} \quad (11)$$

表 1 各算法处理后的  $E_{RMS}$

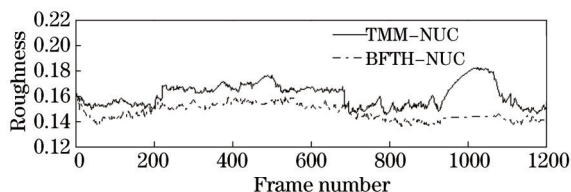


图 3 粗糙度对比

Fig.3 Roughness contrast

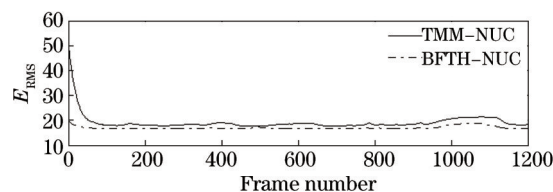


图 4  $E_{RMS}$ 对比

Fig.4  $E_{RMS}$  contrast

Table 1  $E_{RMS}$  of the NUC results for frame 810

	MM-NUC	PWMM-NUC	DCMM-NUC	BFTH-NUC	TMM-NUC
$E_{RMS}$	22.2470	22.7388	21.3344	18.3288	18.3610

## 5 结 论

非制冷 IRFPA 的固定图案噪声具有与条带噪声相类似的特性。针对矩匹配及其改进算法去条带不彻底,并且会导致灰度畸变的缺点,提出了一种基于列变化检测的时域矩匹配校正方法,并利用真实的红外图像序列对该算法进行了验证。实验结果证明该算法在有效去除条带噪声的同时可有效避免“鬼影”、“拖尾”等现象的出现。

## 参 考 文 献

- 1 A Rzossi, M Diani, G Corsini. Temporal statistics de-ghosting for adaptive non-uniformity correction in infrared focal plane arrays [J]. IET Electron Lett, 2010, 46(5): 348-349.
- 2 Qin Hanlin, Zhou Huixin, Liu Shangqian. Nonuniformity correction algorithm for infrared focal plane arrays based on wavelet transform [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(9): 1617-1620.  
秦翰林, 周慧鑫, 刘上乾. 小波变换的红外焦平面阵列非均匀性校正算法[J]. 光学学报, 2007, 27(9): 1617-1620.
- 3 C Zuo, Y Z Zhang, Q Chen, *et al.*. A two-frame approach for scene-based nonuniformity correction in array sensors [J]. Infrared Physics & Technology, 2013, 60(5): 190-196.
- 4 W X Qian, Q Chen, G H Gu, *et al.*. Correction method for strip nonuniformity [J]. Applied Optics, 2010, 49(10): 1764-1773.
- 5 R C Hardie, F Baxley, B Brys, *et al.*. Scene-based nonuniformity correction with reduced ghosting using a gated LMS algorithm [J]. Opt Express, 2009, 17(17): 14918-14933.
- 6 X B Sui, Q Chen, G H Gu Adaptive grayscale adjustment-based stripe noise removal method of single image [J]. Infrared Physics & Technology, 2013, 60(5): 121-128.
- 7 Sui Xiubao, Chen Qian, Gu Guohua. Algorithm for eliminating stripe noise in infrared image [J]. J Infrared Millim Waves, 2012, 31(2): 106-112.  
隋修宝, 陈 钱, 顾国华. 红外图像条纹噪声消除方法[J]. 红外与毫米波学报, 2012, 31(2): 106-112.
- 8 Chen Jinsong, Shao Yun, Zhu Boqin. Destriping in CMODIS data by an improved moment matching [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2003, 18(5): 313-316.  
陈劲松, 邵 芸, 朱博勤. 一种改进的矩匹配方法在 CMODIS 数据条带去除中的应用[J]. 遥感技术与应用, 2003, 18(5): 313-316.
- 9 Han Ling, Dong Lianfeng, Zhang Min, *et al.*. Destriping hyperspectral image based on an improved moment matching method [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3333-3338.  
韩 玲, 董连风, 张 敏, 等. 基于改进的矩匹配方法高光谱影像条带噪声滤波技术[J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3333-3338.
- 10 Qin Yan, Deng Ruru, He Yingqing, *et al.*. Piece-wise linear dynamic moment matching destriping [J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(11): 1444-1452.

- 秦 雁, 邓孺孺, 何颖清, 等. 分段线性动态矩匹配条带去除[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(11): 1444-1452.
- 11 Zhu Shanyou, Zhang Guixin, Gong Cailan, *et al.*. Nonuniformity correction method based on standard deviation value compensation after moment matching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1211002.
- 祝善友, 张桂欣, 巩彩兰, 等. 基于方差补偿矩匹配的红外图像非均匀性校正方法 [J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1211002.
- 12 D A Scribner, K A Sarkady, J T Caulfield, *et al.*. Nonuniformity correction for staring IR focal plane arrays using scene-based techniques [C]. *SPIE*, 1990, 1308: 224-233.
- 13 C Zuo, Q Chen, G H Gu, *et al.*. New temporal high-pass filter nonuniformity correction based on bilateral filter [J]. *Optical Review*, 2011, 18(2): 197-202.
- 14 J T Harris, Y M Chiang. Minimizing the ghosting artifact in scene-based nonuniformity correction [C]. *SPIE*, 1998, 3377: 106-113.
- 15 Ding Rui, Liu Jiajia, Li Bailin, *et al.*. Modified multilevel thresholding Otsu method for image segmentation [J]. *Journal of Computer Applications*, 2013, 33(S1): 214-217.
- 丁 锐, 刘甲甲, 李柏林, 等. 改进的 Otsu 图像多阈值分割方法[J]. 计算机应用, 2013, 33(S1): 214-217.

栏目编辑: 张浩佳