

## 自适应连续多级分区与初始阈值估计的快速模板匹配方法

汪鲁才<sup>1</sup>, 易锡年<sup>1,3</sup>, 陈小天<sup>2</sup>, 刘鑫<sup>1</sup>

(1. 湖南师范大学 工学院, 湖南 长沙 410081; 2. 国防科学技术大学 ATR 国防重点实验室, 湖南 长沙 410073; 3. 湖南三一重工股份有限公司, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 归一化互相关测度在光照改变时比采用绝对差之和测度(SAD)要稳定, 但是归一化互相关测度的缺陷在于它的计算量非常大。为此, 提出了一种结合自适应连续多级分区和初始阈值估计的基于归一化互相关(NCC)的快速模板匹配算法。根据模板图像中不同模块的梯度值, 将模板图像进行逐级分区, 通过分区顺序将互相关之和分为不同的层, 得到各层互相关的上界, 运用柯西-施瓦兹不等式得到上界间的关系, 形成自适应连续多级分区淘汰方法。同时, 为了加快匹配速度, 利用初始阈值估计产生一个较大的边界阈值, 以淘汰初始搜索时的大量非匹配点, 减少搜索点数目。实验结果表明: 所提出的算法具有较好的鲁棒性, 且算法的执行速度优于传统算法。

**关键词:** 快速模板匹配; 自适应连续多级分区; 归一化互相关; 部分边界相关; 初始阈值估计  
**中图分类号:** TP391.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)04-1106-06

## Fast template matching algorithm based on AMSP and initial threshold estimation

Wang Lucai<sup>1</sup>, Yi Xinian<sup>1,3</sup>, Chen Xiaotian<sup>2</sup>, Liu Xin<sup>1</sup>

(1. College of Poly-Technology, Hunan Normal University, Changsha 410081, China;  
2. Key Laboratory of ATR, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;  
3. Hunan Sany Heavy Industry Co., Ltd., Changsha 410073, China)

**Abstract:** The Normalization Cross Correlation (NCC) measure is more stable than Sum of Absolute Differences (SAD) measure when the illumination changes. However, it needs large calculated amount, which is its disadvantage. Therefore, a fast template matching algorithm based on NCC combing Adaptive Multilevel Successive Partitioning (AMSP) with the initial threshold estimation was proposed in this paper. The template image was partitioned into different blocks steeply according to the gradient values of the different modules in the template image, the summation of cross correlation was partitioned into different levels with the partition order to get the upper bounds of each layer, and the Cauchy-Schwartz inequality was used to get the relation between different upper bounds, then the approach of adaptive multilevel successive partitioning elimination was formed. In order to further accelerate the matching speed, the initial threshold estimation was used to generate a large boundary threshold, which could eliminate lots of unmatched points as initial searching and reduce the number of search points. The

收稿日期: 2012-08-15; 修订日期: 2012-09-14

基金项目: 湖南省科技厅科研基金(2010FJ6014)

作者简介: 汪鲁才(1968-), 男, 教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事卫星图像处理、模式识别与智能系统方面的研究。

Email: wlucai9776@vip.sina.com

experimental results demonstrate that the proposed algorithm has strong robustness, and the execution speed of the proposed approach is superior to traditional algorithms.

Key words: fast template matching; adaptive multilevel successive partitioning; NCC; bounded partial correlation; initial threshold estimation

### 0 引 言

模板匹配是一种根据目标的模板图信息将目标从另一个图像区域(实时图)中定位出来的图像分析与处理技术<sup>[1]</sup>。模板匹配在目标跟踪、机器视觉和图像编码等图像处理领域具有重要的作用,且作为精确制导图像处理器的关键技术具有重要的理论意义和实用价值<sup>[2]</sup>。根据实际工程应用的需求,一系列模板匹配的快速算法被提出:Shinichiro O 等人提出变尺寸快速模板匹配算法<sup>[3]</sup>,Kadyrov A 等人通过多项式拟合和积分图<sup>[4]</sup>来达到快速运算的目的,但这些算法存在精度的损失,找到的匹配点可能是局部最优点,X.Q.Gao 等人提出多级连续淘汰算法(MSEA)<sup>[5]</sup>,其基本思想是将模板图像进行多级连续均等的分层,然后通过各层的边界阈值逐层淘汰不匹配的区域。之后,C.Wang 等人提出赢墩领出算法(WUS)<sup>[6]</sup>。虽然这些算法的匹配速度比较快,但都是基于 SAD 测度的,对光照的变化比较敏感,而基于相关性测度的归一化互相关测度(NCC)在光照变化时比绝对差值和(SAD)和平方差和(SSD)测度更稳定,在目标识别、跟踪和工业检测等领域应用广泛。J. P. Lewis 等人通过在频域利用 FFT 算法计算相关性<sup>[7-8]</sup>来实现快速运算,但速度仍然有限。S. Mattoccia 等人提出加强边界相关算法(EBC)<sup>[9]</sup>,虽然其执行速度比 FFT 快,但它将模板分为均等的子模块,所以得到的边界仍不足以抑制可观的搜索点。

文中通过对 MSEA 算法进行扩展,将其应用到 NCC 测度中,提出了一种基于 NCC 测度的快速模板匹配算法,该算法主要由两部分组成:自适应连续多级分区及初始阈值估计。前者利用图像的复杂度来实现高效的子模块的划分,它提供了一个比 MSEA 更严格的边界,而且可以在较早阶段跳过更多的非匹配点的搜索;后者产生一个较大的边界阈值,它有效地抑制了开始阶段搜索点的数目。

### 1 自适应连续多级分区的快速模板匹配算法

设 T 为一大小为 n×n 的模板,I 为原始图像,大

小为 M×N。基于 NCC 的模板匹配通过寻找 NCC 函数的最大值将模板 T 定位到 I 中,如图 1 所示。记当前模板在图像中的位置为(x,y),当前候选子图为 I<sub>c</sub>(x,y)。

$$NCC(x,y) = \frac{\psi(x,y)}{\|I_c(x,y)\| \cdot \|T\|} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I(x+i,y+j) \cdot T(i,j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I(x+i,y+j)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n T(i,j)^2}} \quad (1)$$

式中:ψ(x,y)为原始图中候选子图和模板之间的互相关值;‖I<sub>c</sub>(x,y)‖和‖T‖分别代表原始图中候选子图和模板图的自相关值。

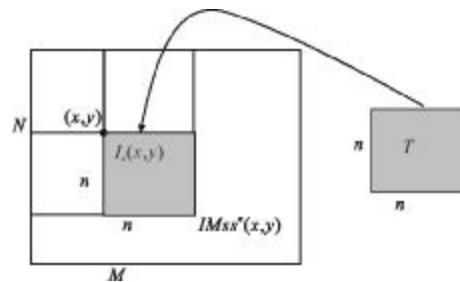


图 1 模板匹配图

Fig.1 Figure of template matching

文中采用积分图的方法对自相关进行计算,在匹配之前,对原始图和模板图从原点开始逐行逐列依次计算,求得各子区域的像素平方的积分,分别记为 I<sub>ss</sub>(x,y) = ∑<sub>i=0</sub><sup>x</sup> ∑<sub>j=0</sub><sup>y</sup> I<sup>2</sup>(i,j) 及 T<sub>ss</sub>(x,y) = ∑<sub>i=0</sub><sup>x</sup> ∑<sub>j=0</sub><sup>y</sup> T<sup>2</sup>(i,j), 其中(x,y)表示子区域的终点坐标,则 ‖T‖ = √I<sub>Tss</sub>(n,n) = √∑<sub>i=0</sub><sup>n</sup> ∑<sub>j=0</sub><sup>n</sup> T<sup>2</sup>(i,j), 在模板选定之后只需计算一次。前面已经计算得到原始图中各子区域像素平方的积分。则对应原始图中(图 1),起点坐标(x,y)、模块大小(n×n)的区域的像素平方的积分为:

$$IMss^n(x,y) = I_{ss}(x+n-1,y+n-1) + I_{ss}(x-1,y-1) - I_{ss}(x+n-1,y-1) - I_{ss}(x-1,y+n-1) \quad (2)$$

则 ‖I<sub>c</sub>(x,y)‖ = √IMss<sup>n</sup>(x,y)。对于模板中,起点坐标(x,y)、大小 a×a 的子区域的像素平方和的积分为:

$$Mss^a(x, y) = ITss(x+a-1, y+a-1) + ITss(x-1, y-1) - ITss(x+a-1, y-1) - ITss(x-1, y+a-1) \quad (3)$$

对于 NCC 中的互相关  $\psi(x, y)$  计算, 文中采用自适应多级连续分区算法实现快速运算。如图 2 所示, 将模板图像进行自适应连续多级分区, 根据分区顺序计算各层的上界, 进行初始阈值估计后, 采取多级连续淘汰以最终获得最优匹配区域。

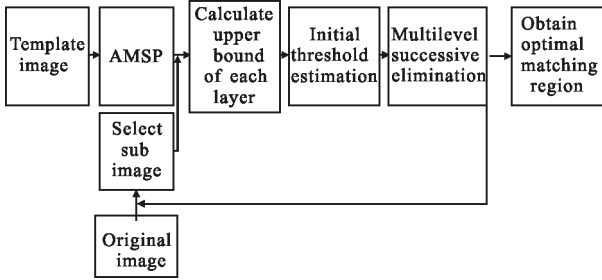


图 2 自适应连续多级分区和初始阈值估计的快速模板匹配算法框图

Fig.2 Flow chart of fast template matching based on adaptive multilevel successive partitioning and initial threshold estimation

### 1.1 自适应连续多级分区策略

NCC 测度比 SAD 稳定, 但计算量非常大。分子的计算是整个公式计算的瓶颈。为了简化分子的计算, L. Di Stefano 等人提出边界部分相关 (BPC) 算法, 利用詹森和柯西-施瓦兹不等式的互相关的上界以早先淘汰一些搜索点<sup>[10-11]</sup>, 但这种方法得到的上界不是非常严格。X.Q.Gao 等人提出了一种多级连续淘汰算法 (MSEA)<sup>[5]</sup> 得到图像不同分区的 SAD 的边界。MSEA 算法对模板进行均匀分区得到各层子模块, 而且随着层数的增加, 边界越来越严格, 如果模板大小为  $n \times n$ , MSEA 算法可以分为  $\log_2^n$  层。

#### 1.1.1 MSEA 分区方法的互相关上界的关系

通过柯西-施瓦兹不等式, 参考文献[9]中已经证明:

如果  $a, b \in \mathbb{R}^p, A = \{1, 2, \dots, p\}$ , 则存在  $r \in \{1, 2, \dots, p\}, A_1 \cup A_2 \dots A_r = S, A_i \cap A_j = \emptyset, \forall i \neq j, (i, j \in \{1, 2, \dots, r\})$ , 则下面的不等式成立:

$$\sum_{k \in A} a_k \cdot b_k \leq \sum_{t=1}^r \left( \sqrt{\sum_{k \in A_t} a_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{k \in A_t} b_k^2} \right) \leq \sqrt{\sum_{k \in A} a_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{k \in A} b_k^2} \quad (4)$$

而 MSEA 分区方法的互相关的上界为:

$$\beta_r(x, y) = \sum_{t=1}^{4^{r-1}} \sqrt{\sum_{(i,j) \in B(r,t)} I^2(x+1, y+1)} \sqrt{\sum_{(i,j) \in B(r,t)} T^2(i, j)} \quad (5)$$

式中:  $r \in \{1, 2, \dots, L\}, B(r, t)$  为第  $r$  层的第  $t$  个子模块。如模板大小为  $n \times n$ , 则共有  $L = \log_2^n$  层。

综合公式(4)、(5), 可获得 MSEA 分区方法各层互相关上界的关系为:

$$\beta_0 \geq \beta_1 \geq \dots \beta_r \geq \dots \beta_L = CC \quad (6)$$

式中:  $CC$  为互相关值。MSEA 算法对模板进行均匀分区得到各层子模块, 而且随着层数的增加, 上界越来越严格, 但最多可以分为  $L = \log_2^n$  层。如果能将模块分为更多层, 那么将得到一个更加严格的上界, 而且可以更早淘汰一些不匹配的候选目标。

#### 1.1.2 自适应多级连续分区策略

一个具有较大强度方差的模块通常具有比较丰富的细节。这意味着这个模块的像素平方和不能代表模块的细节, 所以将具有较大方差的模块进行分区可以降低上界值而获得一个更严格的上界。为了在早期获得一个更严格的边界, 有必要先将具有较大方差的模块分为多个子模块。从计算速度考虑, 文中以模块的梯度幅度和、而不是方差作为分区的依据。将模板图像进行  $2 \times 2$  的分区, 得到 4 个子模块, 分别计算它们的梯度幅度和, 具有最大梯度幅度和的模块继续分为  $2 \times 2$  的子模块, 这些子模块和前面没有进行继续划分的子模块一起比较, 取得具有最大梯度幅度和的模块进行进一步的划分, 直到所有子模块的梯度幅度和小于一个给定阈值  $Th$ , 模块将不再进行  $2 \times 2$  的分区。分区过程如图 3 所示, 如果阈值  $T$  设置的比较小, 该方法得到的分区层数大于 MSEA 算法的  $\log_2^n$  层, 从而可以获得一个比 MSEA 算法更严格的边界。

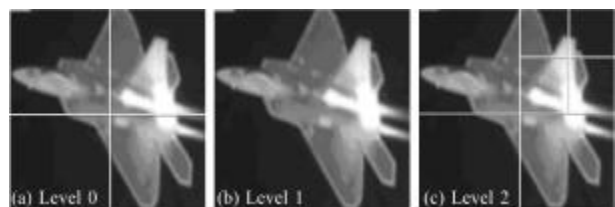


图 3 自适应多级连续分区策略

Fig.3 Partition order of AMSP

#### 1.2 利用分区策略计算上界:

文中将每个子模块信息用模块的起点坐标、模

块大小、模块梯度幅度和、模块分层层数以及模板起始位置来标记。

### 1.2.1 取得各层模块的标记

设模板图像标记为 $(x, y, n, sg, r, p)$ , 即模板的起点坐标为 $(x, y)$ , 模板的大小为 $n \times n$ , 模板的梯度幅度和为 $sg$ , 模板分层的层数为 $r$ , 模板存放的起始位置为 $p$ 。

重复

(1) 从所有的模块标记信息中选择具有最大梯度幅度和的模块, 设它的标记为 $(x_1, y_1, n_1, sg_1, r, p_1)$ 。

(2) 将标记信息中层数信息为 $r$ 的不具有最大梯度幅度和的所有模块的标记信息中的层数信息加一。

(3) 将所选的具有最大梯度幅度和的模块分为4个子模块, 分别计算它们的梯度幅度和。

(4) 检查4个子模块, 如果子模块的梯度幅度和大于一个给定阈值 $Th$ , 将模块存入起始位置分别为 $p_1, p_1 + 2 * (n_1/2) * (n_1/2), p_1 + 3 * (n_1/2) * (n_1/2)$ 的存储区域。为简便起见, 这里将存储区域的起始位置分别标注为 $p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{14}$ 。

文中, 阈值 $Th$ 设置为0, 以得到和全搜索(FS)一样的精度, 找到全局最优点。如果 $Th$ 设置的大些, 可进一步提高算法的运算时间, 但匹配精度下降。

(5) 将4个子模块分别标记为:

$$(x_1, y_1, n_1/2, sg_{11}, r+1, p_{11})$$

$$(y_1+n_1/2, y_1, n_1/2, sg_{12}, r+1, p_{12})$$

$$(y_1, y_1+n_1/2, n_1/2, sg_{13}, r+1, p_{13})$$

$$(y_1+n_1/2, y_1+n_1/2, n_1/2, sg_{14}, r+1, p_{14})$$

直到: 所有子模块的梯度幅度和均小于给定阈值 $Th$ 。

### 1.2.2 归一化互相关的上界及关系

第 $r$ 层互相关的上界

$$\beta_r(x, y) = \sum_{i=1}^{4+3*(r-1)} \sqrt{\sum_{(i,j) \in B(r,t)} P^2(x+i, y+j)} \cdot \sqrt{\sum_{(i,j) \in B(r,t)} P^2(i, j)} \quad (7)$$

在计算 $\beta_r(x, y)$ 时, 先查找模块标记信息中层数信息为 $r$ 的所有模块标记。标记信息中的 $(x, y, n)$ 即起点坐标, 模块大小采用积分图的方法, 利用公式(2)、公式(3)完成上界的快速计算。

综合自适应多级分区顺序和公式(4), 可得到自适应多级分区算法互相关上界的关系为:

$$\beta_0 \geq \beta_1 \geq \dots \beta_r \geq \dots \beta_{\max L} \geq CC, NCC \text{ 的上界 } \lambda(x, y) =$$

$$\frac{\beta(x, y)}{\|I_c(x, y)\| \cdot \|T\|} \geq \frac{\psi(x, y)}{\|I_c(x, y)\| \cdot \|T\|}, \text{ 则归一化}$$

互相关各层间上界的关系:

$$\lambda_0 \geq \lambda_1 \geq \dots \lambda_r \geq \dots \lambda_{\max L} \geq NCC \quad (8)$$

式中: $NCC$ 为归一化互相关值。文中将阈值 $Th$ 设置为0, 则 $\lambda_{\max L} = NCC$ 。

### 1.3 初始阈值估计

利用阈值 $NCC_{\max}$ 淘汰搜索点的模板匹配方法, 通常设置一个可能出现的最小值(例如0)给 $NCC_{\max}$ , 这个值随后被计算得到的当前的 $NCC_{\max}$ 替代, 这是一种降低计算量的有效方法。然而, 最匹配点的坐标通常不知道, 如果最优点在起始搜索点附近, 则可以快速搜索到目标; 相反, 如果最优点远离起始点, 则需要较多的计算时间。如果在搜索开始之前估计一个较大的阈值, 和在正确匹配点处 $NCC$ 的值相同或者近似, 那么更多的搜索点可以在搜索过程中淘汰, 计算量将大大降低。当然, 利用估计阈值进行穷举搜索一般都能找到全局最优匹配的点, 而不会陷入局部最优点。文中获取初始阈值的伪代码如下所示, 其中原始图大小为 $M \times N$ , 模板大小为 $n \times n$ 。

初始阈值估计算法的伪代码

```
for each (x, y)
  for r=1 to 2
    if  $\lambda_r(x, y) < T_{\max}$ 
      then skip (x, y);
    end
  if  $\lambda_2(x, y) < T_{\max}$ 
    then  $T_{\max} = \lambda_2(x, y)$ ;
     $x_{\max} = x$ ;
     $y_{\max} = y$ ;
  end
```

$$NCC_{\max} = NCC(ix_{\max}, iy_{\max});$$

### 1.4 利用自适应连续多级分区进行连续多级淘汰

在获得初始估计阈值后便可进行连续多级淘汰, 并获取最优匹配位置, 算法的伪代码如下所示。其中原始图大小为 $M \times N$ , 模板大小为 $n \times n$ , 自适应多级分区的最后一级为 $\max L$ , 因 $Th$ 设置为0, 故 $\lambda_{\max L} = NCC$ 。

多级连续淘汰算法的伪代码

```
for each (x, y)
  for r=1 to  $\max L - 1$ 
    if  $\lambda_r(x, y) < NCC_{\max}$ 
      then skip (x, y)
    end
```

```

if NCC(x,y)>NCCmax
then NCCmax=NCC(x,y);
    Xmax=X;
    Ymax=Y;
end
return (NCCmax, Xmax, Ymax);

```

### 2 算法性能分析

#### 2.1 算法的鲁棒性分析

为验证所提出算法的鲁棒性，将其在 Intel P4 2.1G CPU、2G 内存的个人电脑上采用 C 语言及 MATLAB 编程进行了测试，从红外相机拍摄的飞机飞行的连续图像序列中选取一帧中的飞机图像作为模板图像，如图 4(a)所示。图 4(b)和图 4(c)显示了采用图 4(a)中的图像作为模板后，在图像序列的另外两帧中的匹配结果，其中十字中心表示匹配的中心位置。可以看出，提出的算法在图像存在尾焰干扰、均匀亮度变化及轻微形变和轻度噪声污染时仍能保证正确的匹配结果，具有较好的鲁棒性。

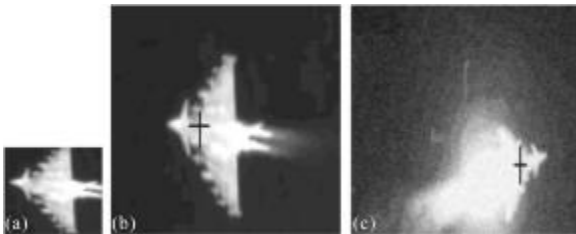


图 4 提出算法的匹配结果  
Fig.4 Matching results of proposed algorithm

#### 2.2 算法的效率分析

图 5(b) (320\*256 pixel) 中的 A、B 两块区域分别为同图 5(a) (32\*32 pixel) 最匹配和不匹配的同大小的区域。图 6(a) 为图 5(b) 中以 A 为中心，和模板图 5(a) 之间在一定区域范围内的相关曲面图，通过初始阈值估计，取得初始阈值位于图 6(a) 中 Th 处，阈值大小为 0.823。图 6(b) 展示了对图 5(b) 中区域 B 进行匹配计算得到的 NCC 的上界值，可以看出自适应多极分区的第 10 级时，因为上界值小于初始阈值，所以可以淘汰该候选区域，从而不需要直接计算该区域和模板之间的 NCC 值，而通过计算上界较早地淘汰了非匹配点。图 6(c) 展示了 MSEA 分区方法计算得

到的 NCC 的上界值和提出算法的上界值之间的关系，可以看出，提出的算法比 MSEA 分区方法具有更多的分级层数，提供了一个更加严格的边界，利用这些上界值可以早期淘汰更多的非匹配区域，从而避免直接计算 NCC 所带来的巨大的计算量，节省计算时间。

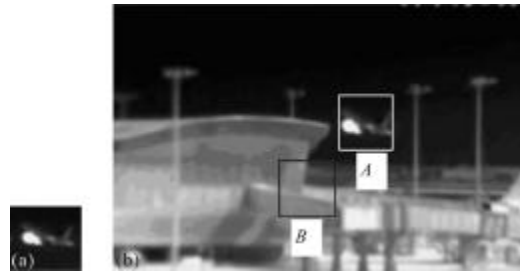


图 5 模板图和原始图  
Fig.5 Template image and original image

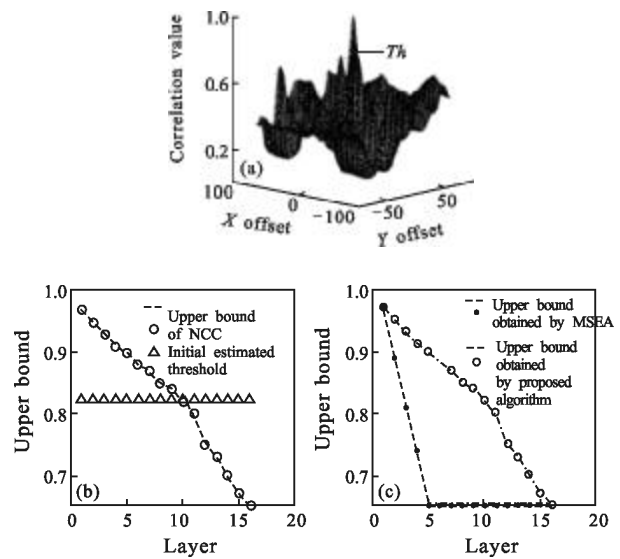


图 6 提出算法的性能  
Fig.6 Performance of the proposed algorithm

#### 2.3 算法执行时间比较

为了验证提出算法的计算效率，文中将所提出算法的执行时间和全局搜索算法、部分相关算法 (BPC) 及 EBC 算法的执行时间进行了比较。

在实验中，采用的模板图及原始图分别为图 5(a) 和图 5(b)。表 1 展示了选用不同大小的原始图及模板图后各算法的执行时间，可以看出所提出算法在执行时间上明显优于传统算法。

表 1 各算法执行时间(单位: ms)

Tab.1 Execution time of each algorithm (Unit: ms)

Source image	Template image	Algorithm	Average response time
Fig.5(a)	Fig.5(c)	FS	690
		BPC	507
		EBC	39
		Proposed algorithm	25

### 3 结 论

文中提出了一种基于 NCC 测度的模板匹配算法。将自适应连续多级分区方法结合初始阈值估计实现高效计算。自适应连续多级分区利用图像的复杂度实现高效的子模块的划分,提供了一个比 MSEA 更严格的边界,而且可以在较早阶段跳过更多的非匹配点的搜索;初始阈值估计产生了一个较大的边界阈值,有效地抑制了开始阶段搜索点的数目。实验结果表明,提出的算法在整体光照变化、轻微辐射干扰和轻度噪声污染时仍具有较好的鲁棒性,而且在算法执行速度方面优于传统算法。

#### 参考文献:

- [1] Yan Yuzhuang, Huang Xinsheng. Redudant multiple sub-template matching based on kernel weighted histogram [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (9): 2543-2549. (in Chinese)
- [2] Di Nan, Li Guiju, Wei Yajun. Image matching technology based on SIFT for terminal-guiding system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8): 1589-1593. (in Chinese)
- [3] Shinichiro O, Masako O. Fast template matching with polynomials [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(8): 2139-2149.
- [4] Kadyrov A, Petrou M. The 'invaders' algorithm: Range of values modulation for accelerated correlation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analyse and Machine Intelligence*, 2006, 28(10): 1882-1886.
- [5] Gao X Q, Duanmu C J, Zou C R. A multilevel successive elimination algorithm for block matching motion estimation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 9(2): 510-504.
- [6] Wang C, Yang S, Fuh C. Fast block matching algorithm based on the winner-update strategy [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, 10(8): 1212-1222.
- [7] Lewis J P. Fast template matching[J]. *Vis Interface*, 1995, 1(1): 120-123.
- [8] Kadyrov A, Petrou M. The 'invaders' algorithm: Range of values modulation for accelerated correlation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analyse and Machine Intelligence*, 2006, 28(11): 1882-1886.
- [9] Mattoccia S, Tombari F, Stefano L D. Fast full search equivalent template matching by enhanced bounded correlation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2008, 17(4): 528-538.
- [10] Di Stefano L, Mattoccia S. Fast template matching using bounded partial correlation[J]. *Mach Vis Appl*, 2003, 13(4): 213-221.
- [11] Di Stefano L, Mattoccia S. A sufficient condition based on the Cauchy-Schwarz inequality for efficient template matching [C]//*IEEE Int Conf Image Processing*, 2003: 14-17.