

基于人工靶向免疫疗法的红外手部痕迹目标提取

付冬梅* 孙静 杨焘

(北京科技大学自动化学院 北京 100083)

摘要: 红外手部热痕迹图像是特殊的模糊图像,该文提出一种人工靶向免疫疗法对其进行手部目标提取。首先依据序列图像中像素灰度的变化趋势设计了先天性免疫识别进行初分割;然后借鉴免疫的提呈机制,根据热扩散特性定义同心圆模板提取特征;基于模板特征对模糊像素集适应性免疫识别;最后,指尖指谷病变检测分析,实施靶向治疗,保证了手的形态特征。与分水岭、SOM网络以及近几年研究成果进行了比较,表明提出的算法在目标提取率、绝对误差率均优于现有算法,提取结果更符合手的形态,同时扩展了应用热痕迹信息的时间跨度。

关键词: 模糊红外图像;模板特征;免疫网络;靶向免疫疗法

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)02-0346-07

DOI: 10.11999/JEIT170282

Target Extraction of Hand Infrared Trace Images Based on Artificial Targeting Immunotherapy

FU Dongmei SUN Jing YANG Tao

(School of Automation and Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Hand infrared trace images can not clearly reflect the original contact contour of hand, which belong to a special kind of infrared blurred images. Inspired by biological immune, an artificial targeting immunotherapy is proposed to extract the hand target. Firstly, according to the feature of temporal correlation, the innate immune recognition is designed to preliminary segmentation. Secondly, according to the immune presentation, a concentric circles template based on thermal diffusion is defined to extract features. Then adaptive immune recognition is applied to the fuzzy pixels set based on the obtained template features. Finally, for the detected finger valley and fingertips lesions, targeted therapy is implemented to keep the shape of the hand. The proposed algorithm is compared with watershed method, SOM network and recent research achievements. Experimental results show that the proposed algorithm exhibits better extraction performance, meanwhile the application time of thermal trace images is extended.

Key words: Blurred infrared images; Template features; Immune network; Targeted immunotherapy

1 引言

人手与一般室温条件下的物体接触传热,手离开后,被手覆盖区域的热散发过程可以被红外热像仪探测到,得到热痕迹序列图像。热痕迹的热散发过程涉及因素较多且关系复杂,很难用数学表达式来描述^[1,2]。如果可以直接有效地从图像中提取手部目标,将极大提高热痕迹的实际应用能力。但热痕迹图像由于热扩散作用,在目标边界附近会产生模糊区域,已不能明确、真实地反映手部的初始接触区域,给目标提取带来了困难。如何从此类特殊的

红外图像中提取目标,是红外技术应用急需解决的问题,且国内外的研究相对较少。在2014年,文献[3,4]将先天性免疫与适应性免疫相结合,提出协调免疫模板提取算法,取得了较好的效果,但没有考虑序列图像的时间特性。2015年,李辉^[5]提出了一种可扩展的立体模板提取图像特征,给出了基于投票的类别判断机制。同年,文献[6]提取像素的时序变化趋势作为像素的立体化特征,设计边缘检测的描述子进行类别判断。这些研究虽然证明了对于热痕迹图像的目标提取,人工免疫算法比其他算法有优势,但手部提取结果变形较大,视觉效果并不理想。

人工免疫算法是受生物免疫启发,通过对免疫学功能、原理和模型的模拟来解决实际问题^[7]。生物免疫系统包括先天免疫和适应性免疫。先天性免疫根据抗原原始特征进行识别,不能被先天性免疫识别的抗原,经过抗原提呈细胞(Antigen-Presenting

收稿日期:2017-04-01;改回日期:2017-09-18;网络出版:2017-12-04

*通信作者:付冬梅 fdm2003@163.com

基金项目:国家自然科学基金(61272358),北京市重点学科共建项目(XK100080537)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61272358), Beijing Key Discipline Development Program (XK100080537)

Cell, APC)进行加工, 提供给适应性免疫识别^[8]。但免疫系统自身也会对机体产生危害, 免疫功能的缺陷导致病原体入侵产生疾病, 免疫功能的亢进会导致过敏反应疾病, 都会给机体带来损害。医学上, 免疫治疗是目前最具科技含量的前沿治疗技术, 其中靶向免疫治疗针对性强, 副作用少, 可以更准确地杀灭抗原^[9]。

人工免疫算法在图像处理中有着广泛应用。2010年, Mehrad E 等人^[10]应用免疫算法提取车辆目标。2010年, 文献[11]引入 Logistic 混沌变异, 有效减少了数据冗余。2013年, 文献[12]提出了基于强化学习的人工免疫分类器。2015年, Zhao 等人^[13]提出基于人工免疫关联规则挖掘(ARM-AIN)的 SAR 图像分割方法。2017年, Ahmadi 等人^[14]使用 AIS 来搜索嵌入消息位的最佳模板, 提出了一种基于 AIS 的图像隐写算法。

本文借鉴生物免疫运行机制, 根据红外手部序列图像特性和热扩散的特性。首先, 以生物先天性免疫的抗原识别, 图像像素初分割为确定像素集和待分类像素集。然后, 根据免疫提呈机理, 定义了基于热扩散的同心圆模板提取特征。适应性免疫基于获得的模板特征对模糊像素集进行识别。最后借鉴靶向免疫疗法, 对分割结果进行病变分析, 指尖指谷靶点检测, 设计形态学算子作为免疫药物, 实施靶向免疫治疗。实验表明, 相比于已有方法, 本文方法提高了目标的提取精度, 高达 97.15%, 降低了误差率, 而且在时间上, 已有的研究主要处理手部离开后 120 s 内的图像, 本文具有更广的时间跨度, 可以应用到 180 s, 甚至更长时间内的热痕迹图像。

2 手部热痕迹图像的特性分析

热痕迹的热散发导致手的痕迹形态发生变形, 且边界模糊, 对其进行特性分析是后续处理的基础。根据离扩散边界距离, 将热痕迹图像像素点大致分为图 1(a)所示 4 部分: ①远离边界的目标集、②近

离边界的目标集、③近离边界的背景集、④远离边界的背景集。基于序列图像, 对 4 部分像素点进行灰度变化趋势分析, 如图 1(b)所示, 可见像素点灰度变化有着较大的差异:

(1)处于①②类的目标点, 温度降最大;

(2)处于③④类的背景点, 温度降较小;

(3)处于②③类的点近邻边界, 处于温度扩散的边缘, 也是手痕迹的主要形变点, 其温度较接近, 可区分度较差。研究的重点就是找到②③类分界线。

由以上分析可知, 热痕迹中像素灰度值有明显不同的变化趋势, 这是该类图像所具备的特点, 也是进行基于序列的热痕迹图像分割的重要依据。

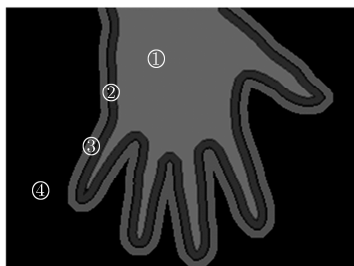
3 免疫协调网络

借鉴生物先天性免疫和适应性免疫的协调作用, 构造用于手目标提取的人工免疫协调网络。将图像像素描述为抗原集, 将像素的灰度、位置等看作抗原的表面分子结构模式。一些抗原在先天性免疫阶段被识别, 即初分割; 未能被直接识别的抗原经过免疫模板的加工处理, 提呈给适应性免疫进行识别。通过模拟先天性免疫与适应性免疫的协调作用实现手目标的提取。

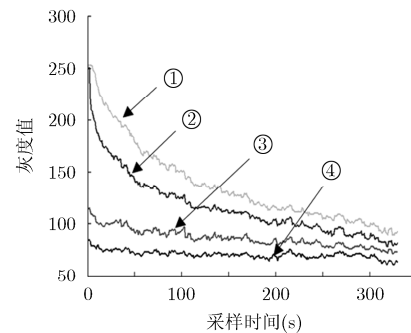
3.1 先天性免疫识别

对于先天性免疫识别, 文献[3]采用最大类间差法(Otsu)得到阈值 T , 设置 $T_1 = T + T_0, T_2 = T - T_0$ 将像素分为 3 个集合: 目标像素集、模糊像素集和背景像素集(待分割)。基于阈值的初分割, 只针对一张图像, 但热痕迹图像是一组序列图像, 有温度变化的特性, 阈值不具有适用性。而根据前一节对热痕迹图像特性的分析, 不同类别(目标或背景)的像素点有明显不同的变化趋势, 因此, 本文提出了一种基于像素时序相关性的先天性免疫识别算法。

图像大小 $m \times n$, 从中选取最大灰度值的像素作为参考点(最有可能为目标像素), 变化曲线如图 1(b), 设 l_r 为参考点的变化曲线, l_p 为位于 (s, t) , $(s = 1, 2, \dots, m, t = 1, 2, \dots, n)$ 的像素点的变化曲线。计



(a)模糊分区



(b)区域温度变化特性

图 1 手部痕迹灰度值变化趋势

算 l_r 与 l_p 皮尔逊相关系数 $r(s,t)$, ($s=1,2,\dots,m; t=1,2,\dots,n$), 将其作为该像素点的新特征值^[6], 如式(1):

$$r(s,t) = \frac{\sum (x - \bar{x})(y(s,t) - \overline{y(s,t)})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum (y_i(s,t) - \overline{y(s,t)})^2}} \quad (1)$$

其中, x 是参考点的趋势向量, $y(s,t)$ 是位于位置 (s,t) 的像素点的趋势向量。 \bar{x} 是向量 x 的均值, $\overline{y(s,t)}$ 是向量 $y(s,t)$ 的均值, i 表示趋势向量中第 i 个值, 即 $y_i(s,t)$ 前像素点在图像序列中第 i 幅图像中的灰度值(序列中共有 N 幅图像, 则 $i=1,2,\dots,N$)。

对于 $r(s,t)$, 采用最大类间差法(Otsu)得到阈值 r , 设置 $r_1 = r - r_0, r + r_0$, (r_0 为大于 0 的常数)。 r_1 和 r_2 将整个 $[0,1]$ 区间划分为 3 个子区间, 即 $R_1 = [0, r_1], R_2 = [r_1, r_2], R_3 = [r_2, 1]$, 分别对应背景集合 C_1 , 模糊集合 C_2 (待分类) 和目标集合 C_3 。

3.2 先天性免疫提呈

对于未能被直接识别的抗原, 要进行特征的处理表达, 即适应性免疫识别过程。这里设计模板作为先天性免疫提呈因子来表达像素的抗原肽-MHC 复合体分子特性。文献[15]定义 3×3 的方形模板确定像素的邻域区域, 提取特征。文献[5]定义可扩展的立体模板来提取序列图像的特征。对于温度扩散, 一个点的温度对周围点的影响会随着距离的增大而减小, 文献[5,15]提出的模板对此特性考虑不足。

对于温度扩散, 越靠近扩散中心的点受到的影响越大, 而且手的轮廓是圆滑的, 所以定义同心圆模板 g , 如图 2 所示, 内环 $B_1 = 3 \times 3$ 为硬核, 外环 $B_2 = 5 \times 5$ 为柔性边缘。

加权计算模板 g 的区域均值 m_g 、方差 d_g 作为模板中心点 (u,v) 的特征, 给予硬核 B_1 较大的权值, 柔性边缘 B_2 较小的权值。权值取决于模板 g 中像素点 (s,t) 与模板 g 中心点 (u,v) 的欧式距离。

每一模板 g 的区域均值 m_g 由式(2)给出:

$$m_g = \sum_{(s,t) \in g} w_{st} f(s,t) \quad (2)$$

其中, $f(s,t)$ 为模板 g 中任一像素点 (s,t) 的灰度值, w_{st} 为该像素点的权值。 w_{st} 定义如式(3):

$$w_{st} = \frac{1/\|(s,t) - (u,v)\|_2}{\sum_{(s,t) \in g} 1/\|(s,t) - (u,v)\|_2} \quad (3)$$

每一模板 g 的区域方差 d_g 由式(4)给出:

$$d_g = \frac{1}{25 \sum_{(s,t) \in g} (f(s,t) - m_g)^2} \quad (4)$$

经过模板的特征变换, 将原有的目标、背景和模糊抗原集转换为目标-MHC 复合分子集、背景-MHC 复合分子集和模糊-MHC 复合分子集, 进而对其进行适应性免疫识别。

3.3 适应性免疫识别^[15]

形态空间内的所有抗原肽-MHC 复合分子均具备特定的位置, 免疫因子只对在空中中一定范围内的抗原起到识别作用。免疫因子的识别范围被称为刺激球体。设计适应性因子的刺激球体, 对抗原肽-MHC 复合分子进行识别, 识别算法步骤如下^[10]:

步骤 1 目标-MHC 复合分子集和背景-MHC 复合分子集组成初始抗原-MHC 复合分子集 M ;

步骤 2 随机生成 α 个初始识别因子, 计算其与集合 M 中所有分子的欧氏距离作为亲和度。根据识别因子识别的同类分子的最远距离, 定义它的刺激球体半径 R 。则对每一个初始识别因子, 以自身为中心, 以 R 为半径, 构成了刺激球体。特征值在识别因子刺激球体内部的分子, 称为被此识别因子识别的复合分子;

步骤 3 计算每一个识别因子识别的抗原-MHC 复合分子数量, 选择识别分子数量最多的一个作为最优识别因子, 将识别因子识别的抗原-MHC 复合分子从集合 M 中删除;

步骤 4 重复步骤 2 到步骤 3, 直到 M 中只剩下一类复合分子, 作为最后一个识别因子;

步骤 5 将模糊-MHC 复合分子集输入适应性识别网络, 得到类别标记。适应性免疫识别结果与先天性免疫识别结果相结合, 从而得到免疫网络的提取结果。

4 靶向免疫疗法

靶向免疫疗法能产生针对某种抗原的抗体, 对抗原产生主动性、精确性、靶向性攻击, 最终彻底清除抗原, 而不波及正常细胞。针对手边缘的模糊性而导致提取结果准确性差的问题, 借鉴靶向免疫的思想, 对提取目标实施靶向免疫疗法, 使其更符

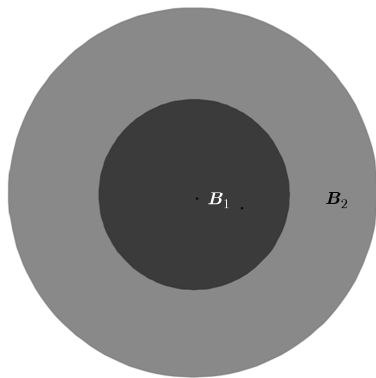


图 2 同心圆模板

合手的形态，尤其可提高手的指尖指谷部分的可区分程度。

4.1 靶点检测

在生物体中，机体是通过免疫系统来阻止病原体的侵入从而保持机体稳态的，但免疫系统自身也会对机体产生危害，免疫功能的缺陷导致病原体入侵产生疾病，免疫功能的亢进会导致过敏反应疾病，都会给机体带来损害。

在实验拍摄的手部红外热痕迹图像中，手部离开物体 1 s 时的图像能较真实可靠地反映手的轮廓，因此，采用人工分割的方法对手部离开物体 1 s 时的图像进行目标提取，提取结果作为手的参考标准图像(Ground Truth, GT)，如图 3 所示。

将免疫协调网络分割结果(黑色边界线)与参考标准图像(白色)进行对比，如图 4 所示，可以看出免疫识别错误。依据免疫机理定义病变类型，A 类病变：免疫功能缺陷，表现在手目标分割中为杀死背景抗原失败；B 类病变：免疫功能亢进，表现在手目标分割中为错误将目标识别为背景抗原进行杀死。指尖部分存在欠分割，免疫功能缺陷，指尖部分为 A 类病变；指谷部分过分分割，免疫功能亢进，指谷部分为 B 类病变。这里发生病变的位置作为靶点，在实施靶向免疫治疗前首先进行靶点检测。

本文根据曲线的外观特征，已知在离散曲线上，拐点处 k 个点间满足欧氏距离平方和局部最小这一性质^[16]，通过寻找目标边界上拐点定位靶点。算法步骤如下：

步骤 1 使用 Freeman 链码跟踪表示图像目标边界；

步骤 2 剔除目标边界上明显不可能是拐点的像素点。剔除准则如式(5)：

$$f_{i+2} - f_i = 0 \tag{5}$$

式中， f_i 为点 p_i 的 Freeman 链码值。 f_i 表示线段 $\overline{p_{i-1}p_i}$ 与 x 轴的夹角，若式(5)成立则可认为点 p_i 处切线的倾角变化为 0，该点不可能是拐点，剔除；

步骤 3 曲率元求拐点

设闭合曲线 C 含有 n 个像素点，即 $C = (p_i = (x_i, y_i), i = 0, 1, \dots, n-1)$ 。曲线 C 上点 p_i 的曲率元 d_i 定义为：以 p_i 为中心的 k 个点间欧氏距离的平方和，即式(6)：

$$d_i(k) = \sum_{j=1}^k \|p_{i-j}, p_{i+j}\|_2 \tag{6}$$

其中， $\|p_{i-j}, p_{i+j}\|_2$ 为点 p_{i-j} 和点 p_{i+j} 间的欧氏距离。

文献[16]证实曲率元性质：对某一拐点 p_c 来说，在以 p_c 为中心的 $2k+1$ 个点构成的曲线段中， p_c 处的曲率元最小。由性质可知，曲率元直方图上的波谷即为闭合曲线的拐点 p_{ci} ；

步骤 4 删除距离较近的拐点；

步骤 5 病变类型判断。

对于靶点 p_{ci} ，若： $\sum_{j=1}^k \text{mid}(p_{ci-j}, p_{ci+j}) > k/2$ ，则 p_{ci} 为 A 类病变，否则为 B 类病变。mid 为求中点像素值。

靶点提取结果如图 4 中的点所示，可以看出，随着时间的变化，A 类病变和 B 类病变愈加严重，对手型影响很大，需要对其进行靶向免疫治疗。

4.2 靶向免疫治疗

经过上一节的分析，手目标免疫识别结果存在 A 类和 B 类病变，对其实施靶向的治疗。

对于 A 类病变，免疫识别目标不足，需要增强免疫，设计形态学膨胀操作作为靶向药物。定义特异性的线性结构元素作为药物的特异性。以半径为 20 像素的圆^[17]作为结构元素，对二值图像进行开运算操作后，计算其重心作为手掌心(圆点)，以手掌心坐标确定手腕中心(十字点)，如图 5(a)。根据指尖与手腕中心点的连线方向确定线性结构元素的特异性，如图 5(b)。手指的宽度一般在 1.5~2.0 cm，根据定位的靶点，对其施加形态学膨胀靶向药物。

而对于 B 类病变，免疫识别结果过度，发生过敏反应，需要进行免疫抑制。这里将原背景(黑色)转换为目标，将 B 类病变转换为 A 类病变，从而可以利用 A 类病变处理方案进行治疗。结合靶向治疗



图 3 参考标准图像

图 4 病变提取结果

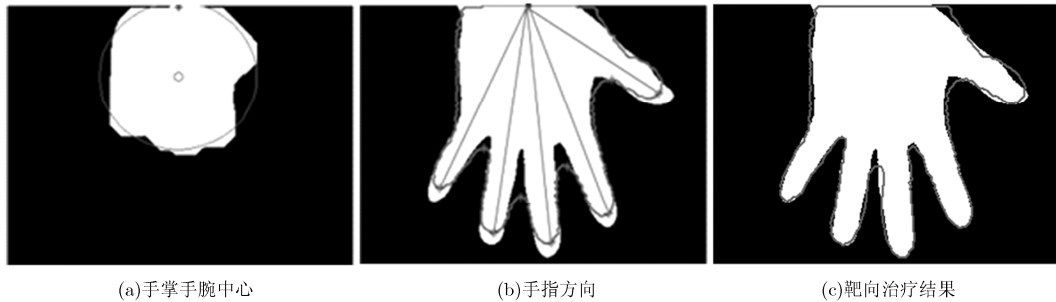


图 5 靶向治疗

得到综合治疗结果,即最终的手图像,如图 5(c)所示。

5 结果分析对比

本文所用的红外图像拍摄仪器为日本 Avionic 公司生产的 Infrared Thermal Imaging Camera H2640。拍摄环境条件:室内温度 27.8°C,相对湿度 49.3%,风速 0 m/s,木板厚度为 2 cm。每秒拍摄一张图像,图像共 328 张,记录了手离开木板后 328 s 内的手部痕迹。实际获取的热痕迹图像通常是手离开一段时间后的图像,因此本文针对 120 s, 150 s, 180 s 的图像,与分水岭算法、SOM 网络、流形正则化多核模型^[18]、文献[3]、文献[6]进行分割效果对比,其结果如图 6 所示。

将提取结果(Extracted Result, ER)与参考标准图像进行对比,提取结果像素点被分为 4 类: TP 表示被正确分割为目标的像素点的数目; TN 表示被正确分割为背景的像素点数目; FP 表示背景被错误分为目标的像素点数目; FN 表示目标被错误分为背景的像素点数目。采用以下定量评价标准对分割结果进行评价:

$J_{(GT,ER)} = \frac{TP}{TP + FN + FP}$, 目标重合度,越接近 1 提取效果越好^[19];

$D_{(GT,ER)} = \frac{2 \times TP}{TP + FN + TP + FP}$, 与 $J_{(GT,ER)}$ 类似^[20];

$Err = \frac{FP + FN}{TP + FN + TP + FP}$, 表示提取错误的像素点数占像素点总数的比例;

$Acc = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$, 表示被正确分类的像素点占像素点总数的比例^[6]。

本文算法与其他算法进行定量比较,结果如表 1 所示。

通过对比评价,分水岭算法和 SOM 网络对于 120 s 以内的图像有一定效果,但错误率较高。流形

表 1 120 s 图像结果评价(%)

提取理论	$J_{(GT,ER)}$	$D_{(GT,ER)}$	Err	Acc
分水岭	55.67	71.52	15.98	84.02
SOM 网络	81.79	89.99	6.37	93.63
流形正则化	84.00	91.00	5.30	94.70
平面模板 ^[3]	87.09	93.10	4.66	95.34
立体模板 ^[6]	87.73	93.46	4.67	95.33
本文方法	92.21	95.95	2.85	97.15

正则化的方法虽然错误率降低了,但效果不太明显。文献[3]基于模板的免疫协调网络,提取出的目标略好,但是手的形态较差,手指提取偏差大。文献[6]基于像素点时序特征,提取出的目标区域较为完整,但手指变形大。由表 1 可知,本文算法具有最大的 Acc 值,说明其目标提取率高于其他算法;而且本文算法 $J_{(GT,ER)}$ 和 $D_{(GT,ER)}$ 值最大,表明其提取结果与参考标准的重合度高于其他算法;而其 Err 最小,绝对误差率小于其他算法。文献[3,6]主要对手离开时间在 120 s 内的热痕迹图像得到了较好的提取,本文不仅对 120 s 内的图像得到了较准确的结果,并且对于 120 s 以后,以 180 s 图像为代表,同样得到了较高的提取精度,扩展了应用热痕迹信息的时间跨度。

6 结论

面对模糊红外图像的目标提取的难题,本文以红外人手热痕迹图像为具体的研究对象,提出了一种基于热痕迹像素灰度变化趋势的先天性免疫方法,建立了基于扩散距离的特征模板进行特征表达,并通过模拟先天性与适应性免疫协同作用进行模糊目标提取。进一步,基于免疫靶向治疗,针对结果中指谷指尖的病变,提出了基于形态学算子的靶点治疗。本文扩展了应用热痕迹信息的时间跨度,可以应用到 180 s 甚至更长时间的热痕迹图像,增强了红外技术的实际应用能力。通过与其他算法对比,

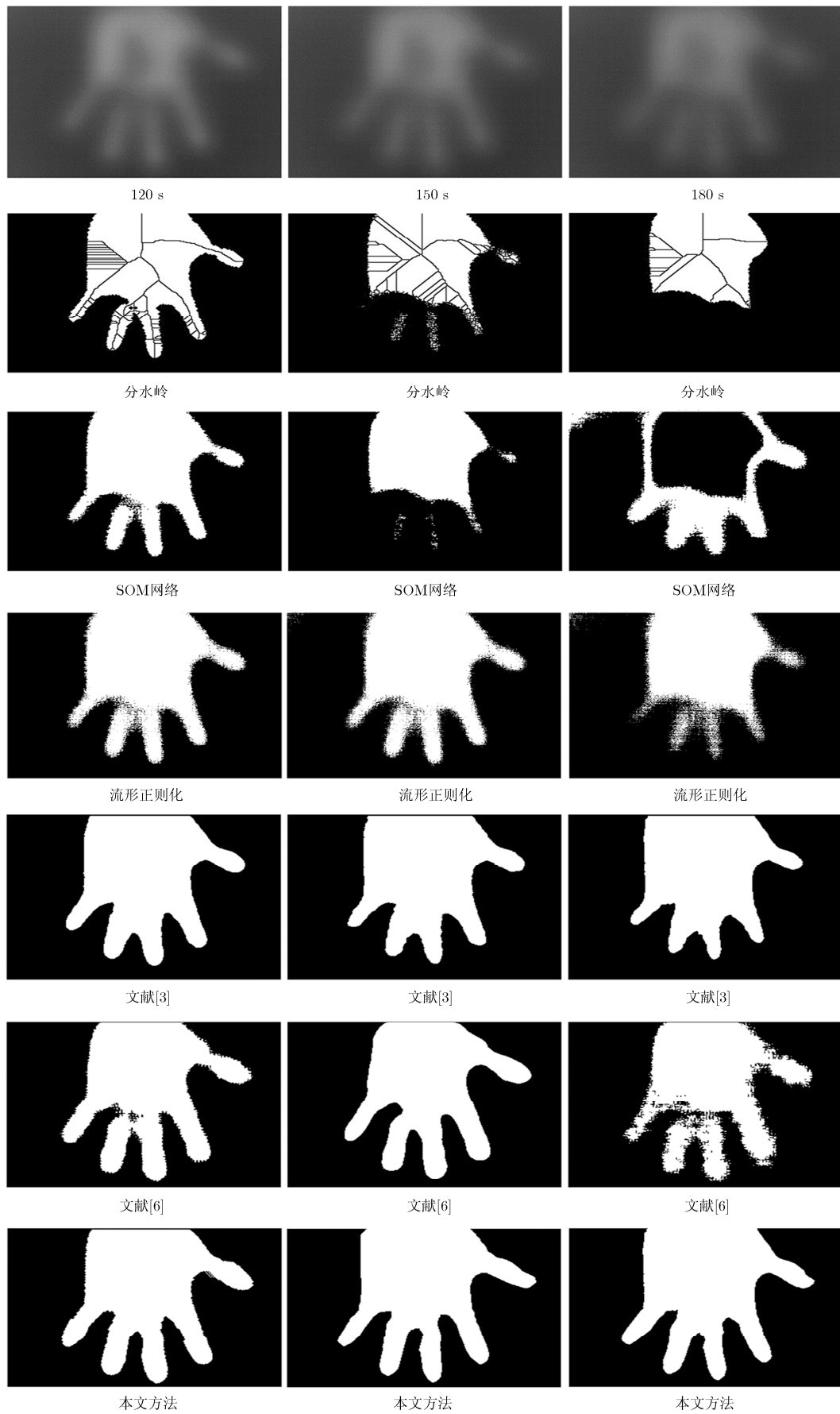


图 6 提取结果

本文算法不但使得目标的提取率和重合度优于其他算法, 绝对误差率小, 而且目标提取效果更加符合正常的人手形态。

参 考 文 献

- [1] XIONG Zonglong, YANG Kuntao, DING Wenxiu, *et al.* Computational and experimental research on infrared trace by human being contact[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(18): 3587-3595. doi: 10.1364/AO.49.003587.
 - [2] 韩玉阁, 成志锋, 任登凤, 等. 装甲车辆与地面背景的热交互作用及红外仿真[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(1): 20-25.
HAN Yuge, CHENG Zhiduo, REN Dengfeng, *et al.* Thermal interactions and infrared simulation of armored vehicles and ground background[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 20-25.
 - [3] FU Dongmei, YU Xiao, and TONG Hejun. Target extraction of blurred infrared image with an immune network template algorithm[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 56(1): 102-106. doi: 10.1016/j.optlastec.2013.07.019.
 - [4] 付冬梅, 于晓, 童何俊. 基于免疫模板聚类的模糊中波红外图像目标提取[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(3): 673-676. doi: 10.3964/j.issn.1000-0593(2014)03-0673-04.
FU Dongmei, YU Xiao, and TONG Hejun. Extracting target blurred midwave infrared image based on immune template clustering[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(3): 673-676. doi: 10.3964/j.issn.1000-0593(2014)03-0673-04.
 - [5] 李辉. 红外序列图像中手部痕迹目标提取的立体化模板研究[D]. [硕士论文], 北京科技大学, 2015.
LI Hui. Research on hand trace target extraction using 3D template from sequence infrared images[D]. [Master dissertation], University of Science and Technology Beijing, 2015.
 - [6] LI Hui, FU Dongmei, and YANG Tao. Hand target extraction from infrared images with descriptor based on pixel temporal characteristics[C]. 2015 8th International Congress on Image & Signal Processing(CISP), Changchun, China, 2015: 458-463.
 - [7] FAWAZ A A and ALLAHVERDI A. An artificial immune system heuristic for two-stage multi-machine assembly scheduling problem to minimize total completion time[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2013, 32(4): 825-830. doi: 10.1016/j.jmsy.2013.06.001.
 - [8] CHARLES A J, PAUL T, MARK W, *et al.* Janeway's Immunobiology[M]. 5th Version, Beijing China: Science Press, 2007: 107-140.
 - [9] SHARMA P, ALLISON J P, *et al.* Immune checkpoint targeting in cancer therapy: Toward combination strategies with curative potential[J]. *Cell*, 2015, 161(2): 205-214. doi: 10.1016/j.cell.2015.03.030.
 - [10] MEHRAD E and KARIM F. Automatic traffic monitoring from satellite images using artificial immune system[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2010: 170-179. doi: 10.1007/978-3-642-14980-1_16.
 - [11] AL-SHESHTAWI K A, ABDUL-KADER H M, and ISMAIL N A. Artificial immune clonal selection classification algorithms for classifying malware and benign processes using API call sequences[J]. *International Journal of Computer Science and Network Security*, 2010, 10(4): 31-39.
 - [12] KARAKOSE M. Reinforcement learning based artificial immune classifier[J]. *Scientific World Journal*, 2013, 2013: 581846. doi: 10.1155/2013/581846.
 - [13] ZHAO Mengling and LIU Hongwei. An associate rules mining algorithm based on artificial immune network for SAR image segmentation[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015: 1-14. doi: 10.1155/2015/839081.
 - [14] AHMADI S D and SAJEDI H. Image steganography with Artificial Immune System[C]. IEEE Artificial Intelligence and Robotics, Qazvin, Iran, 2017: 45-50. doi: 10.1109/RIOS.2017.7956442.
 - [15] 于晓. 红外图像中手部痕迹目标的提取研究[D]. [博士论文], 北京科技大学, 2014.
YU Xiao. Research on hand trace target extraction from infrared image [D]. [Ph.D. dissertation], Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2014.
 - [16] 尚振宏, 刘明业. 基于欧氏距离的拐点检测算法[J]. *计算机应用*, 2004, 24(10): 88-91.
SHANG Zhenhong and LIU Mingye. Corner detection algorithm based on Euclidean distance[J]. *Computer Applications*, 2004, 24(10): 88-91.
 - [17] 刘淑萍, 刘羽, 於俊, 等. 结合手指检测和 HOG 特征的分层静态手势识别[J]. *中国图象图形学报*, 2015, 20(6): 781-788. doi: 10.11834/jig.201506007.
LIU Shuping, LIU Yu, YU Jun, *et al.* Hierarchical static hand gesture recognition by combining finger detection and HOG features[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2015, 20(6): 781-788. doi: 10.11834/jig.201506007.
 - [18] 杨焘, 付冬梅. 流形正则化多核模型的模糊红外目标提取[J]. *工程科学学报*, 2016, 38(6): 876-885. doi: 10.13374/j.issn.2095-9389.2016.06.019.
YANG Tao and FU Dongmei. Extraction of blurred infrared targets based on a manifold regularized multiple-kernel model[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2016, 38(6): 876-885. doi: 10.13374/j.issn.2095-9389.2016.06.019.
 - [19] CÁRDENES R, BACH M, CHI Y, *et al.* Multimodal evaluation for medical image segmentation[C]. International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns, Vienna, Austria, 2007: 229-236. doi: 10.1007/978-3-540-74272-2_29.
 - [20] BABALOLA K O, PATENAUDE B, and ALJABAR P. An evaluation of four automatic methods of segmenting the subcortical structures in the brain[J]. *Neuroimage*, 2009, 47(4): 1435-1447. doi: 10.1016/j.neuroimage.2009.05.029.
- 付冬梅: 女, 1963年生, 教授, 研究方向为红外图像处理理论及应用、人工智能理论研究与应用、大数据分析。
孙 静: 女, 1992年生, 硕士生, 研究方向为红外图像处理理论及应用。
杨 焘: 男, 1987年生, 博士后, 研究方向为红外图像处理理论及应用、人工智能理论研究与应用、大数据分析。