

基于混合Powell法的太赫兹/可见光双波段图像配准

乔玉龙¹ 赵源萌² 张存林^{2*} 赵跃进¹ 武红¹

¹北京理工大学光电学院, 北京 100081

²首都师范大学物理系太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京市太赫兹波谱与成像重点实验室, 北京 100048

摘要 提出一种改进Powell法结合遗传算法的混合算法, 配准人体安检仪的太赫兹与可见光双波段图像。针对被动式太赫兹图像特征点难以提取的问题, 以互信息为相似性测度, 通过遗传算法寻优获取7个仿射变换参数的近似解并将其设置为改进Powell算法的初始点, 然后利用改进Powell法的局部搜索能力, 得到7个变换参数的精确解。利用单一遗传算法、单一Powell算法和本文混合算法分别对两组太赫兹和可见光图像进行配准。以均方根误差为评价标准对配准结果进行评价。实验结果证明, 相比于单一遗传算法和Powell算法, 该方法达到了更高的配准精度。能进一步用于太赫兹与可见光双波段图像融合, 以提高对衣物内藏匿物品的识别精度, 增强太赫兹人体安检仪的实用性。

关键词 成像系统; 图像配准; 被动式太赫兹成像; Powell法; 遗传算法; 互信息

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0211005

Terahertz/Visible Dual-Band Image Registration Based on Hybrid Powell Algorithm

Qiao Yulong¹ Zhao Yuanmeng² Zhang Cunlin² Zhao Yuejin¹ Wu Hong¹

¹School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

²Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education of China, Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China

Abstract A hybrid algorithm combining improved Powell algorithm with genetic algorithm is proposed for terahertz and visible dual-band image registration from human security check apparatus. Using mutual information as similarity measure to overcome the difficulty of extracting feature points from passive terahertz images. The approximate solutions of seven affine transformation parameters are obtained by genetic algorithm and set as the initial point of improved Powell algorithm, and then local search capabilities of improved Powell algorithm are used to obtain the exact solutions of seven transformation parameters. Single genetic algorithm, single Powell algorithm and the proposed hybrid algorithm are respectively used to registrate two groups of terahertz and visible images. Root-mean-square error is used as index to evaluate the registration results. The experimental results show that compared with single genetic algorithm and Powell algorithm, the proposed algorithm can achieve higher matching accuracy. The study can be further used for terahertz/visible dual-band image fusion, to improve the recognition accuracy of concealed object in clothes and enhance the practicability of terahertz human security check apparatus.

收稿日期: 2014-07-30; 收到修改稿日期: 2014-09-12

基金项目: 国家973计划(2014CB339806-1)、北京市教育委员会科技面上项目(KM201310028003)、光电成像技术与系统教育部重点实验室科研基地科技支撑计划项目(20120E10F04)

作者简介: 乔玉龙(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事太赫兹图像处理方面的研究。

E-mail: 270545980@qq.com

导师简介: 武红(1955—), 女, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事光电仪器、眼视光技术、太赫兹成像技术等方面的研究。E-mail: wuhong@bit.edu.cn

*通信联系人。E-mail: cunlin_zhang@cnu.edu.cn

Key words imaging systems; image registration; passive terahertz imaging; Powell algorithm; genetic algorithm; mutual information

OCIS codes 110.6795; 110.4155; 100.2000

1 引 言

太赫兹波一般是指频率范围为0.1~10 THz的电磁波。太赫兹波对塑料、纺织品以及皮革等材料具有很好的穿透性;太赫兹波光子能量低,对生物组织安全。因此,被动式太赫兹成像在人体安检领域具有实用性,可与传统的安检手段形成有效互补。近年来,太赫兹安检成像已经成为国内外研究的热点^[1-3]。2009年至今,已成功研发数台工作模式和性能指标不同的太赫兹人体安检仪^[4-6]。

将太赫兹图像与可见光图像配准后融合,既能体现场景、被检者外貌,又能检测到可能隐匿物品的信息,弥补单波段图像的不足,使安检图像更实用。因为太赫兹图像难以提取明显的特征点,所以可以利用太赫兹与可见光图像像素灰度的统计特征之间的相关性即互信息作为配准依据,使用优化算法进行参数寻优实现配准。以互信息为配准依据的配准算法,精度高,稳健性强,不用提取图像特征。目前使用较多的优化算法有模拟退火算法、蚁群算法、遗传算法、Powell法^[7-11]等。刘晓春等^[8]提出将局部信息频率和模拟退火算法结合用于异源图像配准,避免了算法陷入局部最优解,改善了传统方法的配准精度和稳定性;杨绪超等^[9]利用改进的蚁群算法和互信息结合对多光谱图像配准,使得算法对初始点选择没有依赖性,图像配准成功率高。遗传算法全局搜索能力强,但易早熟导致配准精度不够高;Powell法能达到更好的配准精度,但依赖于准确选取初始点。本文介绍一种遗传算法与改进的Powell算法相结合的混合算法,算法结合遗传算法的全局搜索优势和Powell算法的局部搜索优势,利用遗传算法获得仿射变换参数的近似解并设置为Powell算法的初始点,Powell算法迭代寻优得到仿射变换参数的精确解,从而获得相比于单一遗传算法和单一Powell法配准精度更高的图像。

2 互信息与配准变换模型

互信息是信息论里一种信息度量,应用于图像配准时,它是指两幅图像之间的相关性,可以用图像的熵表示为^[12]

$$M_i(A, B) = H(A) + H(B) - H(A, B), \quad (1)$$

式中 $M_i(A, B)$ 表示图像 A 与 B 的互信息值, $H(A)$ 、 $H(B)$ 分别是图像 A 、 B 的熵, $H(A, B)$ 是图像 A 和 B 的联合熵。计算各个熵需要分别计算图像 A 与 B 的联合概率分布 $P_{AB}(a, b)$, 以及它们的独立概率分布 $P_A(a)$ 、 $P_B(b)$, 其中 $a \in A, b \in B$ 。代入(1)式中求得互信息值。进行图像配准时,当两幅图像的空间位置完全一致时,互信息达到最大。为了便于计算太赫兹与可见光图像的互信息值,对可见光图像作形态学处理。采集的两幅可见光图像如图1(a)、(d)所示,相应的图1(b)、(e)是形态学处理后的图像。原始太赫兹图像如图1(c)、(f)所示。图1(b)与图1(c)的互信息值为0.3725,图1(e)与图1(f)的互信息值为0.3373。

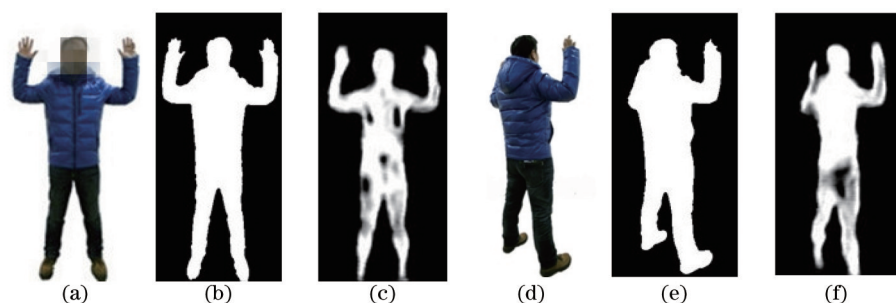


图1 可见光预处理图像及太赫兹图像。(a),(d)可见光图像;(b),(e)形态学处理;(c),(f)太赫兹图像

Fig.1 Visible image preprocessing and terahertz image. (a),(d) Visible images; (b),(e) morphological processing; (c),(f) terahertz images

两幅图像之间可用空间变换模型进行描述,采用仿射变换模型实现空间几何变换。仿射变换包括平移变换、缩放变换、旋转变换与应切变换,表1列出了它们的变换矩阵,其中 t_x 、 t_y 表示沿着 x 轴与 y 轴的平移,

s_x, s_y 表示沿着 x 轴与 y 轴的缩放, θ 表示旋转角度(顺时针), sh_x, sh_y 表示沿着 x 轴与 y 轴的应切。在平面内, 将一幅图像沿某个方向移动一定的距离, 称为平移变换; 将图像按照一定的参数缩小或者放大称为缩放变换; 将图像按照一定的角度旋转, 称为旋转变换; 将图像按照类似方形变平行四边形的过程, 任意一边都可拉长的变换称为应切变换。基于互信息的配准是一个多参数优化过程, 即搜索能使两幅图像互信息值最大的 7 个仿射变换参数。

表 1 仿射变换包含的 4 种变换

Table 1 Four kinds of transformation contained in affine transformations

	Transformational matrix
Transiation	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ t_x & t_y & 1 \end{bmatrix}$
Zoom	$\begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Rotate	$\begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Cut	$\begin{bmatrix} 1 & sh_x & 0 \\ sh_x & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

3 混合算法

遗传算法是一种全局化的优化算法, 采用遗传算法得到的通常是最优解附近的一个解, Powell 算法拥有局部寻优能力, 所以本文将遗传算法与改进后的 Powell 算法结合, 遗传算法为改进 Powell 算法提供了很好的初始点, 避免 Powell 算法陷入局部极值, 提高图像的配准精度。

3.1 遗传算法

遗传算法(GA)起源于对生物系统所进行的计算机模拟研究。Holland^[13]于 1975 年首先提出遗传算法并出版相关著作。遗传算法模拟了自然选择和遗传中发生的选择、交叉和变异等现象, 从任一初始种群出发, 通过随机选择、交叉和变异操作, 产生一群更适应环境的个体, 这样一代代繁衍进化, 最后收敛到一群最适应环境的个体, 得到最优解。作为一种全局优化算法, 它克服了传统优化方法容易陷入局部极值的缺点, 但遗传算法容易出现过早收敛。完整的遗传算法主要运算过程包括五步: 1) 编码; 2) 初始种群的生成; 3) 适应度值评价检测; 4) 选择、交叉、变异操作; 5) 终止条件的判断。

3.2 改进的 Powell 算法^[14]

最早由 Powell^[14]于 1964 年提出的 Powell 算法基本思想是: 把整个计算过程分为若干轮迭代, 每一轮迭代由 $n+1$ 次一维搜索组成; 在每轮迭代中, 先从初始点 $x^{(0)}$ 开始依次沿着已知的 n 个方向搜索, 得到一个最好位置, 然后沿本次迭代的初始点与该最好点连线的方向进行搜索, 求得这一阶段的最好点, 再改变初始点, 构造新的搜索方向, 开始新一轮的迭代, 以此类推直至达到迭代终止条件。在基于共轭方向的算法中, 保持 n 个搜索方向线性无关至关重要, Powell 算法却无法保证搜索方向的线性无关, 当变量很多时情况更是如此。为克服上述问题 Brent^[15]于 1973 年对 Powell 法做了修正, 提出了改进的 Powell 算法。改进的 Powell 算法与 Powell 算法的区别主要在于替换方向的规则不同。当初始搜索方向线性无关时, 改进的 Powell 算法能够保证每轮迭代中以搜索方向为列的行列式不为零, 因此这些方向都是线性无关的, 而且随着迭代次数的增加, 搜索方向的共轭程度逐渐增强。

3.3 混合算法实现配准

遗传算法与改进的 Powell 算法相结合的混合算法能够避免 Powell 算法陷入局部极值以及摆脱对于初始值的依赖性。该混合算法实现图像配准需要以参考图像与待配准图像的互信息值作为个体的适应度值和

相似性测度。然而随着图像像素的增多,利用联合直方图计算图像之间互信息值的运算量变大。为提高计算图像互信息值的速度,对原始太赫兹图像和可见光图像低通滤波。低通滤波后的图像分辨率降低,但很好的保留了原图像的基本特征,没有改变原图像像素点的位置,能有效提高图像之间互信息值的计算速度。利用遗传算法与改进 Powell 的混合算法进行图像配准具体步骤如下:

1) 将形态学处理后的可见光图像(参考图像 A)和太赫兹图像(待配准图像 B)低通滤波得到图像 A_0 和 B_0 。

2) 将仿射变换的 7 个参数 t_x 、 t_y 、 θ 、 s_x 、 s_y 、 sh_x 、 sh_y 进行二进制编码,精度要求为小数点后 4 位,参数变量区间为 $[-3,3]$, 对一个变量的二进制串位数(用 m_j 表示), 可以计算为^[16]

$$2^{m_j-1} < (b-a)*10^k \leq 2^{m_j} - 1, \quad (2)$$

式中 $[a, b]$ 为变量区间,精度要求为精确到小数点后 k 位。由于串长为正整数,根据(2)式,可知串长为 13 位。创建初始种群为 100, 变量个数为 7, 每个个体的基因总长度为 $7 \times 13 = 91$ 位, 初始种群由 100 个 91 位的二进制串组成。

3) 计算个体的适应度值。步骤 1) 中的 A_0 为参考图像, B_0 为待配准图像。初次迭代, 利用归一化的联合直方图计算 A_0 和 B_0 的互信息值, 两幅图像的联合直方图函数 h_{ab} 为^[17]

$$h_{ab}[a(i,j), b(i,j)] = n_{[a(i,j), b(i,j)]}, i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, N, \quad (3)$$

式中 $a(i,j)$, $b(i,j)$ 均为像素为 $M \times N$ 的图像, $n_{[a(i,j), b(i,j)]}$ 表示同一灰度值对出现的次数。可见, 联合直方图就是统计两幅图对应点的灰度级值对出现次数的函数。图像 A 与 B 的联合概率分布 $P_{AB}(a,b)$ 可用归一化的联合直方图函数表示为^[17]

$$P_{AB}(a,b) = \frac{h_{ab}[a(i,j), b(i,j)]}{\sum_{i,j} h_{ab}[a(i,j), b(i,j)]}, i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, N. \quad (4)$$

最后, 互信息值可表示为^[17]

$$M_i(A,B) = \sum_{a,b} P_{AB}(a,b) \log_2 \frac{P_{AB}(a,b)}{P_A(a)*P_B(b)}, \quad (5)$$

式中 $P_A(a)$ 、 $P_B(b)$ 分别为利用归一化直方图计算得出的图像 A 与 B 的独立概率分布。遗传算法会通过参数寻优获得初次迭代之后的 7 个仿射变换的参数值, 将得到的 7 个参数代入到表 1 的 4 种变换中对 B_0 进行仿射变换, 获得配准后的低通滤波的图像 B_0 ; 计算 B_0 与 A_0 的互信息值, 通过寻优获得更精确的 7 个参数的值代入变换公式获得新的图像, 开始新一轮的迭代, 以此类推直至达到迭代终止条件。随着迭代次数的增加, 仿射变换参数的值会越来越精确。遗传算法的参数选择: 选择算子采用轮盘赌选择法, 交叉方式采用离散交叉, 交叉概率为 0.8, 变异函数采用高斯函数, 停止条件参数中最大重复执行次数为 100, 停滞代数为 100。

4) 当达到迭代终止条件时, 得到经过遗传算法寻优的 7 个最佳变换参数。将参数代入表 1 的 4 个变换中对原始太赫兹图像 B 进行仿射变换, 得到经过遗传算法配准后的太赫兹图像 B_1 , 并且计算图像 B_1 与图像 A 的互信息值。

5) 给定允许误差 $\varepsilon = 10^{-4}$, 将步骤 4) 中得到的 7 个参数设置为改进的 Powell 算法的起始点 $x^{(0)} = [t_x, t_y, \theta, s_x, s_y, sh_x, sh_y]$, 7 个参数的值如表 2 所示。按照改进的 Powell 法的实现过程进行逐次迭代, 得到经过精确配准的太赫兹图像 B_2 并计算图像 B_2 与图像 A 的互信息值。遗传算法第一组图像如图 3(a) 所示, 遗传算法第二组图像如图 3(b) 所示。

遗传算法寻优所得仿射变换的 7 个参数的值如表 2 所示。

4 实验配准结果及评价

配准前首先对形态学处理后的可见光图像及太赫兹图像低通滤波, 低通滤波后的可见光图像如图 2(a)、(c) 所示, 低通滤波后的太赫兹图像如图 2(b)、(d) 所示。用遗传算法、单一 Powell 算法及遗传算与 Powell 算法结合

的混合方法对课题组研发的全反射式被动太赫兹扫描成像安检仪采集的两组图像[第一组:图 1(b)和图 1(c);第二组:图 1(e)和图 1(f)]分别进行配准。遗传算法配准后的太赫兹图如图 3(a)、(b)所示,单一改进 Powell 算法配准后的太赫兹图如图 4(a)、(b)所示,混合算法配准后的太赫兹图如图 5(a)、(b)所示。

表 2 遗传算法所得两组图像的仿射变换参数

Table 2 Affine transformation parameters of two group images obtained by genetic algorithm

	t_x	t_y	θ	s_x	s_y	sh_x	sh_y
Genetic algorithm group I	-2.2510	-5.7629	0.1671	1.0331	0.9890	-0.0115	-0.0014
Genetic algorithm group II	0.8300	-1.9409	-2.4196	1.0093	1.0534	-0.0716	0.0001

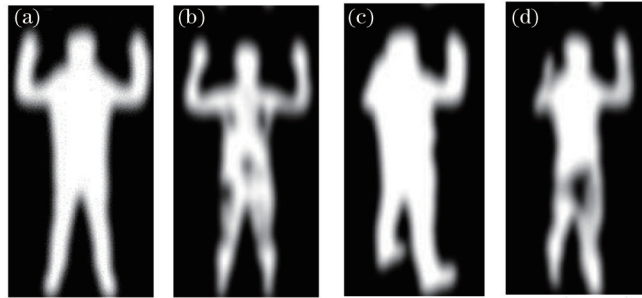


图 2 低通滤波后图像处理结果。(a)可见光图像(group I); (b)太赫兹图像(group I); (c)可见光(group II); (d)太赫兹图像(group II)
Fig.2 Processed image after low-pass-filter. (a) Visible image (group I); (b) terahertz image (group I); (c) visible image (group II); (d) terahertz image (group II)

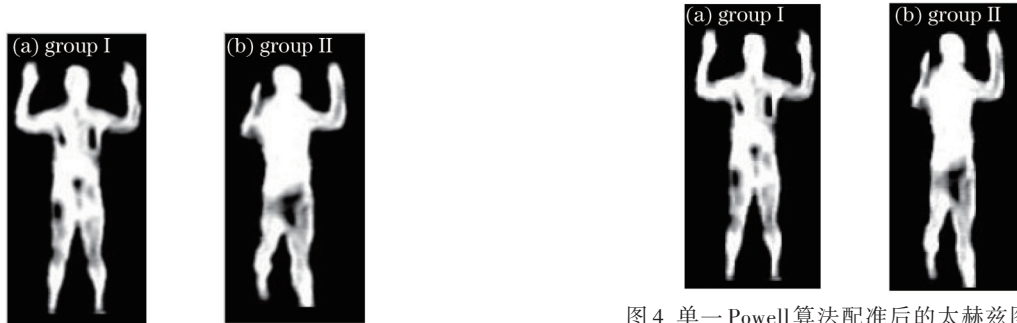


图 3 遗传算法配准后的太赫兹图像
Fig.3 Terahertz image after registration based on GA

图 4 单一 Powell 算法配准后的太赫兹图像
Fig.4 Terahertz image after registration based on single Powell algorithm

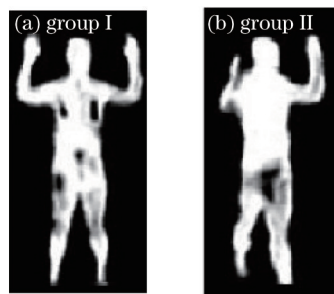


图 5 混合算法配准后的太赫兹图像

Fig.5 Terahertz image after registration based on hybrid algorithm

采用均方根误差 (R_{MSE}) 作为客观评价标准对配准效果进行评价。均方根误差可表示为^[18]

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N [B(i,j) - A(i,j)]^2}{M \times N}}, \quad (6)$$

式中 $A(i,j)$ 表示参考图像的像素点的灰度值, $B(i,j)$ 表示配准后图像的像素点的灰度值, $M \times N$ 表示图像尺寸。 R_{MSE} 的大小反映了匹配点集合与变换模型的契合程度。理论上,若参考图像与待配准图像之间的变换关系与假设

的变换模型严格一致,则 R_{MSE} 的值越小,说明匹配度越高;反之, R_{MSE} 的值越大,说明特征点定位产生偏差,配准精度越低。使用单一遗传算法(GA)、单一 Powell算法和混合算法配准后的两组图像的均方根误差和运行时间如表 3 所示,第一组图像(Group I)为图 3(a)、图 4(a)、图 5(a),第二组图像(Group II)为图 3(b)、图 4(b)、图 5(b)。

由表 3 可知,基于混合算法配准后的图像其均方根误差要明显小于单独使用遗传算法和改进 Powell算法配准后的图像的均方根误差。因此混合算法的配准精度要高于遗传算法和改进 Powell算法的配准精度。对表 3 中三种算法的运行时间进行比较,相比于其他两种算法,混合算法的运行时间要长,这是由于混合算法将两种单一算法结合起来,其中用于对图像进行粗配准的遗传算法占据了主要的运行时间。

表 3 不同方法配准图像的均方根误差和运行时间

Table 3 R_{MSE} and run time based on different for image methods registration

	R_{MSE} (GA)	R_{MSE} (Powell)	R_{MSE} (hybrid algorithm)	Time (GA) /s	Time (Powell) /s	Time(hybrid algorithm) /s
Group I	72.1689	69.6569	63.3260	55.915	15.469	63.261
Group II	88.5436	76.7993	71.0910	74.521	31.937	81.838

5 结 论

为实现太赫兹图像与可见光图像的精确配准,以互信息作为相似性测度,采用遗传算法与改进的 Powell法相结合的混合方法对两个波段图像进行配准,并与使用单一遗传算法、单一 Powell算法对两组图像配准的结果进行对比。实验结果表明,相比于单一遗传算法和单一 Powell算法,混合算法配准后第一组图像的均方根误差分别减小了 12.3%和 9.1%,混合算法配准后第二组图像的均方根误差分别减小了 19.7%和 7.4%,因此本文混合算法提高了配准精度。该算法运行速度关键在于遗传算法,在今后的工作中,将对遗传算法进行改进,期望可以提高配准速度,并在此基础上对两个波段图像进行融合。

参 考 文 献

- 1 L Guo, C Deng, Y Zhao, *et al.*. Passive terahertz imaging for security application [C]. ISPDI 2013-Fifth International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging. International Society for Optics and Photonics, 2013: 89090S-6.
- 2 A Luukanen, R Appleby, M Kemp, *et al.*. Millimeter-Wave and Terahertz Imaging in Security Applications [M]. Berlin: Springer, 2013. 491-520.
- 3 A Luukanen, L Grönberg, M Grönholm, *et al.*. Real-time passive terahertz imaging system for standoff concealed weapons imaging [C]. SPIE Defense, Security and Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2010: 767004-767004-8.
- 4 Deng Chao, Zhang Cunlin, Liang Laishun, *et al.*. A terahertz wave imaging system: CN, 102681023[P]. 2012-09-19.
邓 朝,张存林,梁来顺,等.一种太赫兹波成像系统:中国,102681023[P]. 2012-09-19.
- 5 Deng Chao, Zhang Cunlin, Liang Laishun, *et al.*. A terahertz wave imaging device: CN, 102681022[P]. 2012-09-19.
邓 朝,张存林,梁来顺,等.一种太赫兹波成像装置:中国,102681022[P]. 2012-09-19.
- 6 Zhang Xin, Zhao Yuanmeng, Deng Chao, *et al.*. Study on passive terahertz image target detection [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0211002.
张 馨,赵源萌,邓 朝,等.被动式太赫兹图像目标检测研究[J].光学学报,2013,33(2): 0211002.
- 7 Han Guangliang. Alignment between different source images by high frequency vector matching [J]. Chinese Optics, 2011, 4(5): 468-473.
韩广良.高频信息矢量匹配实现异源图像配准[J].中国光学,2011,4(5): 468-473.
- 8 Liu Xiaochun, Zhong Tao, Yu Qifeng, *et al.*. Multi-modal image registration based on local frequency information using modified simplex-simulated annealing algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0615002.
刘晓春,钟 涛,于起峰,等.基于局部频率信息和单纯型模拟退火的异源图像配准[J].光学学报,2013,33(6): 0615002.
- 9 Yang Xuchao, Wang Jingdong, Li Peng. Multi-spectral images registration based on improved ant colony algorithm and mutual information [J]. Infrared Technology, 2011, 32(1): 41.
杨绪超,王敬东,李 鹏.基于改进蚁群算法和互信息的多光谱图像的配准[J].红外技术,2011,32(1): 41.
- 10 Zou Xiaobo, Zhao Jiewen. Methods of characteristics wavelength region and wavelength selection based on genetic algorithm [J].

- Acta Optica Sinica, 2007, 27(7): 1316–1321.
- 邹小波, 赵杰文. 用遗传算法快速提取近红外光谱特征区域和特征波长[J]. 光学学报, 2007, 27(7): 1316–1321.
- 11 Ding Haiyong, Bian Zhengfu. A sub-pixel registration approach based on powellalgorithm [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(12): 3322–3327.
- 丁海勇, 卞正富. 基于 Powell 算法的亚像元配准方法[J]. 光子学报, 38(12): 3322–3327.
- 12 C Studholme, D L G Hill, D J Hawkes. An overlap invariant entropymeasures of 3D medical image alignment [J]. Pattern Recognition, 1999, 32(1):71–86.
- 13 J H Holland. Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence [M]. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.
- 14 M J D Powell. An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives [J]. The Computer Journal, 1964, 7(2): 155–162.
- 15 R P Brent. Algorithms for Minimization Without Derivatives [M]. New York: Dover Publications, 1973. 78–81.
- 16 Lei Yingjie, Zhang Shanwen, Li Xuwu, et al.. Matlab Genetic Algorithm Toolbox and Application [M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2005. 15–19.
- 雷英杰, 张善文, 李续武, 等. Matlab 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005. 15–19.
- 17 Chen Xianyi. Image Registraiton Technique and Matlab Programming [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2009. 144–147.
- 陈显毅. 图像配准技术及其 Matlab 编程实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009. 144–147.
- 18 Li Qi, Yin Qiguo, Ding Shenghui, *et al.*. Simulation of continuous-wave THz scanning image denoising based on markov random field [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(s1): 229–233.
- 李 琦, 尹奇国, 丁胜晖, 等. 基于马尔可夫随机场的太赫兹扫描图像去噪算法仿真研究[J]. 中国激光, 2010, 37(s1): 229–233.

栏目编辑: 苏 岑