

文章编号 1004-924X(2017)02-0477-08

## 基于超分辨率重建的亚像素图像配准

李方彪<sup>1,2\*</sup>, 何 昕<sup>1</sup>, 魏仲慧<sup>1</sup>, 马 鑫<sup>1,2</sup>

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**针对低分辨率图像在配准过程中精度较低的问题,提出了一种基于超分辨率重建的亚像素图像配准方法。首先,对具有 1 至 9 像素位移的图像序列进行 10 倍降采样,获取具有 0.1 至 0.9 亚像素位移的图像序列。然后,根据图像的获取过程建立数学模型,以 Bayes 理论为基础,使用最大后验概率法(MAP)对亚像素位移低分辨率图像进行超分辨率重建,获取高分辨率图像。最后,使用具有亚像素配准精度的扩展相位相关法对图像进行配准。配准实验与噪声实验表明,所提方法的最大配准误差为 0.03 pixel,能实现对低分辨率图像的亚像素级配准,具有配准精度高、噪声抗干扰能力强等特点,可同时满足可见光图像与红外图像的高精度配准要求。

**关键词:**超分辨率重建;相位相关;亚像素;图像配准

**中图分类号:**TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172402.0477

## Sub-pixel image registration based on super resolution reconstruction

LI Fang-biao<sup>1,2\*</sup>, HE Xin<sup>1</sup>, WEI Zhong-hui<sup>1</sup>, MA Xin<sup>1,2</sup>

- (1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
  2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)
- \* *Corresponding author, E-mail: lifangbiao1215@163.com*

**Abstract:** Considering the low precision of low-resolution image used for the registration process, a sub-pixel image registration method based on super resolution reconstruction was put forward. Firstly, 10 times down-sampling was carried out in the image sequence with 1~9 pixel displacement to obtain an image sequence with 0.1~0.9 sub-pixel displacement; then, a mathematical model was built in accordance with the image acquisition process, and Maximum A-Posteriori (MAP) method was used to carry out super resolution reconstruction in low-resolution image of the sub-pixel displacement to obtain high-resolution image based on the Bayes Theory; finally, the extended phase correlation method with sub-pixel registration accuracy was applied to conduct image registration. The registration and noise experiments indicate that the maximum registration error is 0.03 pixel. The proposed method has high registration accuracy and strong anti-noise ability. It can realize the sub-pixel registration for low-resolution image, at the same time, it can meet the requirements for high-accuracy reg-

收稿日期:2016-07-21;修订日期:2016-09-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60878052)

istration of visible image and infrared image.

**Key words:** super resolution reconstruction; phase correlation; sub-pixel; image registration

## 1 引言

图像配准即通过空间变换,对含有相同场景或目标的不同图像进行运动参数估计。目前,图像配准已广泛应用于遥感探测<sup>[1]</sup>、医学图像分析<sup>[2]</sup>、图像拼接及图像超分辨率重建<sup>[3,4]</sup>等领域。图像配准的精度将直接影响后续应用<sup>[5]</sup>,如多源遥感图像融合<sup>[6]</sup>就要求配准误差在亚像素级,否则就会出现小目标、细线目标等识别失效,融合图像边缘模糊的现象<sup>[7]</sup>;在基于图像序列的超分辨率重建技术中,亚像素运动的正确估计也是成功重建的前提<sup>[8]</sup>。

随着超分辨率遥感图像生成、高精度 3D 重建、视觉定位、医学图像分析等依赖于高精度图像配准应用技术的发展,亚像素图像配准技术得到了越来越多的关注。目前的亚像素图像配准方法主要分为 3 类:插值法<sup>[9]</sup>、扩展相位相关法<sup>[10]</sup>和最优化法<sup>[11]</sup>。与其他方法相比,相位相关法具有对灰度差和噪声不敏感的优点,而且由于避开了泰勒级数展开和寻优运算,故计算量小,另外,快速 Fourier 变换使得速度很快。

1975 年,Kuglin 等人提出了基于相位相关理论的图像配准方法,由于其具有强鲁棒性以及高计算速率,此方法一提出就得到了广泛关注。然而,Kuglin 等人的方法不能稳定估计具有旋转角度图像的运动,针对这一不足,Chen 等人于 1994 年提出了基于 Fourier-Mellin 变换的图像配准方法,该方法将极坐标变换引入到相位相关法中,拓展了相位相关法的适用范围<sup>[12]</sup>。2002 年,Forooh 等人又进一步提出了扩展相位相关法<sup>[13,14]</sup>,将相位相关法的配准精度提高到了亚像素级。

由于图像配准精度在很大程度上由图像分辨率及细节信息决定,因此,本文提出了一种结合超分辨率重建的亚像素图像配准方法。在图像配准前先对图像进行超分辨率重建,来提高图像分辨率及细节信息,从而提高图像配准精度。文章还

通过实验验证了所提方法的精度和抗噪性能。

## 2 图像超分辨率重建

图像分辨率是衡量图像质量的重要指标,分辨率越高,图像所含的场景信息越丰富、场景细节越清晰,而场景细节在应用中往往起着重要的作用<sup>[15]</sup>。如在图像配准中,更多更清晰的细节信息能提供更高的配准精度。图像超分辨率重建技术是以已有的低分辨率图像为基础,通过信号处理方法获取高分辨率图像的方法,其能有效提高图像的分辨率<sup>[16]</sup>。超分辨率重建可分为单帧图像重建与多帧重建<sup>[17]</sup>,现有的单帧重建方法主要分为 3 类:基于插值、基于迭代和基于学习的重建方法<sup>[18,19]</sup>。

### 2.1 图像观测模型

图像观测模型用于描述理想图像与观测图像之间的关系,如图 1 所示。

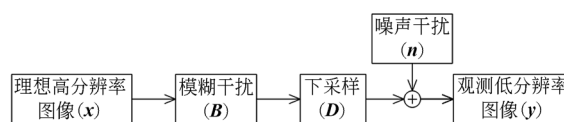


图 1 单帧图像退化模型

Fig. 1 Degradation process of single image

图像观测模型的数学表达式为:

$$y = \mathbf{D}\mathbf{B}\mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (1)$$

其中  $y$  为观测低分辨率图像,  $x$  为待重建高分辨率图像,  $\mathbf{D}$  和  $\mathbf{B}$  分别表示下采样矩阵和模糊矩阵,  $\mathbf{n}$  表示加性噪声。将下采样矩阵  $\mathbf{D}$  与模糊矩阵  $\mathbf{B}$  合为退化矩阵  $\mathbf{H}$ , 则图像观测模型可表示为:

$$y = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}. \quad (2)$$

图像的观测模型描述了从理想高分辨率图像到观测低分辨率图像的正过程,而图像超分辨率重建则是其逆过程,即利用观测到的低分辨率图像重建出高分辨率图像的过程。

### 2.2 超分辨率重建

最大后验估计 (Maximum A Posterior, MAP) 超分辨率重建由于具有唯一解、易引进图

像先验知识和空间观测模型,以及收敛性和鲁棒性较好的优点,在各类超分辨率重建方法中均得到了广泛的应用和发展<sup>[20]</sup>。MAP 指以低分辨率图像  $y$  为条件,使高分辨率图像  $x$  出现的后验概率  $\Pr(x|y)$  达到最大,即:

$$\hat{x} = \arg \max_x \{\Pr(x|y)\}, \quad (3)$$

根据 Bayes 公式,则有:

$$\hat{x} = \arg \max_x \left\{ \frac{\Pr(y|x)\Pr(x)}{\Pr(y)} \right\}. \quad (4)$$

由于低分辨率图像  $y$  在后验概率模型下不影响  $x$  的估计,于是有:

$$\hat{x} = \arg \max_x \{\Pr(y|x)\Pr(x)\}, \quad (5)$$

对上式右边取对数,可得:

$$\hat{x} = \arg \max_x \{\log \Pr(y|x) + \log \Pr(x)\}, \quad (6)$$

其中,  $\Pr(y|x)$  描述了高分辨率图像存在时低分辨率图像出现的概率密度函数,由观测模型可知,  $\Pr(y|x) = \Pr(n)$  表示模型的噪声。通常假定观测模型噪声是均值为 0、方差为  $\sigma^2$  的高斯噪声,即:

$$\Pr(y|x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{\|y - \mathbf{H}x\|^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad (7)$$

同时,通常选择拉普拉斯先验表示高分辨率图像,即:

$$\Pr(x) = \exp\left\{-\left(\frac{\lambda}{2} \|\mathbf{Q}x\|^2\right)\right\}. \quad (8)$$

根据式(7)、(8)可得:

$$\hat{x} = \arg \min_x \{\|y - \mathbf{H}x\|^2 + \lambda \|\mathbf{Q}x\|^2\}. \quad (9)$$

### 3 图像配准

#### 3.1 相位相关法

相位相关法以 Fourier 平移特性为理论基础,建立频域相位差与空域平移之间的对应关系。假设  $f_2(x, y)$  为  $f_1(x, y)$  平移  $(x_0, y_0)$  的图像,即:

$$f_2(x, y) = f_1(x - x_0, y - y_0), \quad (10)$$

对式(10)两边分别进行 Fourier 变换,根据 Fourier 的平移特性,可得:

$$F_2(u, v) = F_1(u, v) \exp(-j2\pi(ux_0 + vy_0)). \quad (11)$$

两幅图像之间的归一化互功率谱  $P(u, v)$  可表示为:

$$P(u, v) = \frac{F_2(u, v) F_1^*(u, v)}{|F_2(u, v) F_1^*(u, v)|}$$

$$\exp(-j2\pi(ux_0 + vy_0)), \quad (12)$$

式中,  $F_1^*(u, v)$  为  $F_1(u, v)$  的复共轭。对两幅图像的互功率谱进行 Fourier 逆变换,可得脉冲函数  $\delta(x - x_0, y - y_0)$ 。理想状态下,该函数只在中心点  $(x_0, y_0)$  处为 1,其余位置都为 0。根据函数峰值分布,可求得图像平移参数  $(x_0, y_0)$ 。

#### 3.2 扩展相位相关法

当配准图像的相对运动为亚像素级时,相位相关法不能获取精确的位移参数,只能获取距精确位移  $(x_0, y_0)$  最近的整数级位移  $(x_0', y_0')$ 。为了进一步提高配准精度,许多学者提出了扩展的相位相关法<sup>[21]</sup>。Feroosh 等人假设配准图像是由具有整像素位移的高分辨率图像下采样所得,而高分辨率图像的整像素位移就反应为低分辨率图像的亚像素位移。空域的下采样可被看成频域的多相位分解,因此 Feroosh 等人通过功率谱的多相位分解来扩展相位相关法,从而获取亚像素级图像配准。

$\delta(x - x_0, y - y_0)$  为 Dirichlet 函数,其二维形式与二维 Sinc 函数近似,即:

$$p(x, y) = \frac{\sin \pi(x - x_0)}{\pi(x - x_0)} \frac{\sin \pi(y - y_0)}{\pi(y - y_0)}. \quad (13)$$

对于亚像素位移,两幅图像的互功率谱并不唯一集中在单峰上,而是集中在主峰及相邻副峰之上。其中  $p(0, 0)$  为主峰,  $p(1, 0)$ ,  $p(0, 1)$  等为副峰,根据上式可得:

$$p(0, 0) = \frac{\sin x_0 \pi}{x_0 \pi} \frac{\sin y_0 \pi}{y_0 \pi}, \quad (14)$$

$$p(1, 0) = \frac{\sin \pi(1 - x_0)}{\pi(1 - x_0)} \frac{\sin y_0 \pi}{y_0 \pi}, \quad (15)$$

$$p(0, 1) = \frac{\sin x_0 \pi}{x_0 \pi} \frac{\sin \pi(1 - y_0)}{\pi(1 - y_0)}, \quad (16)$$

根据式(14)、式(15)、式(16)可得:

$$x_0 = \frac{p(1, 0)}{p(1, 0) \pm p(0, 0)}, \quad (17)$$

$$y_0 = \frac{p(0, 1)}{p(0, 1) \pm p(0, 0)}. \quad (18)$$

式中的正负号由图像降采样因子的奇偶性决定。

### 4 实验结果与分析

为了验证文中算法的性能,本文分别使用可

可见光图像与红外图像进行实验。如图 2 所示,可见光图像的分辨率为  $1\,024\text{ pixel}\times 1\,024\text{ pixel}$ ,红外图像的分辨率为  $640\text{ pixel}\times 512\text{ pixel}$ ,分别对其进行 1 到 9 像素的平移,再进行 10 倍降采样,可得 10 帧亚像素位移量已知的可见光图像与红外图像。将原图像帧数标记为 1,具有 1 至 9 像素位移的图像帧数分别标记为 2 至 10。



(a)原始高分辨率图像

(a)Original high resolution image



(b)原始高分辨率红外图像

(b)Original infrared image with high resolution

图 2 原始实验图像

Fig. 2 Original experiment images

#### 4.1 图像配准实验

为了验证本文方法的配准精度,对超分辨率图像与低分辨率图像和插值图像的配准精度进行对比。低分辨率图像、插值图像与超分辨率图像如图 3,其中可见光图像的分辨率依次为  $102\times 102$ 、 $204\times 204$  和  $204\times 204$ ;红外图像分辨率依次为  $64\times 51$ 、 $128\times 102$  和  $128\times 102$ 。



(a)低分辨率图像

(a)Low resolution image



(b)插值图像

(b)Interpolation image



(c)超分辨率图像

(c)Super resolution image



(d)红外低分辨率图像

(d)LR infrared image



(e)红外插值图像

(e)IN infrared image



(f)红外超分辨率图像

(f)SR infrared image

图 3 配准实验图像

Fig. 3 Registration experiment images

由于图像间的真实位移已知,因此可以配准实验结果与真实位移的差值作为评价配准方法有效性的标准。

表 1 不同图像配准所消耗时间

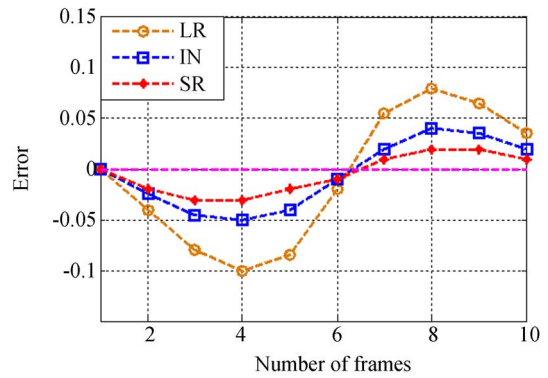
Tab. 1 Running-times of registration process for different images (s)

	LR Image	IN Image	SR Image
Visible	0.172	0.267	0.264
Infrared	0.160	0.169	0.162

表 1 为原始图像与具有 0~0.9 像素位移图像进行配准时总的运行时间。对于可见光图像,插值和超分辨率重建后的图像配准时间增量小于 0.1 s;而对于红外图像,插值和超分辨率重建后的图像配准时间增量小于 0.01 s。

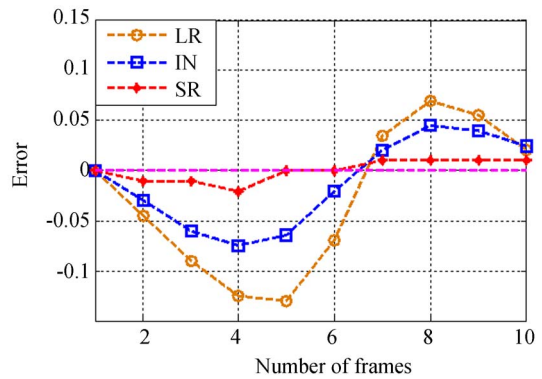
图 4 为低分辨率(LR)图像、插值(IN)图像以及超分辨率(SR)图像的配准误差对比图。图中横坐标表示具有亚像素位移(标记为 1 至 10)的图像序列,纵坐标表示标记为 1 至 10 的图像与图像 1 的配准误差。由图 1 可知,在可见光图像的配准实验中,LR 图像 IN 图像和 SR 图像的配准误差最大分别为 0.1、0.05、0.03 pixel。在红外图像配准实验中,LR 图像 IN 图像和 SR 图像的配准误差最大分别为 0.13、0.065 及 0.02 pixel。

实验结果表明,经过超分辨率重建后,图像的配准速度并没有受到太大影响,而配准精度却得到了很大的提高,无论在可见光图像还是在红外图像的配准中,超分辨率重建方法在配准精度上都具有很强的优势。



(a)可见光图像配准误差

(a)Registration errors of visible image



(b)红外图像配准误差

(b)Registration errors of infrared image

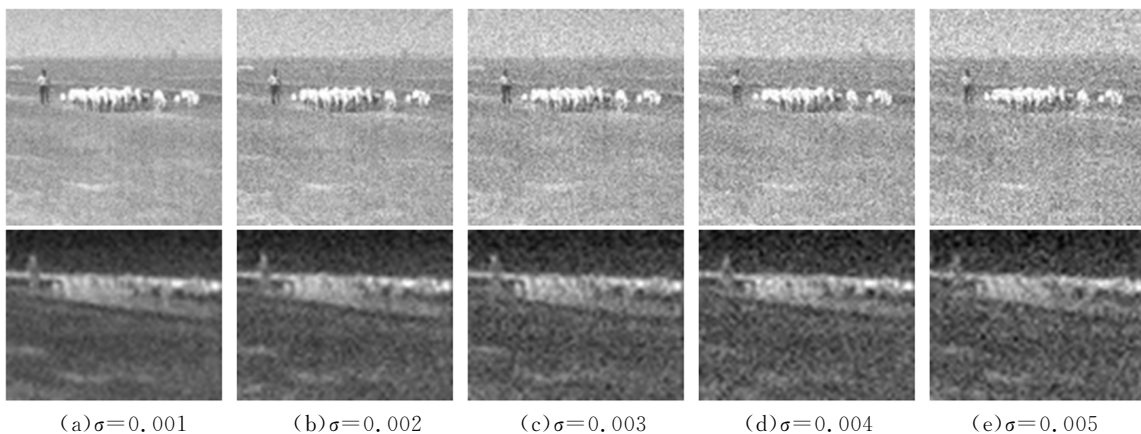
图 4 配准误差

Fig. 4 Registration errors

表 2 5 种等级高斯噪声

Tab. 2 Five levels of Gaussian noises

Variance	Level-1	Level-2	Level-3	Level-4	Level-5
Gaussian	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005



(a) $\sigma=0.001$

(b) $\sigma=0.002$

(c) $\sigma=0.003$

(d) $\sigma=0.004$

(e) $\sigma=0.005$

图 5 噪声图像

Fig. 5 Noisy images

## 4.2 噪声实验

在图像配准过程中,噪声是影响精度的重要因素。为了验证本文方法对噪声的抗干扰能力,选取不同噪声程度的图像进行实验。实验噪声是 5 种均值为 0,方差不同的高斯噪声,方差值如表 2 所示。

表 3 各种含噪声图像的平均配准时间

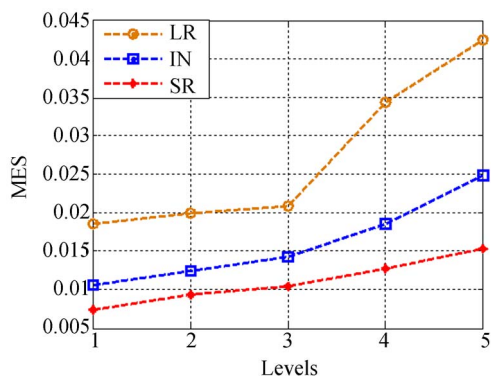
Tab. 3 Average running-times of registration for different noise images (s)

	LR Image	IN Image	SR Image
Visible	0.173	0.279	0.262
Infrared	0.165	0.174	0.169

表 3 为具有 5 种不同程度噪声的原始图像与位移为 0 至 0.9 像素图像配准时算法平均的总耗时。通过与表 1 对比可知,对图像添加噪声后,图像的配准时间几乎不变。

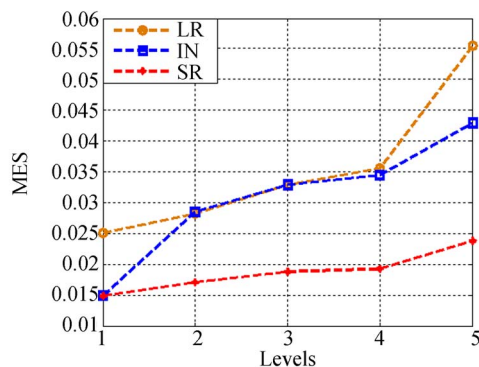
均方根误差 (MSE) 能有效评价配准算法的精度及稳定性,本文对可见光图像与红外图像分别加入 5 种不同程度噪声后所成图像进行配准,并分别计算其配准 MSE,结果如图 6 所示。

图 6 为不同等级噪声下的 MES 图,横坐标表示噪声等级,纵坐标表示为配准 MES。实验结果表明,对于所有的噪声图像,超分辨率图像配准



(a) 可见光噪声图像配准 MES

(a) MES of noisy visible images



(b) 红外噪声图像配准 MES

(b) MES of infrared noisy images

图 6 配准 MES

Fig. 6 Registration MES

方法的 MES 都最小,且相较于原图像和插值图像而言,随着噪声的增强,超分辨率图像的配准 MES 曲线更加平稳。这表明在可见光噪声图像或者红外噪声图像的配准中,超分辨率重建配准方法不仅具有很强的噪声抗干扰能力,同时由于超分辨率重建对于图像包含的信息具有增强效果,使配准算法具有更强的鲁棒性及可靠性。

## 5 结论

考虑到图像超分辨率重建具有对图像分辨率及细节增强的特点,本文提出了一种结合超分辨率重建的亚像素图像配准方法。首先获取已知亚像素位移的图像序列;然后对参考图像及待配准图像进行超分辨率重建,获取高分辨率图像;最后,使用扩展相位相关法对图像进行配准,分析配准方法的性能。对超分辨率图像、低分辨率图像及插值图像的配准实验结果表明,本文方法的配准误差最大为 0.03 pixels,可以准确估计图像间的亚像素位移,接下来,还进行了噪声实验,结果表明本文方法对噪声具有很强的抗干扰能力,在较高噪声的条件下依然具有很高的配准精度。

## 参考文献:

- [1] 李英杰,张俊举,常本康,等. 远距离多波段红外图像融合系统及配准方法[J]. 红外与激光工程, 2016,45(5):(0526002)1-7.  
LI Y J, ZHANG J J, CHANG B K, et al.. Remote

multiband infrared image fusion system and registration method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016,45(5):(0526002)1-7. (in Chinese)

- [2] LAHIRI B B, BAGAVATHIPPAN S, JAYAKUMAR T, et al.. Medical applications of infrared thermography: a review [J]. *Infrared Physics and*

- Technology, 2012, 55(4):221-235.
- [3] 翟海天,李辉,李彬. 基于区域划分的红外超分辨率重建[J]. 光学精密工程, 2015, 23(10):2989-2996.
- ZHAI H T, LI H, LI B. Infrared super resolution reconstruction based on region division [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10):2989-2996. (in Chinese)
- [4] PARK S W, CHANG J, CHOI J, *et al.*. Construction of super resolution imaging system considering spatially varying sub-pixel registration [C]. *Photoelectronic Technology Committee Conferences*, 2010, 772361-772367.
- [5] 王志强,程红,杨枕,等. 全局图像配准的目标快速定位方法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(S):225-229.
- WANG ZH Q, CHENG H, YANG G, *et al.*. Fast target location method of global image registration [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(S):225-229. (in Chinese)
- [6] 王运,颜昌翔. 光谱仪图像的亚像素配准[J]. 光学精密工程, 2012, 20(3):661-667.
- WANG Y, YAN C X. Sub-pixel image registration of spectrometer images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3):661-667. (in Chinese)
- [7] 郭萌,赵岩,王世刚,等. 基于区域选择的红外弱小目标超分辨率复原算法[J]. 液晶与显示, 2016, 31(4):415-420.
- GUO M, ZHAO Y, WANG SH G, *et al.*. Infrared dim-small target super-resolution restoration algorithm based on region selection [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(4):415-420. (in Chinese)
- [8] ZHOU F, YANG W, LIAO Q. A coarse-to-fine subpixel registration method to recover local perspective deformation in the application of image super-resolution [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(1):53-66.
- [9] 刘卫光,崔江涛,周利华. 插值和相位相关的图像亚像素配准方法[J]. 计算机辅助设计与图形学报, 2005, 17(6):1273-1277.
- LIU W G, CUI J T, ZHOU L H. Subpixel registration based on interpolation and extension phase correlation[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2005, 17(6):1273-1277. (in Chinese)
- [10] REN J CH, JIANG J M, VLACHOS T. High-accuracy sub-pixel motion estimation from noise image in fourier domain[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(5):1379-1384.
- [11] XU X, ZHONG Y F, ZHANG L P, *et al.*. Sub-pixel mapping based on a MAP model with multiple shifted hyperspectral imagery [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, 6(2s):580-593.
- [12] 李含伦,张爱武,孟宪刚,等. 一种利用 Fourier-Mellin 变换和曲线拟合的遥感图像亚像素配准方法[J]. 小型微型计算机系统, 2015, 36(12):2763-2768.
- LI H L, ZHANG A W, MENG X G, *et al.*. A remote sensing image sub-pixel registration method based on curve fitting and improved Fourier-Mellin transform[J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2015, 36(12):2763-2768. (in Chinese)
- [13] FOROOSH H, ZERUBIA J, BERTHOD M. Extension of phase correlation to sub-pixel registration [J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2002, 11(3):188-120.
- [14] BALCI M, FOROOSH H. Subpixel registration directly from the phase difference [J]. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing Volume*, 2006:60796.
- [15] 张振东,陈建,王伟国,等. 基于 SSIM\_NCCDFT 的超分辨率复原评价方法研究[J]. 液晶与显示, 2015, 30(4):713-721.
- ZHANG ZH D, CHEN J, WANG W G, *et al.*. Evaluation method of super-resolution restoration based on SSIM\_NCCDFT [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(4):713-721. (in Chinese)
- [16] 彭羊平,宁贝佳,高新波. 基于非负邻域嵌入和非局部正则化的单帧图像超分辨率重建算法[J]. 计算机科学, 2015, 42(11):104-107, 143.
- PENG Y P, NING B J, GAO X B. Single-frame image super-resolution reconstruction algorithm based on nonnegative neighbor embedding and non-local means regularization [J]. *Computer Science*, 2015, 42(11):104-107, 143. (in Chinese)
- [17] 卜莎莎,章毓晋. 基于局部约束线性编码的单帧和多帧图像超分辨率重建[J]. 吉林大学学报(工学版), 2013, 43(S3):365-370.
- BU SH SH, ZHANG Y J. Single-frame and multi-frame image super-resolution reconstruction based on locality-constrained linear coding [J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology*

- Edition*), 2013, 43(S3), 365-370. (in Chinese)
- [18] 邓承志, 田伟, 汪胜前, 等. 近似稀疏正则化的红外图像超分辨率重建[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(6):1648-1654.  
DENG CH ZH, TIAN W, WANG SH Q, *et al.*. Super-resolution reconstruction of approximate sparsity regularized infrared images[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6):1648-1654. (in Chinese)
- [19] 龚卫国, 潘飞宇, 李进明. 用双层重建法实现单幅图像的超分辨率重建[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(3):720-729.  
GONG W G, PEN F Y, LI J M. Single-image super-resolution reconstruction via double layer reconstructing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(3):720-729. (in Chinese)
- [20] 李展, 陈清亮, 彭青玉, 等. 基于 MAP 的单帧字符图像超分辨率重建[J]. *电子学报*, 2015, 43(1):191-197.  
LI ZH, CHEN Q L, PENG Q Y, *et al.*. MAP-based single-frame super-resolution reconstruction for character image[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2015, 43(1):191-197. (in Chinese)
- [21] LI Y J, JI M, HE J F, *et al.*. Improvement of sub-pixel global motion estimation in UAV image stabilization [C]. *Photoelectronic Technology-Committee Conferences*, 2015.

#### 作者简介:



李方彪(1990—),男,湖南郴州人,博士研究生,2013年于湖南大学获得学士学位,主要从事数字图像处理方面的研究。E-mail: lifangbiao1215@163.com

#### 导师简介:



何昕(1966—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事图像处理、光电测量等方面的研究。E-mail: hexin6627@sohu.com