

文章编号 1004-924X(2015)增-0567-10

基于多传感器的红外图像超分辨

吴 炜¹, 王美洁¹, 李 智^{1*}, 李康丽¹, 刘 凯²

(1. 四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064;

2. 四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610064)

摘要:利用可见光图像与红外图像之间存在的互补性和相关性,提出一种基于多传感器的红外图像超分辨方法。首先,利用自适应边缘检测算法提取红外图像边缘,并根据红外图像边缘与可见光图像对应区域的相关程度将红外图像边缘分为相关边缘和非相关边缘;然后,采用二次关系模型对相关边缘区域进行建模,通过该模型利用可见光信息估计红外图像的高频信息;最后,利用迭代反向投影法(IBP)对估计的高分辨率红外图像进行优化获得最终的高分辨率红外图像。实验结果表明,本文算法获得的小区图像,十字路口图像和道路图像的峰值信噪比(PSNR)分别比 Choi 算法高 2.9 dB, 1.44 dB 和 1.11 dB。另外,利用本文算法复原的红外图像具有更好的视觉效果,更逼真、更接近于原始高分辨率图像,复原出的高分辨率红外图像无论在主观效果上还是在客观评价指标上都取得了较好的结果。

关键词:图像复原;图像处理;红外图像超分辨;多传感器超分辨率

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152313.0567

Multi-sensor based infrared image super-resolution

WU Wei¹, WANG Mei-jie¹, LI Zhi^{1*}, LI Kang-li¹, LIU Kai²

(1. School of Electronic and Information Engineering,
Sichuan University, Chengdu 610064, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Sichuan University,
Chengdu 610064, China)

* Corresponding author, E-mail: lizhi@scu.edu.cn

Abstract: On the basis of complementary and relevance between a visible image and an infrared image, a new method which is called multi-sensor super resolution method was proposed. Firstly, an adaptive edge detection algorithm was used to extract the edges of the infrared image, and edges were divided into related edges and nonrelated edges according to the relevance of the edges of infrared image and corresponding visible image area. Then, a quadratic relationship model was built to estimate the high frequency patch of infrared image in the related edge region. At last, Iterative Back Projection (IBP) method was used to optimize the estimated super-resolved image. Experimental results indicate that the Peak Signal to Noise Ratios(PSNR) of the community image, crossroad image and the road image

收稿日期:2015-05-08;**修订日期:**2015-05-19.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61271330, No. 61411140248);四川省科技支撑计划资助项目(No. 2014GZ0005);博士后基金资助项目(No. 2014M552357);留学回国人员科研启动基金资助项目;江苏省图像处理与图像通信重点实验室开放基金资助项目

in this method are respectively 2.9 dB, 1.44 dB and 1.11 dB, higher than that of the Choi algorithm. Experimental results also show that the proposed method enables reconstructing images to be better visual results and closely resembling the original high resolution images. The reconstructed images achieve better results on subjective visual effects and objective assessments.

Key words: image restoration; image processing; infrared image super resolution; multiple sensor super resolution

1 引 言

红外图像能反映场景的辐射特性,这种特性在许多领域能为人们提供有价值的信息,如远程监视等。与可见光图像相比,红外图像的质量不太令人满意,主要表现为空间分辨率有限。这一缺点限制了红外图像的应用范围,因此提高红外图像的分辨率^[1]是一个亟待解决的问题。

一种具有前景的方法就是利用信号处理方法从单帧或者多帧低分辨率图像中获得高分辨图像^[2-5],这种方法被称为超分辨率技术。传统的超分辨技术主要可分为两大类:1)基于重建的超分辨技术,2)基于学习的超分辨技术。前者使用多帧图像进行图像超分辨率复原,但它存在先验知识少、重建效果改进潜力不大等问题。后者是指在高分辨率样本图像的辅助下,对单幅低分辨率图像进行复原,恢复出高分辨率图像^[6-7]。

这两种方法多是利用来自单一传感器得到的图像。由于不同传感器获取的图像之间具有一定的相关性,因此可以利用来自不同传感器图像的相关性来提高图像分辨率^[8-12]。这种利用多传感器之间相关性提高图像分辨率的方法称为多传感器超分辨率方法。在本文中,利用可见光图像与红外图像的相关性提高红外图像分辨率,具体来说,本文采用基于多传感器的超分辨技术提高红外图像分辨率。

目前关于多传感器超分辨率的研究较少,基于多传感器的红外图像超分辨的研究更少。而有关多传感器超分辨率的研究中,大多数是关于深度图像的研究,关于红外图像的研究加之又少。文献[10]利用可见光图像信息提高深度图像分辨率,但是由于没有进行正则化,因此图像复原效果较差。文献[11]首先建立了马尔可夫随机场模型,并通过该模型利用高分辨率可见光图像提高深度图像的分辨率,但是该方法提出的马尔可夫

随机场模型较为复杂,故该算法复杂度较大。文献[8]提出一种利用局部仿射变换建立不同传感器获取图像模型,然后利用该模型提高图像分辨率的方法。文献[12]提出通过一次仿射关系模型提高红外图像的分辨率,然后通过局部区域的相似性进行正则化。但是该方法模型过于简单,正则化项过于复杂。

上述算法有的复杂度过大,有的模型过于简单。针对这种现状,本文提出一种新的基于多传感器的红外图像超分辨复原方法。算法首先采用自适应边缘提取算法提取红外图像边缘,然后根据红外图像边缘与可见光图像对应区域的相关程度将红外图像边缘分为相关边缘和非相关边缘,其次建立红外图像与可见光图像的二次关系模型,并利用该模型在相关边缘区域对红外图像的高频信息进行估计,最后采用迭代反向投影法(IBP)对高频部分优化,得到超分辨率红外图像。

2 基于多传感器的红外图像超分辨算法

由于制作高密度小像元尺寸的红外焦平面器件存在一定困难,且成本较高,这使得红外图像的分辨率通常较低,而可见光成像系统成本低廉,并且图像分辨率较高,因此考虑利用可见光图像信息来提高红外图像分辨率(即基于多传感器的红外图像超分辨率)。本文对基于多传感器的红外图像超分辨率进行研究,该研究有双重意义,其一探索如何利用可见光图像信息提高红外图像分辨率;第二层意义为探索超分辨重建技术以提高红外图像的分辨率,即突破现有的红外成像系统固有的分辨率。

2.1 本文算法的基本原理

基于多传感器的红外图像超分辨率算法的输入为一幅低分辨率红外图像和一幅与其对应(配准)高分辨率可见光图像,算法利用低分辨率红外

图像自身的信息以及其与高分辨率可见光图像的相关信息,输出一幅高分辨率红外图像。

高分辨率红外图像可以看作是低分辨率红外图像与高频红外信息的叠加,它可表示为:

$$I_H = H \oplus I_L, \quad (1)$$

其中: \mathbf{H} 表示高频信息, \oplus 表示叠加运算。由于 I_L 已知,这样超分辨率问题就由估计高分辨率红外图像 I_H 转化为估计高频信息 \mathbf{H} 的问题。图1为一个低分辨率图像、高频信息及高分辨率图像的例子。

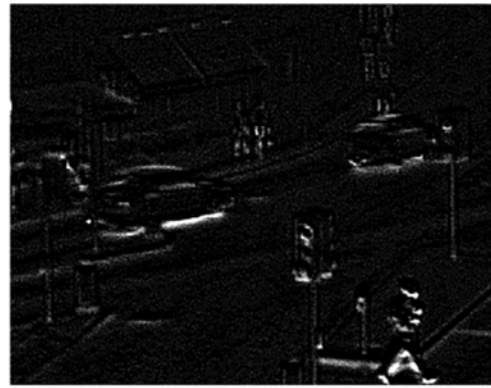
由上述分析可知,图像超分辨复原算法主要是估计图像的高频信息,即图像的边缘区域。由于边缘区域在图像中只占很小的一部分,因此为了提高算法的效率,可只对边缘区域进行超分辨率处理。也就是说只是估计边缘区域缺少的高频信息,而对于非边缘区域采用传统的插值算法即可。

由于并不是红外图像中所有区域都与对应的可见光中的区域具有相关性,对非相关区域建立模型必定造成较大误差,这将对红外图像超分辨复原结果造成负面影响。因此本文主要是对红外与可见光图像相关性较大的区域进行超分辨率,这就有必要提取出该区域。

本文在检测红外图像边缘区域后,根据其与其与可见光图像的相关性,将其分为相关边缘区域和非相关边缘区域。在非相关边缘区域,红外与可见光图像相关性较小,因此在该区域不能利用可见光图像信息增强红外图像的分辨率;而在相关边缘区域,由于红外与可见光图像相关性较大,则可建立红外与可见光关系的模型,并利用该模型预测红外图像的高频信息。



(a) 低分辨率红外图像 I_L
(a)Low-resolution infrared image I_L



(b) 红外图像高频信息 H
(b)High frequency map H in infrared image



(c) 高分辨率红外图像 I_H
(c)High-resolution infrared image I_H

图1 本文算法原理

Fig. 1 Principal of proposed method

将估计获得的红外图像高频信息与低分辨率红外图像进行叠加,即可获得高分辨率红外图像。但是由于本文是依据可见光图像与红外图像的关系建立的模型,这将导致可见光图像中的细微纹理信息将与边缘信息一起通过建立的模型导入红外图像中,最终将导致超分辨率红外图像的变形失真。为了减少异常信息对超分辨率红外图像的影响,需要对估计的高分辨率红外图像进行进一步优化,以获得最终的超分辨率红外图像。

优化准则须满足如下条件:获得的高分辨率红外图像进行降质(下采样)后,得到的低分辨率红外图像应该与输入的红外图像的误差尽可能地小。这一准则可通过迭代反向投影(IBP)算法来实现。

2.2 算法系统流程

算法系统流程如图2所示,输入一幅低分辨率红外图像和与其对应(配准)的高分辨率可见光

图像,利用低分辨率红外图像自身的信息以及可见光图像的信息,输出一幅高分辨率红外图像。算法的具体步骤为 1) 首先对低分辨率红外图像进行插值放大操作,这样处理的目的是为了使红外图像与可见光图像大小相同,便于后续操作;2) 对插值放大的红外图像采用自适应边缘提取算法提取边缘,获得红外图像边缘;3) 通过计算红外图像与可见光图像的相关性,将红外图像的边缘区域分为相关边缘区域和非相关边缘区域;4) 在相关区域建立红外图像与可见光图像的二次关系模型,并根据此模型对相关边缘区域进行高频估计;5) 将获取的高频信息与插值放大的图像进行叠加,获得初始高分辨率红外图像;6) 采用迭代反投影法 (IBP) 优化得到最终的高分辨率红外图像。

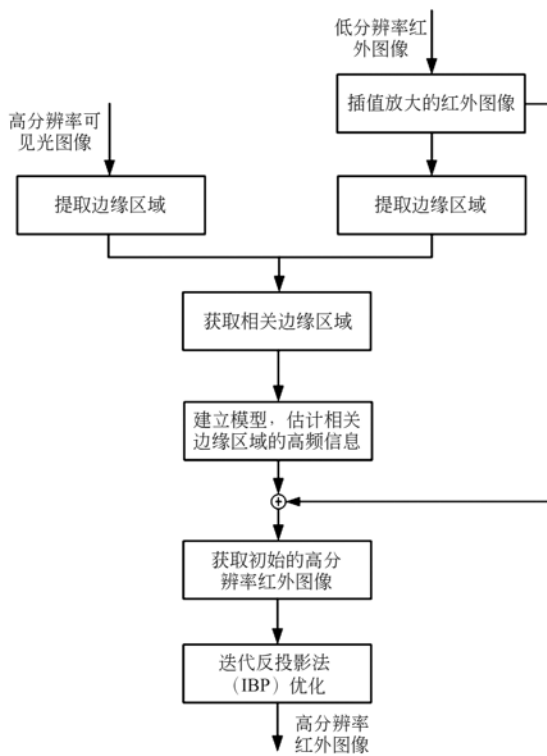


图 2 算法流程图

Fig. 2 Flowchart of proposed method

2.3 自适应边缘提取算法

边缘区域^[13]的复原质量是影响图像超分辨率重建效果的关键之一。图像超分辨复原算法主要复原图像的高频信息,即图像的边缘区域,因此需要找到一个合适的算法将边缘区域检测出来,以

便对其进行超分辨率处理。为了检测边缘区域,本文采用一种自适应边缘提取算法^[13],该算法能够有效克服光照不均对边缘提取的影响。

由于边缘的强度与背景亮度和梯度正相关,边缘区域的计算表示为:

$$T(x, y) = \omega L(x, y)G(x, y) - \eta L(x, y), \quad (2)$$

其中: T 、 L 、 G 分别表示图像的边缘强度图、背景亮度图以及梯度图。 $T(x, y)$ 表示图像中位置为 (x, y) 的边缘强度, $L(x, y)$ 表示图像中位置为 (x, y) 的背景亮度, $G(x, y)$ 表示位置为 (x, y) 的梯度最大值, ω 和 η 为权重系数。 $\eta L(x, y)$ 项的目的是为了消除光照不均对边缘检测的影响。

梯度图表示为:

$$G(x, y) = \max_{k=1,2,3,4} \{grad_k(x, y)\}, \quad (3)$$

其中

$$grad_k(x, y) = \frac{1}{16} \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 I(x-3+i, y-3+j) \times g_k(i, j), \quad (4)$$

其中, $g_k(i, j)$ 为自适应边缘提取的 4 个方向的高通滤波器,如图 3 所示。

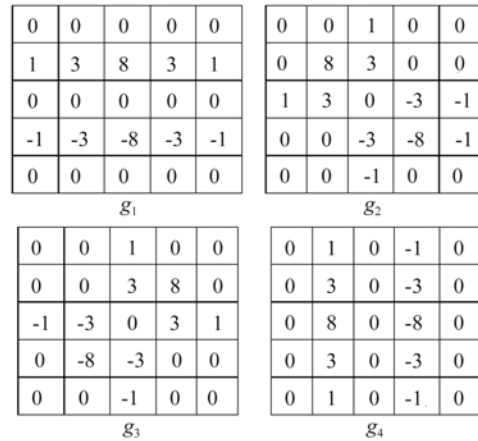


图 3 自适应边缘提取的 4 个方向高通滤波器

Fig. 3 Four high-pass filters for adaptive edge extraction

图 4 为自适应边缘算法与拉普拉斯算子、Sobel 算子结果的对比结果。从该图可以看出,拉普拉斯算子所提取边缘受噪声影响较大(红外图像包含较多的噪声);Sobel 算子提取的边缘能够

体现图像中的细节,但对光照较为敏感;而本文所

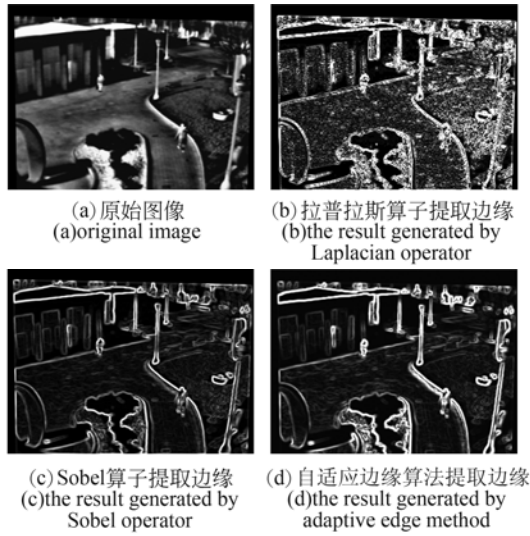


图 4 原始图像及不同的边缘提取方法结果的对比
Fig. 4 Original image and results by using different edge extraction methods

用提取边缘方法较好地反映了房屋的各种细节,克服光照影响。获得红外图像的边缘强度图后,设定一个阈值 T_e ,当位置为 (i, j) 的边缘强度 $T_{IR}(i, j)$ 大于预先设定的阈值 T_e 时,认为该位置的像素为红外图像边缘像素,由这些边缘像素组成的区域为红外图像边缘区域。

2.4 相关系数

为了处理方便,本文将每个像素的相关性通过以该像素为中心的图像块的相关性来表示。也就是说,通过红外图像块与其对应的可见光图像块的相关性表示红外图像边缘区域中每个像素与其对应的可见光图像中像素的相关性。

为了计算图像块之间的相关性,将图像块按照行连接为一个矢量,然后可通过计算矢量的相关性表示图像块的相关性。本文通过相关系数表示相关性,相关系数是数据中心化后的矢量夹角余弦。相关系数值越大则越表明两种信号是相关性越强^[14],其值的下限为 0,上限为 1。

相关系数的计算公式为:

$$S(i, j) = \left| \frac{\overline{B_{VIS}(i, j) B_{IR}(i, j)} - \overline{B_{VIS}(i, j)} \overline{B_{IR}(i, j)}}}{\sqrt{(\overline{B_{VIS}^2}(i, j) - \overline{B_{VIS}(i, j)}^2)(\overline{B_{IR}^2}(i, j) - \overline{B_{IR}(i, j)}^2)}} \right|, \quad (5)$$

其中: $S(i, j)$ 表示位置为 (i, j) 的红外图像边缘区域像素与其对应的可见光图像中像素的相关系数,该相关系数其实就是以 (i, j) 为中心的红外与可见光图像块的相关系数。 $\overline{B_{VIS}(i, j)}$ 和 $\overline{B_{IR}(i, j)}$ 分别表示以像素 (i, j) 为中心的可见光和红外图像块的均值。

当相关系数 $S(i, j)$ 大于预先设定的阈值 T_e 时,位置为 (i, j) 的红外边缘像素点即为相关边缘区域。

2.5 高频信息的估计

在局部区域内,可认为红外图像与可见光图像存在一定的关系。由于红外图像的边缘一般较为模糊,为了建立红外与可见光图像块的关系,本文先对可见光图像块进行高斯模糊,然后再建立红外与可见光图像块的二次关系模型,即:

$$K_{k,l} \mathbf{I}_{IR} = (a \mathbf{H}_\sigma K_{k,l}^2 \mathbf{I}_{VIS} + b \mathbf{H}_\sigma K_{k,l} \mathbf{I}_{VIS} + c \mathbf{E}) \text{ for } \forall (k, l) \in \Omega_c, \quad (6)$$

式中: \mathbf{I}_{VIS} 和 \mathbf{I}_{IR} 分别表示可见光图像和红外图像; $K_{k,l}$ 指对图像以像素 (k, l) 为中心取块操作,

这样 $K_{k,l} \mathbf{I}_{IR}$, $K_{k,l} \mathbf{I}_{VIS}$ 分别表示以位置 (k, l) 为中心的红外与可见光图像块; \mathbf{H}_σ 代表高斯模糊核的卷积矩阵,其高斯函数的标准差为 σ ; \mathbf{E} 代表单位矩阵; a, b, c 分别代表局部仿射变换中的模型参数。

模型参数 a, b, c , 可以通过最小化平方误差函数估算。平方误差函数可表示为:

$$E(a, b, c) = \| K_{k,l} \mathbf{I}_{IR} - (a \mathbf{H}_\sigma K_{k,l}^2 \mathbf{I}_{VIS} + b \mathbf{H}_\sigma K_{k,l} \mathbf{I}_{VIS} + c \mathbf{E}) \|_2^2 + \lambda_1 \cdot |a|^2 + \lambda_2 \cdot |b|^2 = \sum_{(i,j)} \{ a P_{VIS,\sigma}^2(i, j) + b P_{VIS,\sigma}(i, j) + c - P_{IR}(i, j) \}^2 + \lambda_1 \cdot |a|^2 + \lambda_2 \cdot |b|^2, \quad (7)$$

公式中 P_{IR} 代表以 (k, l) 为中心的一个红外图像块, $P_{VIS,\sigma}$ 代表被标准差为 σ 的高斯核模糊后的可见光图像块, (i, j) 代表图像块中心的位置。公式中的正则化项 $\lambda_1 |a|^2$ 和 $\lambda_2 |b|^2$ 是为了防止由于惩罚尺度参数幅度过大引起的过学习现象。 a, b, c 可以通过下式计算:

$$\begin{aligned} \partial \mathbf{E} / \partial a &= 0, \partial \mathbf{E} / \partial b = 0, \partial \mathbf{E} / \partial c = 0 \Rightarrow \\ \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \sum_{(i,j)} P_{\text{VIS},\sigma}^4 + \lambda_1, & \sum_{(i,j)} P_{\text{VIS},\sigma}^3, & \sum_{(i,j)} P_{\text{VIS},\sigma}^2 \\ \sum_{(i,j)} P_{\text{VIS},\sigma}^3, & \sum_{(i,j)} P_{\text{VIS},\sigma}^2 + \lambda_2, & \sum_{(i,j)} P_{\text{VIS},\sigma} \\ \sum_{(i,j)} P_{\text{VIS},\sigma}^2, & \sum_{(i,j)} P_{\text{VIS},\sigma}, & \sum_{(i,j)} 1 \end{pmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} \sum_{(i,j)} P_{\text{VIS},\sigma}^2 P_{\text{IR}} \\ \sum_{(i,j)} P_{\text{VIS},\sigma} P_{\text{IR}} \\ \sum_{(i,j)} P_{\text{IR}} \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (8)$$

超分辨率的主要任务是恢复红外图像的高频细节信息。通过上述模型,获得估计参数 a, b, c 后,红外图像的高频信息就可以通过以下方式估计:

$$H_{k,l} = (a\mathbf{H}_\sigma K_{k,l}^2 \mathbf{I}_{\text{VIS}} + b\mathbf{H}_\sigma K_{k,l} \mathbf{I}_{\text{VIS}} + c) - K_{k,l} \mathbf{I}_{\text{IR}}, \quad (9)$$

其中 $H_{k,l}$ 表示以 (k, l) 为中心的红外图像块的高频信息。

将获得的所有将红外图像块的高频信息进行拼接,即可获得红外图像的高频信息图 H 。将高频信息图与低分辨率图像进行叠加,即可获得初始的高分辨率红外图像。

2.6 迭代反投影法高频图像优化

可通过上一节方法估计图像的高频信息,但是这些估计的高频信息可能包含噪声(异常信息),这会导致高频图像的变形失真。高频信息异常的主要原因是可见光图像中的细微纹理和细节信息会与边缘信息一起通过仿射变换映射到红外图像。为了减少异常信息对高频图像的影响,本文采取迭代反投影法对结果进行进一步的优化。

迭代反投影法是 Irani 和 Peleg 提出的一种超分辨率重建方法。在该方法中,通过对模拟 LR(低分辨率)图像和观测 LR 图像的误差进行迭代反投影得到 HR(高分辨率)图像^[15]。IBP 算法基本原理为:对于低分辨率图像 \mathbf{I}_L , 首先产生一个高分辨率图像的初始估计 $\mathbf{I}_H^{(0)}$, 将该高分辨率图像按降质处理退化到低分辨率空间,得到降质后的低分辨率图像 $\mathbf{I}_L^{(0)}$ 。如果 $\mathbf{I}_H^{(0)}$ 就是正确的高分辨率图像,那么 $\mathbf{I}_L^{(0)}$ 和实际获得的 \mathbf{I}_L 应该一致,因此可根据 $\mathbf{I}_L - \mathbf{I}_L^{(0)}$ 的值反向投影回 $\mathbf{I}_H^{(0)}$ 来修正初始估计,直至对 \mathbf{I}_H 的估计 $\mathbf{I}_H^{(n)}$ 满足一定的要求,整个 IBP 过程可表示为^[16]:

$$\mathbf{I}_H^{(n+1)} = \mathbf{I}_H^{(n)} + \mathbf{H}_{\text{BP}}(\mathbf{I}_L - \mathbf{D}\mathbf{I}_H^{(n)}), \quad (10)$$

其中: $\mathbf{I}_H^{(n)}$ 表示第 n 次迭代后获得的超分辨率图像, \mathbf{D} 表示降质矩阵, \mathbf{H}_{BP} 为反相投影矩阵。通过建立的模型估计红外图像高频信息后,估计的

高频 \mathbf{H} 与初始下采样图像块相加作为高分辨图像初始估计 $\mathbf{I}_H^{(0)}$ 并进行多次反向投影迭代,得到最终的高分辨率红外图像。

3 实验结果与分析

为了验证本文算法的有效性,本文实验中的红外与可见光图像对来源于 imagefusion.org 网站和俄勒冈州立大学的彩色与热红外数据库。图 5 为部分实验用图,其中 5(a)、5(b)分别为小区的可见光与红外图像;5(c)、5(d)分别为夜晚十字路的可见光与红外图像;5(e)、5(f)分别为夜晚十字路的可见光与红外图像。

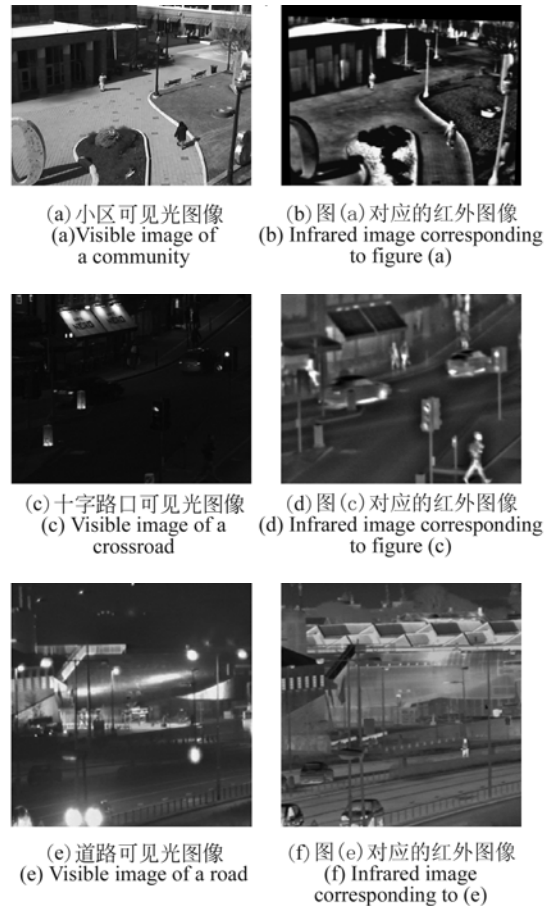


图 5 部分实验所用图像
Fig. 5 Images for experiment

口的可见光与红外图像;5(e)、5(f)分别为道路的可见光与红外图像。所有可见光与红外图像都是预先配准的。实验中先对红外图像进行降质,即2倍下采样,然后将降质后的红外图像作为低分辨率红外图像。

将低分辨率红外图像和与其对应的高分辨率可见光图像作为输入,输入本文算法,可获得高分辨率红外图像。实验中将本文算法与最近邻插值法、双三次插值法和 Choi 算法^[12]进行比较。本文算法中图像块的大小设为 5×5 ;高斯函数的标准差 σ 为 0.7;阈值 T_s 和 T_e 都取 0.05;参数 λ_1 和 λ_2 都取 0.5;反向投影迭代的次数为 6 次。

为了评价效果,除了采用主观的视觉评价外,还采用峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)、结构相似度(Structural SIMilarity, SSIM)作为客观的图像质量评价标准。PSNR 可表示为:

$$PSNR = 10 \lg 255^2 / \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [HR(x, y) - SR(x, y)]^2, \quad (11)$$

其中原始的高分辨率图像为 HR , 由低分辨率图像复原得到的高分辨率图像为 SR , 它们在像素点 (x, y) 上的灰度值分别为 $HR(x, y)$ 和 $SR(x, y)$ 。M 和 N 分别为图像的长度和宽度。PSNR 值越大说明图像的信噪比越高,表示图像复原效果也越好。PSNR 是通过复原图像与理想图像之间的误差计算得到的,它与人的主观视觉特征不太一致。SSIM 是通过图像的结构信息来判断图像相似性的一个指标,它与人的主观视觉特征较为一致,计算出一个在 $[0, 1]$ 之间归一化的值,其中 0 表示两幅图像完全不相似,1 表示两幅图像完成一样。PSNR 和 SSIM 都是值越高,复原图像质量越高。

最近邻方法、双三次插值方法,Choi 算法和本文方法对小区红外图像的实验结果如图 6 所示,图 7 为图 6 标注区域的放大图。从图 6(c)、6(d)、7(c)、7(d)中可以看出最近邻法和双三次插值法在放大图像的同时模糊了大部分的图像细节,使得整个图像较为模糊。从图 6(e)、7(e)可以看出 Choi 算法方法虽然复原出了一些红外图像的细节,但是有些边缘失真。这是由于 Choi 算法只是采用简单的一次模型。从图 6(f)、7(f)可以看出,本文算法能恢复出图像的细节,其复原结

果更逼真。这是由于本文采用的边缘检测算法能够准确地提取红外图像边缘,提出的模型能更准确地表示红外图像与可见光图像的关系,并且对估计的高分辨率图像进行了 IBP 优化。

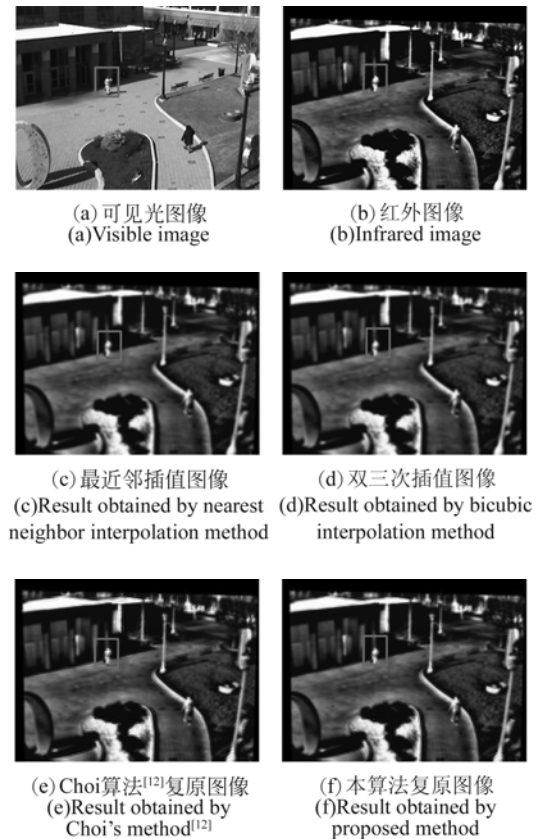


图 6 小区红外图像复原效果对比图

Fig. 6 Comparison results of community infrared image by different methods

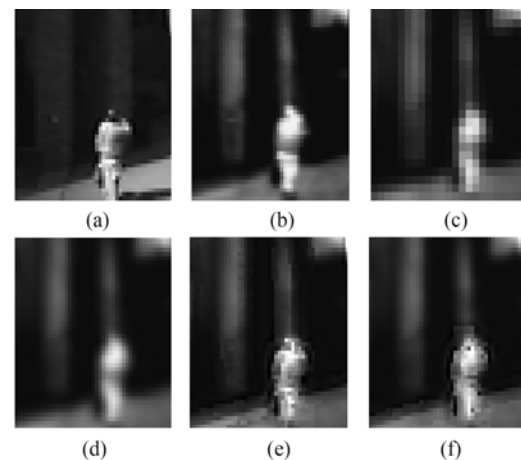


图 7 图 6 标注区域放大对比图

Fig. 7 Zoomed version of marked regions in Fig. 6

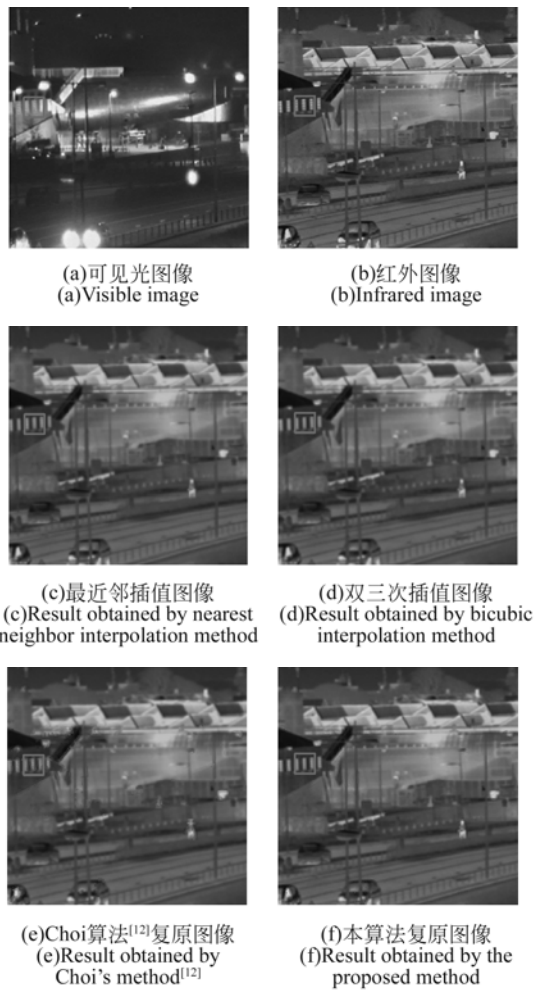


图 8 道路红外图像复原效果对比图

Fig. 8 Comparison results of road infrared image by different methods

图 8 为不同算法对路边红外图像的实验结果,图 9 为图 8 标注区域的放大对比图,仔细观察可以得出与前面相同的结论,即本文算法的效果最好。表 1 和表 2 分别为不同方法的 PSNR 和

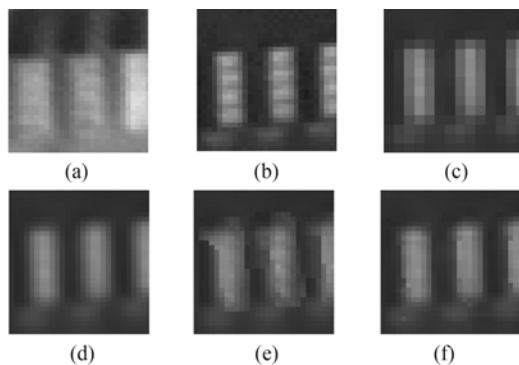


图 9 图 8 标注区域放大对比图

Fig. 9 Zoomed version of marked regions in Fig. 8

SSIM。

表 1 不同算法的 PSNR 对比

Tab. 1 Comparison of PSNR for different methods(dB)

	最近邻 插值法	双三次 插值法	Choi 算法	本文算法
小区图像	23.78	25.01	22.17	25.07
十字路口图像	30.41	32.10	30.90	32.34
道路图像	28.83	29.78	28.96	30.07

由表 1,表 2 可以看出,本文方法比最近邻方法、双三次插值方法、Choi 算法方法的 PSNR 和 SSIM 更高,客观评价与主观评价结果完全一致。

表 2 不同算法的 SSIM 对比

Tab. 2 Comparison of SSIMs for different methods

图像	最近邻 插值法	双三次 插值法	Choi 算法	本文算法
小区图像	0.834	0.870	0.787	0.867
十字路口图像	0.883	0.909	0.897	0.913
道路图像	0.822	0.847	0.831	0.860

4 结 论

本文提出了一种基于多传感器的红外图像超分辨率算法。该算法首先针对红外图像采用自适应边缘提取方法提取边缘信息,考虑边缘方向信息,对最大的梯度方向边缘加权,因此,所获取的边缘更加清晰且噪声相对较小,可有效消除光照不均对边缘提取的影响。另外,本文提出将可见光图像进行高斯模糊,通过二次衍射模型建立红外图像和可见光图像的关系。最后本文采用 IBP 对估计的超分辨率红外图像进行优化,获得最终结果。实验结果表明,本文算法与其它算法相比不仅有更好的视觉效果,而且取得更高的峰值信噪比(PSNR)和 SSIM。对于小区图像,十字路口图像和道路图像,本文算法的 PSNR 比 Choi 算法分别高 2.9 dB,1.44 dB 和 1.11 dB。

本文目前仅探索了基于多传感器的红外图像超分辨率算法,本文下一步工作拟探索基于多传感器的距离图像超分辨率,并根据距离图像的特性对算法进行修正,从而达到理想的超分辨率效果。

参考文献:

- [1] PANAGIOTOULOU A, ANASTASSOPPOULOS V. Super-resolution reconstruction of thermal infrared images[C]. *Proceeding of the 4th WSEAS International Conference on REMOTE SENSING, Venice, Italy*, 2008:40-44.
- [2] YANG SH Y, MIN W, CHEN Y G, *et al.*. Single-image super-resolution reconstruction via learned geometric dictionaries and clustered sparse coding [J]. *Image Processing*, 2012,21(9):4016-4028.
- [3] LI J, SU B H, XU G Y, *et al.*. Super-resolution reconstruction of sequence image implemented on OMAP3530 platform[C]. *Audio, Language and Image Processing (ICALIP)*, Shanghai, 2012: 144-148.
- [4] GOTO T, KAWAMOTO Y, SAKUTA Y, *et al.*. Learning-based super-resolution image reconstruction on multi-core processor[J]. *Consumer Electronics*, 2012,58(3):941-946.
- [5] PURKAIT P, CHANDA B. Super resolution image reconstruction through bregman iteration using morphologic regularization [J]. *Image Processing*, 2012,21(9):4029-4039.
- [6] 吴炜,杨晓敏,卿粼波,等. 基于马尔可夫随机场的低分辨率车牌图像复原算法[J]. *计算机应用研究*, 2010,27(3):1170-1173.
- WU W, YNAG X M, QING L B, *et al.*. Low-resolution license plate images restoration based on MRF [J]. *Application Research of Computers*, 2010,27(3):1170-1173. (in Chinese)
- [7] 吴炜,杨晓敏,余艳梅,等. 核偏最小二乘算法的图像超分辨算法[J]. *电子科技大学学报*, 2011,40(1): 105-110.
- WU W, YNAG X M, YU Y M, *et al.*. Image super-resolution using KPLS[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2011,40(1):105-110. (in Chinese)
- [8] ASSAF Z, SHMUEL P. Multi-sensor super-resolution[C]. *Proceeding of the Sixth IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, Orlando, FL, USA*, 2002:27-31.
- [9] Multi-sensor fusion of electro-optic and infrared signals for high resolution visible images; Part II [C]. *Oceans*, 2012, Hampton Road, VA, 2012:1-6.
- [10] YANG Q X, YANG R G, JAMES D, *et al.*. Spatial-depth super resolution for range image[C]. *In Computer Vision and Pattern Recognition, Minneapolis, MN*, 2007:1-8.
- [11] DIEBEL J, THRUN S. An application of markov random fields to range sensing [C]. *Advances in neural information processing systems, In NIPS, Vancouver, British Columbia, Canada*, 2005: 291-298.
- [12] KYUHA C, KIM C, KANG M H, *et al.*. Resolution improvement of infrared images using visible image information[J]. *In IEEE Signal Processing Letters*, 2011,18(10):611-614.
- [13] YANG X K, LING W S, LU Z K. Just noticeable distortion model and its applications in video coding[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2005,20(7):662-680.
- [14] CHOI K, KIM C, RA J B. Infrared image enhancement based on an aligned high resolution visible image [C]. *Proceeding of 2010 IEEE 17th International Conference on Image Processing, Hongkong*, 2010:3341-3344.
- [15] LAI R, YANG Y T, ZHOU H X, *et al.*. Total variation regularized iterative back-projection method for single frame image super resolution [C]. *IEEE 11th International Conference on Signal Processing (ICSP)*, Beijing, 2012:931-934.
- [16] 吕侃,汤心溢,王世勇. 一种基于 IBP 的红外微扫描图像重建算法[J]. *红外技术*, 2011,33(6):345-348.
- LV K, TANG X Y, WANG SH Y. An infrared microscanning image reconstruction algorithm based on IBP [J]. *Infrared Technology*, 2011, 33 (6): 345-348.

作者简介:



吴 炜(1975—),男,四川宜宾人,副教授,1998年于天津大学获得学士学位,2008年于四川大学通信与信息系统专业获得博士学位,2009年10月至2010年10月在加拿大国家研究院从事为期一年的博士后研究,主要从事图像处理、机器学习等理论和技术研究。

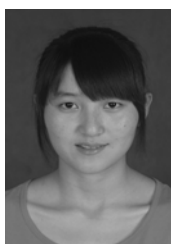
E-mail: wuwei@scu.edu.cn



王美洁(1987—),女,湖北黄冈人,硕士研究生,2014年于四川大学获得硕士学位,主要从事图像处理、模式识别等研究。E-mail: wangmeijie2015516@163.com



李 智(1975—),男,北京人,副教授,1997年于沈阳航空航天大学获得电子工程学士学位,2000年于四川大学获得模式识别与智能系统硕士学位,2004年于四川大学获得应用数学理学博士学位,2012年11月至2013年10月在美国亚利桑那大学电子与计算机工程学院、美国国家自然科学基金自动计算实验室从事为期一年的访问学者研究,主要从事物联网、压缩感知、信息安全、目标检测与识别等理论和技术研究。E-mail: lizhi@scu.edu.cn



李康丽(1990—),女,河南南阳人,硕士研究生,主要从事图像处理、机器学习等理论和技术研究。E-mail: likangli0902@163.com



刘 凯(1973—),男,江苏无锡人,博士,教授,2001年于四川大学获得硕士学位,2010年于美国肯塔基大学获得博士学位,2010年~2011年在美国特拉华大学从事博士后研究工作,主要从事结构光三维成像及应用、机器视觉、图像处理方面的研究。E-mail: kailiu@scu.edu.cn