基于变换域多合成规则的双色中波红外图像融合

杨风暴[1,2],蔺素珍[1,2]

(1. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051; 2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

摘 要: 为了综合多个合成规则的优点,取得更好的双色中波红外图像融合效果,提出了基于变换域多合成规则的融合方法。采用支持度变换分别获得两个中波细分波段图像的低频成分图像和支持度图像序列;根据像素值最大法、区域特征最大法、区域特征加权法等合成规则的特点,提出了低频成分图像三个合成规则的组合方法; 根据支持度图像的能量最大法、区域特征加权法等合成规则的特点,提出了支持度图像序列两个合成规则的组合方法。与单一合成规则的方法相比,融合后的图像局部标准偏差、局部粗糙度和融合质量参数分别提高了 6.77%、4.86%和 9.59%,实验结果证明了该融合方法的有效性。

关键词: 双色中波红外; 图像融合; 多合成规则

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)11-3663-07

Fusion of dual color MWIR images based on multiple combination rules in transform domain

Yang Fengbao[1,2], Lin Suzhen[1,2]

(1. National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To merge the merits of several diverse rules and product better fusion effectiveness of dual color mid-wave infrared images, a novel fusion scheme was presented based on multiple combination rules of transform domain coefficients. A low-frequency component image and a sequence of support value images of two subdivision band images of mid-wave infrared were obtained respectively with support value transform (SVT). According to the characterizations of pixel value maximum rule, region feature maximum rule and region feature weighting rule, a combination method of multiple rules of low-frequency component images was presented. Meanwhile, according to the characterizations of energy maximum rule and region feature weighting rule, a combination method of multiple rules was presented for support value image sequence. Compared with the method based on single combination rule, local standard deviation, local coarseness and fusion quality metric of images fused by proposed method increased 6.77%, 4.86% and 9.59% respectively. The validity of fusion method proposed is proved by experimental results.

收稿日期: 2014-03-13; **修订日期:** 2014-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(6117105),高等学校博士学科点专项科研基金(博导类)(20121420110004)

作者简介: 杨风暴(1968-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事红外信息处理方面的研究工作。Email:fengbao_yang@163.com

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

0 引 言

多色化是提高热红外成像性能的重要手段,在战场觉察、深空探测、灾害监测、导航制导等领域具有重要应用价值,从而促进了双色、多色红外探测器技术发展[1]。双色中波是指把红外中波段划分成两个更细的波段分别成像,利用细分波段之间成像的互补性,大大提高了成像探测的抗干扰和目标识别能力。两个细分波段的互补性主要变现在光谱透过率、对应的峰值温度范围、受太阳辐射的影响、目标的辐射特性、探测器响应特性等在两个波段的不同[2]。双色中波在不同细分波段分别成像,再通过图像融合获取比没有双色化更好的结果。因此图像融合在双色中波成像中具有重要价值。

多分辨率变换是图像融合中行之有效的一类方法,如金字塔算法、小波包变换、支持度变换等。但这些方法在融合变换域系数是多采用单一的合成规则,融合效果具有局限性。S.Li 等[3]对各种多分辨率图像融合方法进行了比较,指出了不同合成规则的优缺点;J. Saeedi 等[4]提出了利用模糊逻辑对可见光和红外图像融合的高频系数进行多个合成规则处理的方法,取得了较好效果。为此,文中提出了对支持度变换高、低频系数图像分别采用多个合成规则的处理方法,以发挥多个合成规则的优势,取得更佳融合效果。

1 融合方法

提出了红外中波细分图像的融合方法,如图 1 所示。

支持度变换的目的是将两个细分波段图像分别分解成低频成分图像序列和支持度图像序列,以便对最后一层低频成分图像和各层支持度图像利用多合成规则融合,再经支持度逆变换形成融合图像。

多规则合成的目的是进行系数矩阵的融合,其中低频成分图像采用的是像素值最大、区域特征最大、区域特征加权三个规则的融合,支持度图像序列分为多层,每层采用的是能量最大、区域特征加权两个规则的融合。由于构建的低频差异特征与支持度差异特征不同,故多合成规则的组合方法不同。

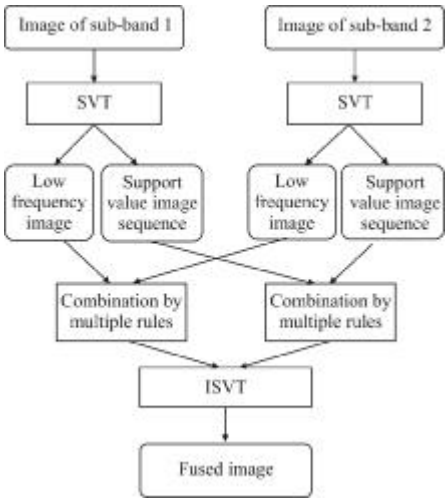


图 1 双色中波红外图像融合示意图

Fig.1 Framework on fusion of dual color MWIR images

2 基本算法

2.1 支持度变换

支持度变换是在最小二乘支持向量机(LS-SVM)基础上提出的一种图像多尺度变换方法,其是非采样的二值冗余变换,同小波变换相比具有平移不变性、不会产生振铃效应、运算速度快的优点[5]。

在映射最小二乘向量机中,输入向量对特定大小的邻域而言是常数,支持度滤波器可由核函数 **K** 和参数确定,若核函数选择高斯径向基核函数 $\mathbf{K}(x_i,x_j)=\exp(-||x_i-x_j||/2\sigma^2)$,其中 $2\sigma^2$ 扩展参数设为 0.3,γ 为 1,对于 5×5 的映射向量空间,相应的支持度滤波器为:

$$\begin{bmatrix} -0.0158 & -0.0136 & -0.0102 & -0.0136 & -0.0158 \\ -0.0136 & -0.0130 & -0.0602 & -0.0130 & -0.0136 \\ -0.0102 & -0.0602 & 0.5056 & -0.0602 & -0.0102 \\ -0.0136 & -0.0130 & -0.0602 & -0.0130 & -0.0136 \\ -0.0158 & -0.0136 & -0.0102 & -0.0136 & -0.0158 \end{bmatrix} \tag{1}$$

对上述滤波器采用隔行隔列填充 0 的方法可以构造出一系列的多尺度支持度滤波器。

给定一幅图像 P,通过与系列支持度滤波器卷积得到系列支持度图像,见公式(2):

$$\begin{cases} \mathbf{S}_j=\mathbf{SV}_j*\mathbf{P}_j \\ \mathbf{P}_{j+1}=\mathbf{P}_j-\mathbf{S}_j \quad j=1,2\cdots,r \\ \mathbf{P}_1=\mathbf{P} \end{cases} \tag{2}$$

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

式中:r 为分解层数,SV_j 为系列支持度滤波器;S_j 为系列支持度图像,其可反映图像的细节显著特征,是图像的高频成分;P_j 为原图像的系列低频成分图像,是原图像的近似图像。支持度逆变换公式为:

$$p=p_{r+1}+\sum_{j=1}^{r}S_j \tag{3}$$

从支持度逆变换公式可以看出,对于两幅要融合的图像,需要合成相应的、最后分阶层的低频成分图像和各分阶层的支持度图像。进行支持度变换分别得到各自的系列支持度图像和低频成分图像,一般最后一层低频成分图像采用的合成规则为简单平均法,支持度图像序列采用的是绝对值最大法。若 r 为分解层数 j=1,2···,r,设 P_{1r}、P_{2r} 和 S_{1j}、S_{2j} 分别表示最后一层低频成分图像和第 j 层支持度图像。所以第 r 层的合成的低频成分图像为 P_{Fr},第 j 层合成的支持度图像为 P_{Fj},则:

$$\begin{cases} P_{Fr}=\dfrac{P_{1r}+P_{2r}}{2} \\ S_{Fj}=f_{max}(S_{1j},S_{2j}) \end{cases} \tag{4}$$

式中:f_{max} 函数表示 S_{Fj} 的每个像素值选择为 S_{1j}、S_{2j} 两幅图像中对应位置的绝对值大的像素值[5]。每层都进行类似的处理后,再进行逆变换,即可得到融合的图像。

2.2 低频成分图像的多合成规则融合

2.2.1 合成规则的比较

经过支持度变换,原图像的能量主要反映在低频成分图像,其像素取值是非负的,低频成分图像是原图像的近似图像。因此,在融合时,合成规则采用像素值最大法,可以保留各个原图像的能量,将互补性的信息集中到融合图像中。像素值最大法如公式(5)所示:

$$P_{Fr}=\begin{cases} P_{1r}(x,y) & P_{1r}(x,y)>P_{2r}(x,y) \\ P_{2r}(x,y) & \text{其他} \end{cases} \tag{5}$$

式中:(x,y)表示像素的位置。但是这种规则会使融合图像整体偏亮、目标背景对比度降低、图像动态范围减小。

实际上,图像信息主要变现为像素之间的差异,因此低频成分图像融合时,需要考虑像素周围的局部区域像素的取值。例如,可以将 N×N 窗口的区域标准偏差 σ 作为中心像素的区域特征,其值越大,说明该区域的图像信息越丰富,融合时则选择该中心像素值。合成公式如公式(6)所示:

$$P_{Fr}=\begin{cases} P_{1r}(x,y) & \sigma_{1r}(x,y)>\sigma_{2r}(x,y) \\ P_{2r}(x,y) & \text{其他} \end{cases} \tag{6}$$

为了保证融合图像像素取值的区域一致性,对公式(6)的结果进一步处理,若在某 M×M 窗口中的像素大部分都来自某一原图像,那么窗口中心像素值也应来自该原图像,如公式(7),其中,m 表示窗口中来自图像 P_{1r} 的像素个数,th 为阈值,一般取值为 $(0.5m^2,m^2)$。

$$P^*_{Fr}(x,y)=\begin{cases} P_{1r}(x,y) & m>th \\ P_{2r}(x,y) & m>m^2-th \\ P_{Fr}(x,y) & \text{其他} \end{cases} \tag{7}$$

利用区域特征值最大法融合的图像虽考虑了原图像像素的周围区域相关性、保持了大的图像动态范围,但合成像素值只来自某一图像,未综合所有原图像的信息,且图像会产生局部失真。简单平均法(如公式(4)中第二式)用的较多,可以综合两个原图像的信息,但其会降低能量互补图像的目标对比度,为此需要考虑加权平均方法。加权平均的权值选择是关键,结合前面的研究,可以将原图像区域特征归一化后作为权值,以综合区域和像素值本身的有效信息。合成规则如公式(8)所示:

$$P_{Fr}(x,y)=\frac{\sigma_{1r}(x,y)P_{1r}(x,y)+\sigma\sigma_{2r}(x,y)P_{2r}(x,y)}{\sigma_{1r}(x,y)+\sigma_{2r}(x,y)} \tag{8}$$

虽然加权平均比简单平均更优,但同像素值最大法相比,目标背景对比度会降低,同区域特征法相比,图像动态范围会减小。

2.2.2 合成规则的组合

从上面的分析可以看出,几种合成规则各有优缺点,为此提出了 3 个合成规则组合的方法,具体算法如下:

$$P_{Fr}(x,y)=\sum_{i=1}^{1}\mu_{Pi}P_{Fri}(x,y) \tag{9}$$

式中:$P_{Fr}(x,y)$为第 i 种规则的低频成分图像融合结果;μ_{Pi} 为第 i 种规则的权函数,其是一个模糊隶属度函数,其中区域特征法最大法(公式(7))、区域特征加权平均法(公式(8))、像素值最大法(公式(5))对应的权函数分别为 μ_{P1},μ_{P2},μ_{P3},见图 2。

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

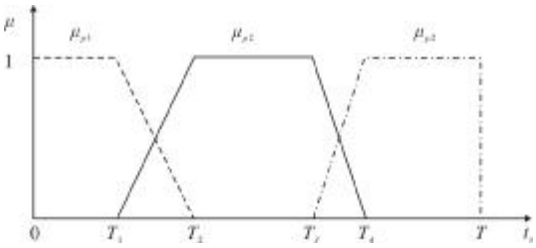


图 2 低频多合成规则权函数

Fig.2 Weight functions of low-frequency multiple combination rules

权函数的定义域为$[0,T]$,$t_P\in[0,T]$表示两个低频成分图像的低频差异特征量,T_P的表达式为:

$$t_p=\max\left\{\frac{1-E_\sigma}{2},\frac{E_p-M_p}{2},\frac{1}{2}\right\} \tag{10}$$

式中:E_p、E_σ分别是两个低频成分图像的像素值 P、区域特征 σ 的相似度;$M_{p\sigma}$ 为 E_p、E_σ 的均值 M_{EP}、$M_{E\sigma}$ 的平均值,即

$$E_P=\frac{E_P^*}{\max(E_P^*)}$$

$$E_P^*=|P_1-P_2|\times(P_1+P_2) \tag{11}$$

$$E_\sigma=\frac{|\sigma_1-\sigma_2|}{\sigma_1+\sigma_2} \tag{12}$$

$$M_E=\frac{M_{EP}-M_{E\sigma}}{2} \tag{13}$$

图 2 中对应的参数 T_1,T_2,T_3,T_4 可通过公式(14)~(17)来确定,其中,M_t、σ_t 为 T_P 的均值、方差,系数 $\alpha\in[1.0,1.5]$,$\beta\in[2.0,2.5]$可以根据实验进行优化调整。

$$T_1=M_t-\alpha\sigma_t \tag{14}$$

$$T_2=M_t-\beta\sigma_t \tag{15}$$

$$T_3=M_t+\beta\sigma_t \tag{16}$$

$$T_4=M_t+\alpha\sigma_t \tag{17}$$

2.3 支持度图像的多合成规则融合

2.3.1 合成规则的比较

经支持度变换后得到的支持度图像反映的是不同尺度空间的高频信息,其像素取值有正有负,像素能量值越大,对应位置原图像的高频成分越多。因此,为了将各个原图像的高频、细节信息融合起来,使融合图像更清晰,合成规则常常采用像素能量最大法,如公式(18)所示:

$$S_{Fj}(x,y)=\begin{cases}S_{1j}(x,y) & S_{1j}^2(x,y)>S_{2j}^2(x,y)\\ S_{2j}(x,y) & \text{其他}\end{cases} \tag{18}$$

但是这种规则会使融合图噪声较大,局部一致性较差。

为降低噪声,综合两种支持度图像信息和局部区域相关性,可考虑区域特征加权法,其与公式(8)类似。但区域特征不是标准偏差,而是由公式(20)决定,表示窗口中心像素与其他像素差异。

$$S_{Fi}(x,y)=\frac{f_{1j}(x,y)S_{1j}(x,y)+f_2j(x,y)S_{2j}(x,y)}{f_{1j}(x,y)+S_{2j}(x,y)} \tag{19}$$

$$f_j(x,y)=\sqrt{\frac{1}{(2N+1)^2}\sum_{m=x-N}^{x+N}\sum_{n=x-N}^{x+N}(f_j(m,n)-f_j(x,y))^2} \tag{20}$$

该规则能抑制融合图像的部分噪声、使图像局部一致性较好,但会使一些边缘模糊。

当然还有其他合成规则,经过实验比较研究,这两种合成规则互补性较强,因此文中选择了这两种规则。

2.3.2 合成规则的组合

从上面的分析可以看出:能量最大法、区域特征加权法各有优缺点,为此采用公式(21)的组合方法。

$$S_{Fr}(x,y)=\sum_{j=1}^{2}\mu_{Sj}S_{Frj}(x,y) \tag{21}$$

式中:$S_{Fr1}(x,y)$、$S_{Fr2}(x,y)$分别为第 j 分解层像素绝对值最大法、区域特征加权法的支持度图像融合结果,对应的权函数分别是 μ_{S1}、μ_{S2},如图 3 所示。

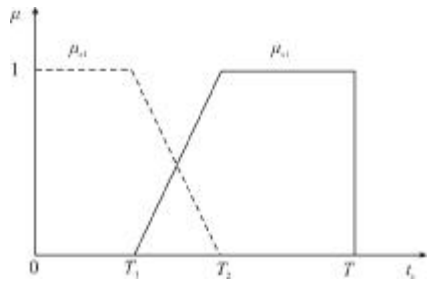


图 3 支持度多合成规则权函数

Fig.3 Weight functions of support value multiple combination rules

同样,权函数的定义域为$[0,T]$,$t_s\in[0,T]$表示两个支持度图像的支持度差异特征量,t_s 的表达式如下:

$$t_s=\frac{S_{j1}^2-S_{j2}^2}{S_{j1}^2+S_{j2}^2} \tag{22}$$

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

图 3 中对应的参数 T_1,T_2 可通过公式(23)、(24)来确定,其中 M_t、σ_t 为 t_s 的均值、方差,一般系数 $\alpha \in [0.2,0.8]$,可以根据实验进行优化调整。

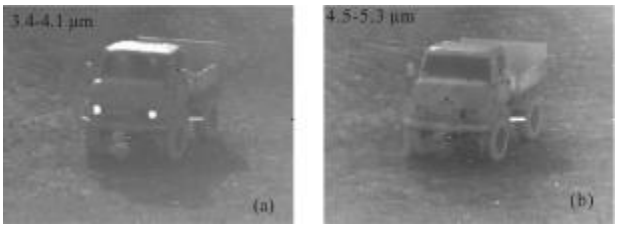
$$T_1 = M_t - \alpha\sigma_t \tag{23}$$

$$T_1 = M_t + \alpha\sigma_t \tag{24}$$

3 实验结果

3.1 定性分析

图 4 是地面卡车(在太阳光的照射下,但发动机未工作)的双色中波红外图像[6],下面以其为例进行实验研究。



(a) 第一细分波段图像　　(b) 第二细分波段

(a) Image in sub-band 1　　(b) Image in sub-band 2

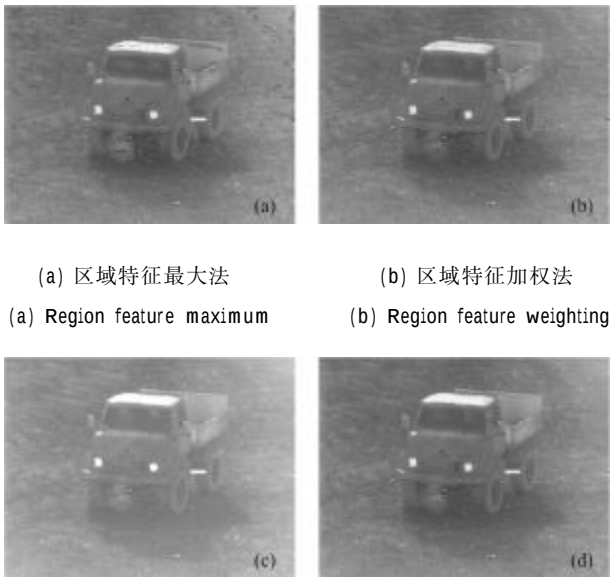
图 4 地面卡车双色中波红外图像

Fig.4 Images of MWIR subdivision band images of ground lorry

第一细分波段图像主要受太阳辐射的影响较大,反射太阳辐射多的部分亮,反射太阳辐射少的部分比较暗,图像的明暗差异比较大,较暗的部分不清楚。亮的部分有两种情况:一种是很亮,如驾驶室顶部;一种是由于太阳的照射及其反射,景物清楚了,如车槽的边缘等、驾驶室中的人、地面、地面上车的阴影等。打开的车灯在第一细分图像中也很明显。

第二细分波段图像受太阳辐射的影响较小,图像的明暗差异不大。图像中主要表现的是来自场景中物体自身的热辐射,温度高的部分其辐射度相对比较高,温度低的部分比较低,景物的细节比较清楚,例如驾驶室顶部、车头、轮胎、右倒车镜等。由于玻璃在 4.5~5.3 μm 波段的透射率小于在 3.4~4.1 μm 波段的透射率,驾驶室的人和车灯光图像上看不见了。

图 5 为低频成分图像分别采用区域特征值最大、区域特征加权、像素值最大和多合成规则的融合结果,计算时,支持度图像融合的合成规则固定不变,采用能量最大法,其中区域特征计算的窗口大小为 7×7。图 5(a)局部区域一致性好,对比度较高,如右倒车镜、轮胎等;但部分地方失真较大,如驾驶室顶部、图像右边地面。图 5(b)比较清晰,如地面、轮胎、车头、右倒车镜、车槽边缘、车的阴影等,图像动态范围大,没有失真;但驾驶室顶部、车灯等部分亮度降低了。图 5(c)驾驶室顶部、车灯等部分亮度没有降低、车槽等比较清楚;但图像整体偏亮,动态范围减小了,地面、地面阴影、车头部等对比度降低了。图 5(d)是采用公式(14)计算的结果,可以看出,其驾驶室顶部、车灯等部分保持了较高的亮度,图像整体对比度较高,图像动态范围大;如地面、轮胎、车头、右倒车镜、车槽边缘、车的阴影等地方比较清晰;没有局部失真现象;因此,其避免了前三者的缺点,发挥了多个合成规则组合的优势。



(a) 区域特征最大法　　(b) 区域特征加权法

(a) Region feature maximum　　(b) Region feature weighting

(c) 像素值最大法　　(d) 多合成规则

(c) Pixel value maximum　　(d) Multiple combination rules

图 5 低频成分图像的不同合成规则融合结果

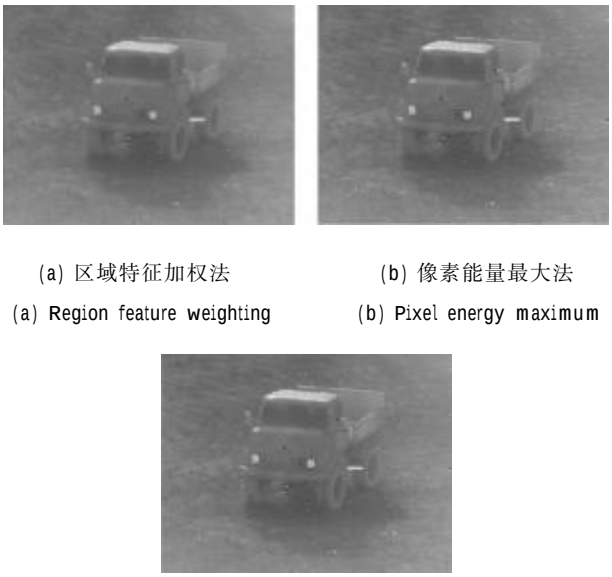
Fig.5 Results fused by diverse combination rules for low-frequency component images

图 6 为支持度图像分别采用区域特征加权、能量最大和多合成规则的融合结果。

计算时,低频成分图像融合的合成规则固定不变,采用简单平均法,其中区域特征计算窗口的大小为 7×7。图 6(a)图像噪声较少,如地面场景;但部分边缘模糊了,如车头部标牌、车槽边缘等,右倒车镜与背景对比度不高。图 6(b)图像边缘清晰,如车头部、右倒车镜、车槽等,但地面部分具有较多噪声。图6(c)

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

是由公式(26)计算的,其保持了较好的边缘,图像清晰了,且噪声也不多,如地面场景;其将前二者的优势集中起来。



(a) 区域特征加权法 (b) 像素能量最大法

(a) Region feature weighting (b) Pixel energy maximum

(c) 多合成规则

(c) Multiple combination rules

图 6 支持度图像不同合成规则的融合结果

Fig.6 Results fused by diverse combination rules for support value images

3.2 定量分析

图像的标准偏差可以反映图像细节的多少,粗糙度是与人的视觉感受相关的细节特征表示量,它们的值越大,说明了图像中细节越多[3]。由于在观察分析图像时,人眼视觉往往采用局部对照的方法,因此这里采用图像的局部标准偏差(LSD)、局部粗糙度(LC)等作为衡量图像细节的多少、反映图像清晰程度的指标。$Q^{AB/F}$ 指标是由 Xydeas 和 Petrovic 提出[7],它是评价源图像的梯度信息融进到融合图像多少的一个度量。取值在[0,1]之间,越接近 1 说明融合图像的质量越好。

文中最终形成的方法是低频成分图像和支持度图像序列同时采用各自的多合成规则方法进行处理。为了进一步说明该方法的效果,除了图 4 的卡车图像,结合其他文献多组不同场景的双色中波红外图像[8-10](分别简称飞机、轿车、天空),与采用单一规则(见公式(4))的支持度变换融合方法进行了比较,如图 7 所示。

图 7 中每组图像从左到右从上倒下分别是第一细分波段图像、第二细分波段图像、单一融合规则融合结果、多合成规则融合结果。根据主观观察,多合成规则融合图像的对比度要明显高于单一规则融合图像,且图像更清晰,其能更有效综合原图像有效信息方面,比单一合成规则的融合图像质量更高。

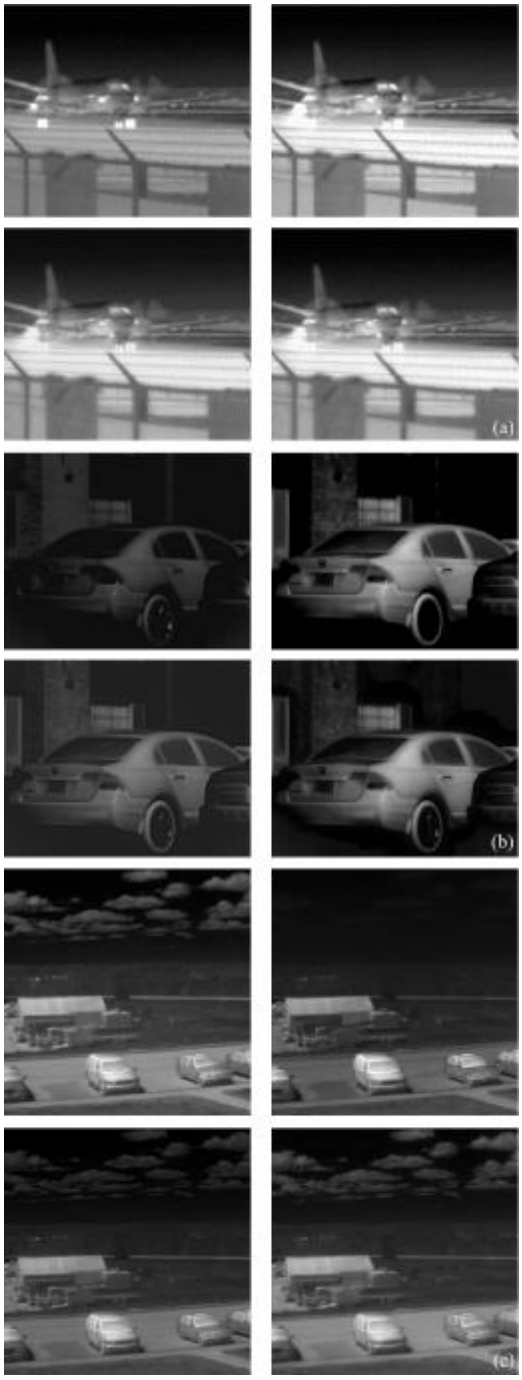


图 7 多组图像的融合结果

Fig.7 Results fused of several dual color MWIR images

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

表 1 中列出了客观评价参数的计算结果，参数的计算窗口为 9×9，参数变化率计算方法为均值 2 和均值 1 的差值与均值 1 的比值。从表中可以看出文中方法的有效性，局部标准偏差和局部粗糙度分别提高了 6.77%和 4.86%，融合质量参数 $Q^{AB/F}$ 提高了 9.59%。实验的运行环境：计算机 CPU 为 Intel Core(TM)i5-2450、2.50 GHz,内存 2 GB,windows7,编程语言为 Matlab R(2009)b。其与主观分析一致,说明了融合的效果。

表 1 单一合成规则与多规则融合方法的参数比较

Tab.1 Parameters comparison between single and multiple combination rules

Method	Images	LSD	LC	$Q^{AB/F}$
Single combination rule	Lorry	5.710 0	5.902 4	0.438 6
	Airplane	8.240 4	7.576 0	0.382 2
	Car	7.806 3	8.507 9	0.419 7
	Sky	7.907 8	9.272 5	0.495 4
	Mean 1	7.416 1	7.814 7	0.434 0
Multiple combination rule	Lorry	5.754 1	6.241 1	0.495 1
	Airplane	8.579 5	7.947 8	0.455 0
	Car	8.884 4	8.766 8	0.424 6
	Sky	8.454 5	9.822 3	0.527 8
	Mean 2	7.918 1	8.194 5	0.475 6
Rate		6.77 %	4.86 %	9.59 %

4 结 论

综上所述,可得出如下结论：

通过支持度变换,对低频成分图像和支持度图像序列分别采用多合成规则组合的方法进行处理,可以综合各个合成规则的优势,取得更好的图像融合效果。实验表明,同单一合成规则的方法相比,文中提出的方法可以融合出更好的结果,局部标准偏差和局部粗糙度分别提高了 6.77 %和 4.86 %,融合质量参数提高了 9.59%。实验说明了文中方法的有效性。

参考文献：

[1] Zhou Xun, Zhou Yong, Luo Muchang, et al. Design of MWIR-LWIR dual-band QWIP [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(8): 1971-1978. (in Chinese)
周勋,周勇,罗木昌,等. 中波-长波红外双色 QWIP 探测器设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 1971-1978.

[2] Yang Fengbao, Ni Guoqiang, Zhang Lei. Images fusion of subdivision band MWIR based on wavelet packet transform [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2008, 27(4): 275-279. (in Chinese)
杨风暴, 倪国强, 张雷. 红外中波细分波段图像的小波包变换融合研究[J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(4): 275-279.

[3] Li Shutao, Yang Bin, Hu Jianwen. Performance comparison of different multi-resolution transforms for image fusion [J]. Information Fusion, 2011, 12(6): 74-84.

[4] Saeedi Jamal, Faez Karim. Infrared and visible images fusion using fuzzy logic and population-based optimization [J]. Applied Soft Computing, 2012, 12: 1041-1054.

[5] Zheng Sheng, Shi Wenzhong, Liu Jian, et al. Multisource image fusion method using support value transform[J]. IEEE Trans Image Processing, 2007, 16(7): 1831-1839.

[6] Havlicek J P, Nguyen C T, Fan G, et al. Integration of a dual-band IR data acquisition system using low-cost PV320 cameras [C]//Infrared Technology and Applications XXXII, Proc of SPIE, 2006, 6206: 1-9.

[7] Xydeas C S, Petrovic V. Objective image fusion performance measure[J]. Electronic Letters, 2000, 36(4): 308-309.

[8] Caulfield J T. Next generation IR focal plane arrays and application [C]// Proceedings of the 32nd Applied Imagery Pattern Rrecognition Workshop (AIPR) 2003, 2003: 0-7695-2029-4.

[9] Chari S, Halford C, Jacobs E, et al. Multi-spectral MWIR image classification using filters derived from independent component analysis[C]// Proc of SPIE,2007, 6576: 65760B.

[10] Shepherd F D, Mooney J M, Reeves T E, et al. Adaptive MWIR spectral imaging sensor [C]// Infrared Systems and Photo Electronic Technology III, Proc of SPIE, 2008, 7055: 7055061-7055068.

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com