

文章编号:1004-4213(2010)01-0132-4

可见光偏振图像的自适应融合算法

曾海芳,顾国华,何伟基,杨蔚

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院,南京 210094)

摘 要:鉴于偏振图像能够增强目标特性识别的特点,提出了可见光下景物偏振信息采集的偏振系统及偏振图像的小波融合算法.在小波系数的低通子带选用基于窗口能量的融合规则,高通子带选用窗口空间频率的自适应加权融合规则.其中自相关函数的设定、模拟退火优化算法的应用提高了融合算法的鲁棒性和自适应性,融合后的图像具有良好的主观视觉效果及客观评价性能,目标与背景的对比度得到显著增强.

关键词:偏振系统;小波融合算法;自相关函数;模拟退火优化算法

中图分类号:TP391

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114001.0132

0 引言

偏振测量通过测量目标辐射和反光的偏振信息来解决传统光度学无法解决的问题,能够取得高精度的结果^[1],尤其是在军事探测中,人造目标表面较光滑,辐射和反射光的线偏振较强,由于自然背景散射较强使偏振度较低,利用人造目标与背景偏振特征差异可以在复杂的自然环境中检测和分离人造目标^[2].

偏振图像与全光图像的融合,不仅保留了全光图像所表现的光谱特征,而且突出了目标的高频特征,显著提高图像的质量.偏振融合方法,一类是直接对各 Stocks 矢量进行融合^[1,3],另一类是由 Stocks 矢量导出偏振度图像进行融合^[2,4],然而 Stocks 的各个分量并不能直接反映与场景相关的本质信息,图像融合仿真效果亦不佳.同时离散小波变换(Discrete Wavelet Transform, DWT)存在平移敏感以及方向性差等不足,故本文在双树小波框架下对偏振度图像进行融合.低通子带选用基于窗口能量的融合规则,自相关函数的设定,兼顾了源图像特征之间的相关性,提高了系统的鲁棒性;高通子带以图像的空间频率作为活性测度,两源图像的空间频率之比作为匹配测度,并引入模拟退火算法,解决常见偏振融合算法中不可根据后续图像处理效果调整规则的缺陷.融合后的图像具有良好的主视觉效

果及客观评价性能.

1 偏振信息的理论依据及获取

1.1 偏振的斯托克斯表示法

电磁波经过地物反射后基本上是部分偏振光,在描述地物的偏振态时,经常使用斯托利克斯矢量^[5]来表示准单色平面波的偏振态,由 I 、 Q 、 U 、 V 四个参量描述平面波的偏振态

$$\begin{aligned} I &= S_0 = \langle E_x^2 \rangle + \langle E_y^2 \rangle \\ Q &= S_1 = \langle E_x^2 \rangle - \langle E_y^2 \rangle \\ U &= S_3 = 2\langle E_x E_y \cos [\delta_y(t) - \delta_x(t)] \rangle \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} V &= 2\langle E_x(t) E_y(t) \sin [\delta_y(t) - \delta_x(t)] \rangle \\ I &= 2[I(0^\circ) + I(60^\circ) + I(120^\circ)]/3 \\ Q &= 4[I(0^\circ) - I(60^\circ)/2 - I(120^\circ)/2]/3 \end{aligned} \quad (2)$$

$$U = 2[I(60^\circ) - I(120^\circ)]/\sqrt{3}$$

式(1)中, E_x 、 E_y 分别是光波电场沿 x 轴和 y 轴的分量.在自然界大气背景及目标物对太阳入射的偏振效应中,圆偏振的分量极少,相对于仪器的误差可以忽略,故假设 $V=0$.偏振度公式如式(3)

$$P = (Q^2 + U^2)^{1/2} / I \quad (3)$$

1.2 实验系统的构造

如图 1(a)所示旋转线偏振器使 α 分别为 0° 、 60° 、 120° ,依次获取景物的 0° 、 60° 、 120° 线偏振分量光强图,Stocks 中 V 近似为零,故系统中可省去相位延迟器.依据式(2)和(3)即可获得景物的偏振度图

基金项目: 部委预研:红外偏振××技术(No. 62301020303)、江苏省“青蓝工程”基金、教育部重点实验室开放基金(No. 2010OEIOF14)和高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20103219120016)资助

第一作者: 曾海芳(1988-),女,硕士研究生,主要研究方向为图像处理和图像融合. Email: haifang517@yahoo.com.cn

导师: 顾国华(1966-),男,教授,主要研究方向为光电信息探测与信号处理. Email: gghnjst@jssmail.com.cn

收稿日期: 2010-07-09; **修回日期:** 2010-08-26

像. 偏振度图像侧重于显示物体的边缘轮廓, 区分物体粗糙度、含水量、材料理化特征. 在图 1(b) 的偏振系统中, 旋转偏振片并经 CCD、数据采集卡可获 Stocks 参量 I 、 Q 、 U 的强度图, 计算机依偏振度公式得偏振度图像, 图像融合仿真最终产生易于观察的融合图像.

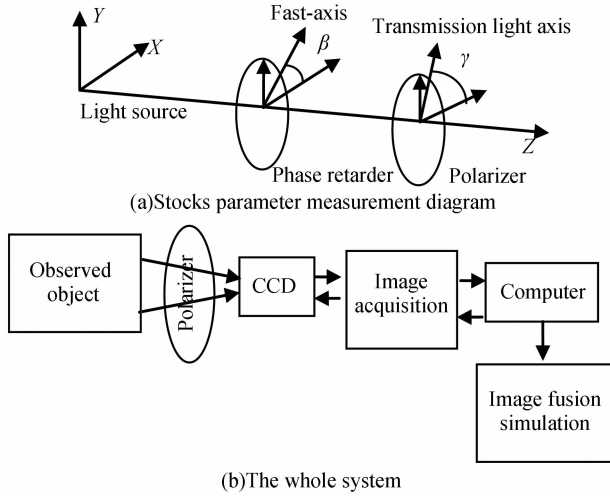


图 1 偏振系统组成

Fig. 1 Polarization system components

2 小波融合方案

2.1 小波框架

基于离散小波存在平移敏感性, 方向有限的缺陷, Kingsbury 等人提出了双树复小波 (Dual-Tree Complex Wavelet Transform, DTCWT) 变换^[6]. DTCWT 产生指向 $\pm 15^\circ$ 、 $\pm 45^\circ$ 、 $\pm 75^\circ$ 的细节子图像, 图像的方向表达增强. 图 2 中显示平移特性差异, 首行输入单位阶跃信号, 相邻的两个输入依次平

移一个采样, 尽管输入信号发生了平移. 图 2(a) 中重构函数的形状和幅值几乎没有变化, 而图 2(b) 中函数的形状和幅值变化剧烈, 由此知 DTCWT 的平移不变性显优于 DWT.

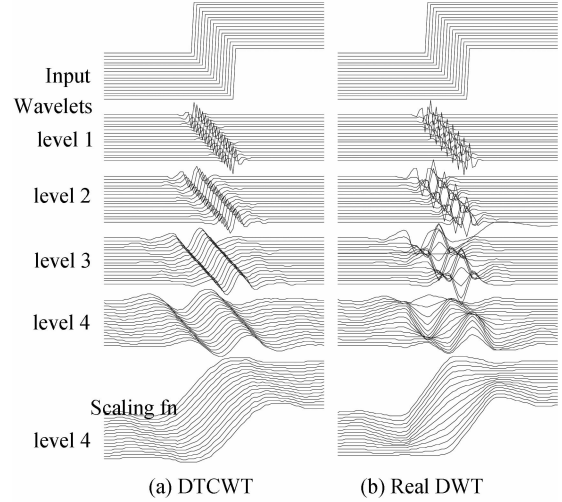


图 2 DTCWT 与 DWT 的移变对比

Fig. 2 Comparison between DTCWT and DWT in shift variability

2.2 融合规则

考虑 DTCWT 各尺度分解层的系数特征, 低通子带和高通子带分别采用不同的融合规则.

2.2.1 低频子带融合

首先, 计算以 (m, n) 点为中心窗口区域内的能量

$$S_{\Delta}(m, n) = \sum_{u \in U} \sum_{v \in V} \omega(u, v) [c_{\Delta}(m+u, n+v)]^2 \quad (5)$$

式中 $\omega(u, v)$ 是窗口模板.

其次, 计算 C_A 与 C_B 之间归一化相关系数

$$M_{AB}(m, n) = [2 \sum_{u \in U} \sum_{v \in V} \omega(u, v) C_A(m+u, n+v) C_B(m+u, n+v)] / [S_A(m, n) + S_B(m, n)] \quad (6)$$

最后, 当 $M_{AB}(m, n) \leq a$ (在此 a 取 0.85), 选取大的局部方差为融合后系数; 当 $M_{AB}(m, n) > a$ 时, 系数相关性较大, 采用加权平均的方法, 加权系数为

$$W(m, n) = \begin{cases} \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left| \frac{1 - M_{AB}(m, n)}{1 - \alpha} \right|, & S_A(m, n) > S_B(m, n) \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left| \frac{1 - M_{AB}(m, n)}{1 - \alpha} \right|, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

2.2.2 高频子带融合

根据式(8)计算窗口空间频率, 获得了融合后的小波系数, 如式(9). 借鉴文献[7]的自适应思想, 采用模拟退火优化算法以获取最佳加权参量.

$$S_F = \sqrt{\left[\sum_{(i,j) \in (U,V)} (F(i,j) - F(i,j-1))^2 + \sum_{(i,j) \in (U,V)} (F(i,j) - F(i-1,j))^2 \right] / M} \quad (8)$$

$$R_i^F = \begin{cases} dR_i^A + (1-d)R_i^B & 1/k < S_F^A/S_F^B < k \\ R_i^A & S_F^A/S_F^B > k \\ R_i^B & S_F^A/S_F^B < 1/k \end{cases} \quad (9)$$

模拟退火优化算法^[8]是局部搜索算法的扩展,它不同于局部搜索之处在于以一定的概率选择邻域中非优解.由初始解 d 和控制参量初值 t 开始,对当前解重复“产生新解→计算目标函数差→接受或舍弃”的迭代,并逐步衰减 t ,算法终止时当前解为最优解.

3 融合结果及算法评价

为验证本文算法的可行性与有效性,分别对采集的室外景物及室内静物图像进行融合.图 3 是室外采集的图像.由于受风速等影响景物发生微移,全光图像因光照较强使得景物的细节信息无法分辨;偏振度图像过度显化边缘轮廓,背景混杂.由图可知,对于存在移变的景物,DTCWT 框架下的融合图像视觉效果显然优于 DWT 框架下的融合, DTCWT 克服了 DWT 融合中因源图像移变产生边缘失真的不足. DTCWT 框架下图像的细节信息得以显示,包括背景石栏的外表粗糙(区域 A)、人物衣

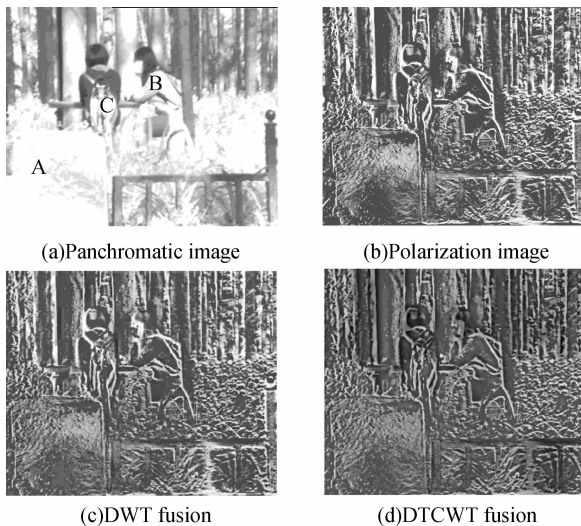


图 3 室外景物的偏振融合结果

Fig. 3 Polarization fusion results of the outdoor scene

物上的商标(区域 B)、书包轮廓(区域 C)等.本文客观性能评价选用常用指标:标准差、平均梯度、信息熵、空间频率.表 1 和表 2 性能评价表明融合后图像的标准差、平均梯度、熵值、空间频率普遍提高,图像的信息量、对比度增加,纹理特征、边缘细节得以显化.

图 4 为室内静止物体的偏振融合结果,其中 A 为铁板、B 为纸张、C 为塑料、D 为泡沫、E 为玻璃、F 为木板.结果显示:图 4(c)和(d)中不仅可以清晰地分辨各物体的边界信息,而且物体的纹理信息也得到较好的保留;全光图像中区域 A、E 的铁板、玻璃表面光滑,几乎无法观测到纹理信息,但融合后显示了其表面的粗糙;分辨图像隐藏的信息,例如区域 H 放置的一个薄物体,玻璃 G 上附着的污渍.

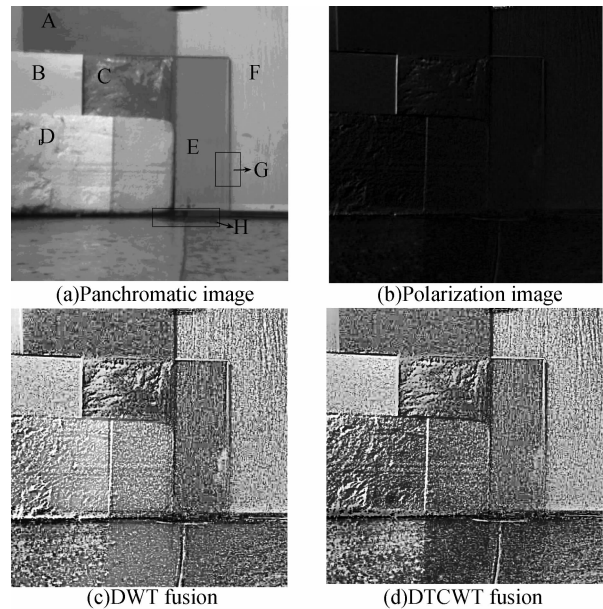


图 4 室内静物的偏振融合结果

Fig. 4 Polarization fusion results of the indoor still scene

表 1 室外景物融合性能指标

Table 1 Outdoor scene image fusion performance

	Standard deviation	Average gradient	Entropy	Spatial frequency
Panchromatic image	0.088 259 09	0.013 650 36	5.026 226 92	
Polarization image	0.208 168 75	0.114 969 28	3.815 558 668	
DWT fusion	0.155 264 76	0.085 871 94	6.323 328 519	0.170 3
I Q U fusion ^[3]	0.184 602 06	0.031 996 89	7.392 844 386 7	0.064 0
The proposed method	0.192 138 54	0.115 944 52	7.045 056 147	0.226 6

表 2 静物融合图像性能指标

Table 2 Still image fusion performance

	Standard deviation	Average gradient	Entropy	Spatial frequency
Panchromatic image	0.144 473 87	0.009 947 05	7.101 468 81	
Polarization image	0.289 848 82	0.140 365 97	4.360 807 442	0.258 3
DWT fusion	0.230 170 2	0.108 064 53	7.645 309 987	0.199 4
I Q U fusion ^[3]	0.147 636 91	0.009 438 99	7.101 468 81	0.019 6
The proposed method	0.258 473 03	0.145 506 62	7.851 030 67	0.267 6

4 结论

本文在 DTCWT 框架下充分利用偏振度图像的边缘和纹理信息,将全光图像和偏振图像融合. 低通子带选用基于窗口能量的融合算法,高通子带选用空间频率自适应加权融合,增强图像的细节信息和纹理特征. 本文提出的偏振图像与全光图像的融合算法,鲁棒性及自适应明显增强,可清晰分辨各物体间的边界信息,较好地保留了物体的纹理信息,以及分辨图像隐藏的物体信息. 客观性能评价显示了本文融合算法相对于 Stocks 参量直接融合方式信息量和对比度更高,纹理特征与边缘细节也更强.

参考文献

- [1] ZHANG Jing-jing, FANG Yong-hua. Novel image fusion algorithm for multi-band polarimetric image based on visible light[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1067-1071.
张晶晶,方勇华. 基于可见光的多波段偏振图像融合新算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1067-1071.
- [2] ZHAO Yong-qiang, PAN Quan, ZHANG Hong-cai. Study of adaptive multi-band polarization image fusion [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(7): 1356-1359.
赵永强,潘泉,张洪才. 自适应多波段偏振图像融合研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(7): 1356-1359.
- [3] ZHONG Qing-xin, XIA Li-min. Image fusion method based on dual-tree complex wavelet transform[J]. *Computer Engineer and Applications*, 2008, **44**(24): 184-187.
钟庆新,夏利民. 一种基于双树复小波变换的图像融合方法[J]. *计算机工程及应用*, 2008, **44**(24): 184-187.
- [4] ZHAO Y, ZHANG L, ZHANG D, et al. Object separation by polarimetric and spectral imagery fusion[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2009, **113**(8): 855-866.
- [5] 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 47-62.
- [6] KINGSBURY N G. Complex wavelets for shift invariant analysis and filtering of signals [J]. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 2001, **10**(3): 234-253.
- [7] YANG Xiao-hui, JIN Hai-yan, JIAO Li-cheng. Adaptive image fusion algorithm for infrared and visible light images based on DT-CWT[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, **26**(6): 419-424.
杨小慧,金海燕,焦李成. 基于 DT-CWT 的红外与可见光图像自适应融合[J]. *红外与毫米波学报*, 2007, **26**(6): 419-424.
- [8] 邢文训,谢金星. 现代优化计算方法[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2005: 78-11.

Adaptive Fusion Algorithm of Polarization Images in Visible Light

ZENG Hai-fang, GU Guo-hua, HE Wei-ji, YANG Wei
(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In consideration of the characteristic of polarization image which can enhance the target identification, a polarization system in visible light and the dual-tree complex wavelet transform(DTCWT) fusion algorithm of polarization image were proposed. In the low-pass sub-band of wavelet coefficients, the fuse rule based window energy was adopted, and in the high-pass sub-band, the rule of spatial frequency self-adaption weighted at window was selected. The setting of autocorrelation and the application of simulated annealing algorithm improved the robustness and adaptability of fusion. The results show that the fused image has good subjective quality and objective evaluation of performance which will enhance the target and background contrast.

Key words: Polarization system; Wavelet fusion algorithm; Autocorrelation function; Simulated annealing algorithm