

文章编号:1004-4213(2010)09-1682-6

基于非负矩阵分解和 IHS 颜色模型的 偏振图像融合方法*

周浦城, 韩裕生, 薛模根, 王峰, 张磊

(解放军炮兵学院 信息工程系, 合肥 230031)

摘 要:针对传统偏振图像伪彩色融合方法存在的不足,提出了一种基于非负矩阵分解和 IHS (Intensity Hue Saturation) 颜色模型的图像融合方法. 首先将偏振信息解析得到的各偏振参量图像作为原始数据集进行非负矩阵分解,得到三幅特征基图像,这些特征基图像包含了场景的大部分偏振信息;然后将三幅特征基图像经直方图匹配之后,分别映射到 IHS 颜色模型的三个颜色通道,最后变换到 RGB 颜色空间,得到融合后的图像. 实验结果表明,该方法不仅具有较好的色彩表达能力,而且有效地突出了目标的细节信息,提高了图像的可判读性.

关键词:光学偏振; 图像融合; 非负矩阵分解; IHS 颜色模型

中图分类号: TP391

文献标识码: A

doi: 10. 3788/gzxb20103909. 1682

0 引言

地球表面的任何物体在反射、散射、透射和辐射电磁波的过程中,都会产生由自身特性所决定的本征偏振信息,并且不同的物质以及相同物质的不同状态,其偏振信息都会有一定的差别^[1]. 与传统的光强度成像探测方式相比,偏振成像探测不仅能够提供物体的表面粗糙度、纹理走向、几何形状等细节信息,还能够得到含水量、导电率、折射率^[2]等理化特性,从而把信息量从三维(光强、光谱和空间)扩展到七维(增加了偏振度、偏振角、偏振椭率和旋转方向),这就为实现目标空间结构的反演奠定了基础^[3]. 由于上述特点,近年来偏振成像探测技术受到广泛关注,在气溶胶探测^[4]、环境监测、医疗诊断、遥感影像校正^[5]及计算机视觉等领域都得到了应用.

由于仅靠人的肉眼并不能直接观察到物体的偏振信息,这就需要以某种形式予以显示,以便为人眼所感知或者方便计算机的后续处理. 根据人眼视觉特性,人眼一般只能区分出数十种灰度等级,而对彩色的分辨力却可以达到成千上万种^[6]. 为此,研究人员提出了各种偏振图像伪彩色融合方法,例如, Wolff^[7]提出了将偏振度 P 映射到色饱和度、偏振角 A 映射到色调、合成光强 I 映射到亮度的融合方法; Jihad 等人^[8]提出从邦加球到颜色空间的偏振图

像伪彩色融合方案; Olsen 等人^[9]提出将合成光强 I 映射到 R 分量、偏振度 P 映射到 G 分量、斯托克斯参量 Q 映射到 B 分量的伪彩色融合算法; Zhao 等人^[10]提出了基于线偏振度调制和 IHS 颜色模型的光谱和偏振图像伪彩色融合方法.

从前人的研究分析可以看出,现有的偏振图像伪彩色融合方案仅仅利用了反映物体本质特征的部分偏振信息,这必然会造成融合结果存在偏振信息的丢失. 针对这一不足,本文基于非负矩阵分解思想,提出了一种新的偏振图像伪彩色融合方法,以便使融合结果蕴含更多的偏振信息,从而有效改善偏振成像探测的能力.

1 偏振成像探测原理

在量化描述物体的偏振态时,由于斯托克斯参量法可由光强度量纲来表征,便于测量和计算,因此常用斯托克斯参量来描述

$$S = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle E_x^2 \rangle + \langle E_y^2 \rangle \\ \langle E_x^2 \rangle - \langle E_y^2 \rangle \\ 2\langle E_x E_y \cos \delta \rangle \\ 2\langle E_x E_y \sin \delta \rangle \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $\langle \rangle$ 表示时间平均效果; E_x 、 E_y 、 δ 分别为光波电场 x 和 y 分量的振幅和相位; I 表示光的总强度; Q 表示水平方向上的线偏振光的强度; U 表示 45° 方向上的线偏振光的强度; V 表示右旋与左旋圆偏振光分量之差,由于自然界中绝大部分物体反射光线中 V 分量都非常微小,因此可以近似认为 $V=0$.

对于偏振态为 $S_i = [I_i \ Q_i \ U_i \ V_i]^T$ 的入射光波,

* 国家自然科学基金(40876095)资助

Tel: 0551-5769642

Email: zhoupc@hit.edu.cn

收稿日期: 2009-10-25

修回日期: 2009-12-16

当经过透光轴与参考坐标夹角为 β 的理想线偏振片后, 出射光波的偏振态 $S_o = [I_o \ Q_o \ U_o \ V_o]^T$ 为

$$S_o = M_p S_i \quad (2)$$

式中 M_p 为理想线偏振片的 Mueller 矩阵

$$M_p = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\beta & \sin 2\beta & 0 \\ \cos 2\beta & \cos^2 2\beta & \cos 2\beta \sin 2\beta & 0 \\ \sin 2\beta & \cos 2\beta \sin 2\beta & \sin^2 2\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

由式(2)、(3)可得

$$I_o = (I_i + Q_i \cos 2\beta + U_i \sin 2\beta) / 2 \quad (4)$$

改变偏振片透光轴与所选参考坐标轴的夹角, 分别得到夹角为 β_1 、 β_2 和 β_3 时的三组出射光强 $I(\beta_1)$ 、 $I(\beta_2)$ 、 $I(\beta_3)$, 代入式(4)即可联立方程组, 求出 I_i 、 Q_i 和 U_i , 并由此可以计算出线偏振度 P 和偏振角 A 为

$$\begin{cases} P = \frac{\sqrt{Q_i^2 + U_i^2}}{I_i} \\ A = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{U_i}{Q_i} \right) \end{cases} \quad (5)$$

2 偏振图像伪彩色融合

2.1 非负矩阵分解理论

非负矩阵分解 (Non-Negative Matrix Factorization, NMF) 是国际上提出的一种矩阵分解方法, 已经在人脸识别、多源图像融合^[11] 等方面取得了成功的应用。

非负矩阵分解算法的基本原理是^[12]: 给定 $n \times m$ 的数据矩阵 V , 其中 $V_{ij} \geq 0 (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$, 和预先定义的正整数 r , 其中 $r < \min(m, n)$, NMF 算法就是要找到两个非负矩阵 $W \in R^{n \times r}$ 和 $H \in R^{r \times m}$, 使得

$$V \approx WH \quad (6)$$

式(6)又可以写成

$$V_{ij} \approx (WH)_{ij} = \sum_{a=1}^r W_{ia} H_{aj}, \forall i, j \quad (7)$$

由于分解前后的矩阵中仅包含非负的元素, 因此, 原矩阵 V 中的一列向量可以解释为对基矩阵 W 中所有列向量 (称为基向量) 的加权和, 而权重系数为系数矩阵 H 中对应列向量中的元素。

非负矩阵的求解过程就是通过迭代使 V 和 WH 之间的重构误差最小. 在实际应用中通常采用最小化剩余的 Frobenius-范数作为目标函数, 即

$$\begin{aligned} \min_{W, H} f(W, H) &\equiv \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (V_{ij} - (WH)_{ij})^2 \\ \text{s. t. } &\begin{cases} W_{ia} \geq 0 \\ H_{bj} \geq 0 \end{cases}, \forall i, a, b, j \end{aligned} \quad (8)$$

对于这类问题的求解, 通常可以采用如下形式

的交替乘法更新规则进行迭代求解^[12]

$$\begin{cases} W_{ia} \leftarrow W_{ia} \frac{\sum_j V_{ij} H_{ja}}{(WH)_{ia}} \\ W_{ia} \leftarrow \frac{W_{ia}}{\sum_j W_{ja}} \\ H_{ja} \leftarrow H_{ja} \frac{\sum_i V_{ij} W_{ia}}{(WH)_{ja}} \end{cases} \quad (9)$$

2.2 基于 NMF 的偏振图像融合

根据式(4), 当改变偏振片透光轴与所选参考坐标轴的夹角, 例如 β 分别取 0° 、 60° 、 120° , 获得三个偏振方向的出射光强 $I(\beta_1)$ 、 $I(\beta_2)$ 、 $I(\beta_3)$, 即可解得

$$\begin{cases} I = \frac{2}{3} [I(0^\circ) + I(60^\circ) + I(120^\circ)] \\ Q = \frac{2}{3} [2I(0^\circ) - I(60^\circ) - I(120^\circ)] \\ U = \frac{2}{\sqrt{3}} [I(60^\circ) - I(120^\circ)] \end{cases} \quad (10)$$

由此根据式(5)可以计算出线偏振度 P 和偏振角 A . 这里把斯托克斯参量 I 、 Q 、 U , 以及偏振度 P 和偏振角 A 所成的图像统称为偏振参量图像. 因此在偏振成像探测中, 物体的偏振特征可以用偏振参量图像来完整描述, 其中图像 I 代表总光强, 不同的光强表示不同的目标具有不同的反射率, 图像 Q 和 U 分别反映了不同方向上的线偏振光的强度, 而偏振度图像 P 和偏振角图像 A 则可以反映出目标表面的粗糙度、纹理等目标自身最本征的辐射信息. 由此可见, 各偏振参量图像分别从不同的角度反映了物体的本征偏振信息, 并且相互之间还存在很强的互补性和冗余性。

为了减少或消除各偏振参量图像之间的冗余性, 以便能够用更稀疏的量来表征物体的偏振特性, 根据非负矩阵分解理论, 可以首先将各偏振参量图像数据组成原始偏振数据向量集合 V

$$V = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ P \\ A \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} I_{11} & Q_{11} & U_{11} & P_{11} & A_{11} \\ I_{12} & Q_{12} & U_{12} & P_{12} & A_{12} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ I_{M \times N} & Q_{M \times N} & U_{M \times N} & P_{M \times N} & A_{M \times N} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中 M 、 N 分别是偏振参量图像所对应的行数和列数。

利用非负矩阵分解的有关方法, 可以将反映了物体本征信息的原始偏振数据向量集合 V 近似分解为矩阵 $W_{n \times r}$ 和矩阵 $H_{r \times m}$ 的乘积. 如果选择的 r 小于 m 或 n , 那么得到的 W 和 H 将会小于原始偏振数据矩阵 V , 这就相当于用相对少的基向量来表示原始偏振数据向量, 算法得到的非负基向量组 W 具有一定的线性无关性和稀疏性, 从而使其对原始

偏振数据的特征及结构具有相当的表达能力. 因此, 只要适当地选取基向量的维数, 就可以获取原始偏振数据的大部分特征信息.

鉴于此, 本文基于非负矩阵分解理论和 IHS 颜色模型, 提出了如下偏振参量图像伪彩色融合方法:

1) 将偏振参量图像 I 、 Q 、 U 、 P 和 A , 按照式 (11) 构成数据向量集合 V .

2) 取 $r=3$, 根据式 (8) 的目标函数, 采用式 (9) 所示的乘法更新规则进行迭代求解, 得到 3 个特征基向量图像: $W = [\omega_1, \omega_2, \omega_3]$. 由于基向量组 W 包含了参与融合的全部偏振参量图像的近似完整信息, 因此, 可以用于物体偏振信息的近似再现.

3) 根据图像清晰度和方差, 将 W 中的特征基向量图像按降序排列, 得到第 1 特征基向量图像 FI_1 、第 2 特征基向量图像 FI_2 和第 3 特征基向量图像 FI_3 .

4) 利用第 1 特征基向量图像 FI_1 的灰度直方图, 分别对第 2 特征基向量图像 FI_2 和第 3 特征基向量图像 FI_3 进行直方图规定化处理.

5) 将直方图规定化处理后的第 1 特征基向量图

像 FI_1 映射为亮度分量 I , 第 2 特征基向量图像 FI_2 映射为色调分量 H , 第 3 特征基向量图像 FI_3 映射为色饱和度分量 S , 得到融合后的图像 F_p ;

6) 将融合图像 F_p 从 IHS 颜色空间变换到 RGB 空间, 最终得到偏振伪彩色融合结果 F .

3 实验结果与分析

为了验证本文提出的偏振参量图像伪彩色融合方法的可行性和有效性, 利用由中科院安徽光机所研制的地面多波段偏振成像系统拍摄了多组偏振图像数据进行试验. 该系统主要由偏振成像光学系统、波段变换装置、面阵 CCD 探测器、偏振图像同步采集单元和偏振信息解析单元组成. 其中, 偏振成像光学系统包含 3 个不同偏振方向的线偏振片, 完成对 3 个不同偏振方向的目标反射辐射光能量的采集.

图 1(a)~(c) 是采用 555 nm 波段拍摄的网眼布在草地背景下对应于 0° 、 60° 和 120° 三幅不同偏振方向的强度图像, (d)~(h) 分别是采用式 (5) 和式 (10) 进行偏振信息解析后得到的各偏振参量图像.

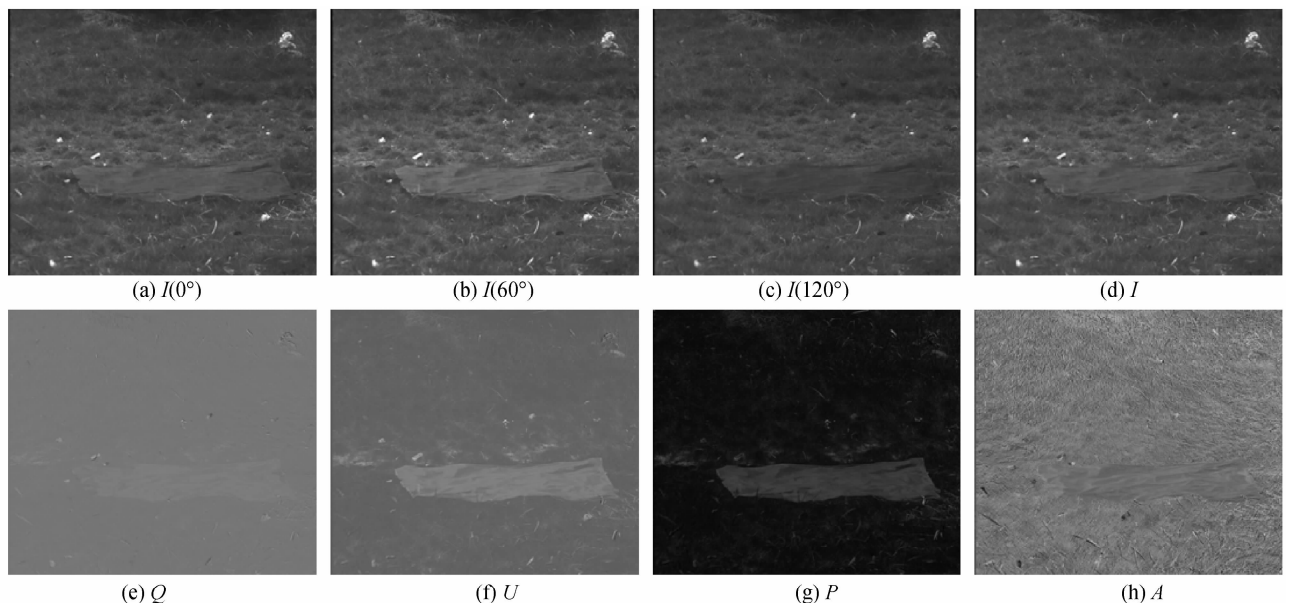


图 1 网眼布对应的不同偏振方向强度图像和偏振参量图像

Fig. 1 Intensity images of different polarization directions and polarization parameter images of the camouflage fabric

图 2(a)~(c) 是采用非负矩阵分解得到的 3 幅特征基向量图像. 不难发现, 在特征基向量图像中网眼布与草地背景之间均具有较大反差, 网眼布的轮廓边缘非常清晰, 且表面几何形状、纹理等细节信息保持较好. 利用这三幅特征基向量图像, 采用本文提出的伪彩色融合方法 (NMF), 并与 Wolff 提出的伪

彩色融合方法 (IHS)、Olsen 等人提出的伪彩色模型 (IPQ) 进行了比较, 结果如图 3. 从目视效果来看, 利用本文方法得到的融合结果中场景的颜色搭配更加合理, 色彩信息更加鲜明、突出, 渲染效果较好, 整个场景的颜色层次感较强, 使得目标更加容易从背景中区分出来.

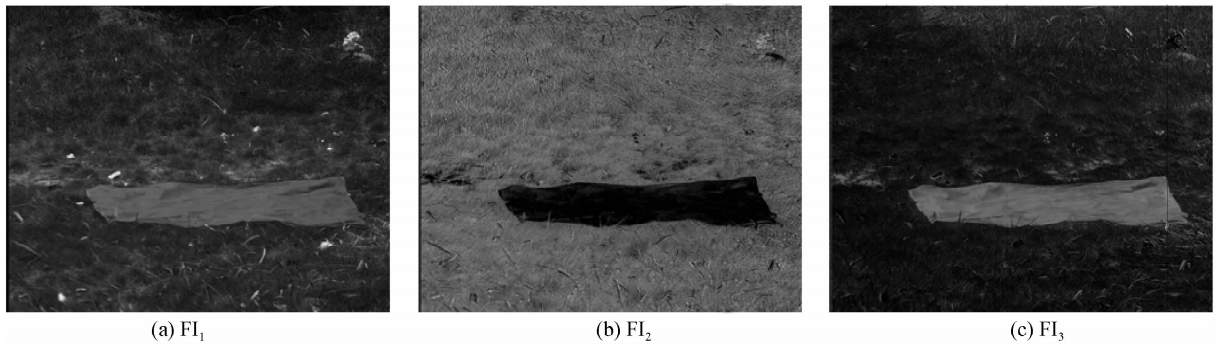


图 2 利用 NMF 得到的三幅基向量图像
Fig. 2 Three basic vector images obtained by NMF

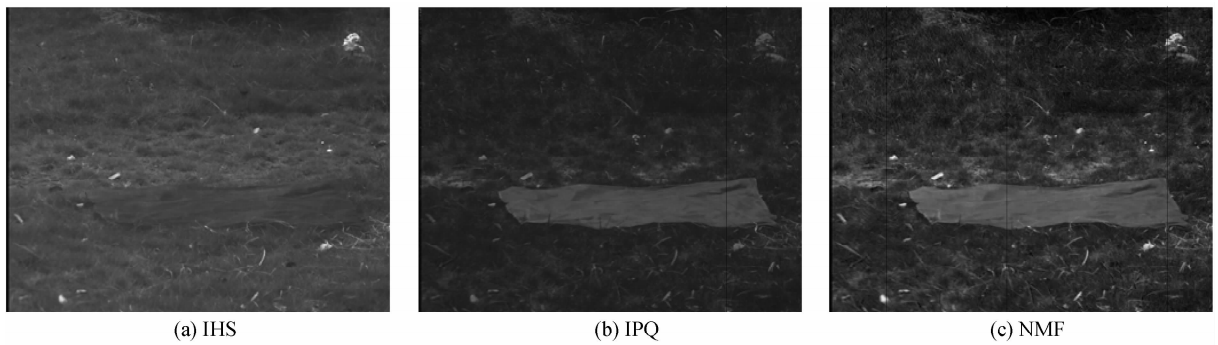


图 3 不同伪彩色融合方法的对比效果
Fig. 3 Results of different false color image fusion methods

为比较不同偏振图像伪彩色融合方法的优劣, 分别采用 Canny 边缘检测算子和 Achanta 等人^[13]提出的彩色图像区域分割方法对不同融合图像分别进行边缘检测和 k -均值聚类分割, 结果如图 4 和图 5. 从图 4 中可以看出, 利用本文方法得到的融合图

像中, 网眼布的边缘轮廓保持更加完整、清晰, 这与对图 2 和图 3 进行目视判断的结果是一致的, 而利用 IHS 和 IPQ 融合方法的图像中, 对网眼布的边缘检测结果则比较杂乱无章, 并且含有较多的虚假边缘信息. 在图 5 中, 利用 k -均值聚类算法(实验中 k

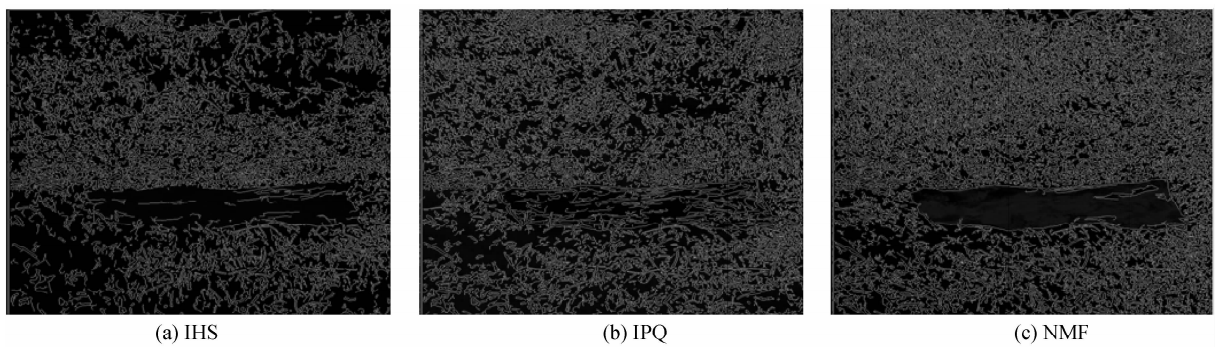


图 4 不同伪彩色融合图像的边缘检测结果
Fig. 4 Edge detection results of different false color image fusion methods

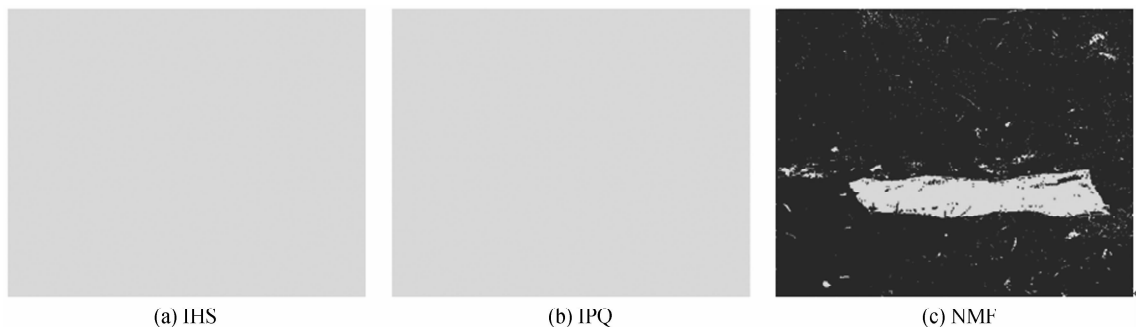


图 5 不同伪彩色融合图像的区域分割结果
Fig. 5 Region segment results of different false color image fusion methods

取5)对本文方法得到的结果进行区域分割,可以将目标从背景中显著分割出来,而IHS和IPQ融合结果则分割失败,这表明,本文方法得到的结果由于融入了更多的场景偏振信息,因此可以有效地抑制杂乱背景,突出目标的细节特征,从而能够改善利用偏振成像探测手段识别目标的能力。

4 结论

偏振成像探测能够在杂乱背景下有效地改善目标的识别率,因此近年来成为信息获取领域的研究热点,而偏振信息解析与综合则是偏振成像探测中涉及的一个重要研究课题。

本文利用偏振信息解析得到的各偏振参量图像之间存在的冗余性和互补性,借助非负矩阵分解理论进行融合处理,得到稀疏表示的特征基向量图像,使得融合后的结果能够较好地保留物体的本征偏振信息.在此基础上,利用IHS颜色模型进行伪彩色映射,得到最终的融合结果.通过与其它几种偏振信息伪彩色融合方法进行对比试验,结果表明,利用本文提出的方法得到的融合结果,不仅具有较好的颜色区分度,而且能够保留较多的细节特征,从而可以有效地改善偏振成像探测的能力.在下一步工作中将着重研究偏振图像的近自然彩色融合方法,使得融合后的结果更加接近人眼视觉感知习惯。

参考文献

- [1] QIAO Yan-li, YANG Shi-zhi, LUO Rui-zhi, *et al.* Research on polarized spectral monitoring for remotes sensing of earth [J]. *High Technology Letters*, 2001, **11**(7): 36-39.
乔延利, 杨世植, 罗睿智, 等. 对地遥感中的光谱偏振探测方法研究[J]. 高技术通讯, 2001, **11**(7): 36-39.
- [2] THILAK V, VOELZ D G, CREUSERE C D. Polarization-based index of refraction and reflection angle estimation for remote sensing applications[J]. *Appl Opt*, 2007, **46**(30): 7527-7536.
- [3] TYO J S, GOLDSTEIN D L, CHENAULT D B, *et al.* Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications[J]. *Appl Opt*, 2006, **45**(22): 5453-5469.
- [4] SHAO Shi-yong, HUANG Yin-bo, RAO Rui-zhong. Aerosol particle shape and scattering analyzer based on imaging[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 704-708.
邵士勇, 黄印博, 饶瑞中. 基于成像法的气溶胶粒形和散射分析仪[J]. 光子学报, 2009, **38**(3): 704-708.
- [5] YANG Jin-hua, DI Xu, YUE Chun-min, *et al.* Polarization analysis on reflected light and three-dimensional measurement of object shape[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 6111-6115.
杨进华, 邸旭, 岳春敏, 等. 反射光偏振特性分析与物体形状的测量[J]. 光学学报, 2008, **28**(11): 6111-6115.
- [6] TOET A. Natural colour mapping for multiband night vision imagery[J]. *Information Fusion*, 2003, **4**(3): 155-166.
- [7] WOLFF L B. Polarization vision: a new sensory approach to image understanding [J]. *Image and Vision Computing*, 1997, **15**(2): 81-93.
- [8] JIHAD S Z, ANTONELLO D M. Physical interpretation of polarization-encoded images by color preview[J]. *Opt Exp*, 2006, **14**(13): 5916-5927.
- [9] OLSEN R C, EYLER M, PUETZ A M, *et al.* Initial results and field applications of a polarization imaging camera [C]. *SPIE*, 2009: 7461-7470.
- [10] 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.
- [11] MIAO Qi-guang, WANG Bao-shu. Multi-focus image fusion based on non-negative matrix factorization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6): 755-759.
苗启广, 王宝树. 基于非负矩阵分解的多聚焦图像融合研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(6): 755-759.
- [12] LEE D D, SEUNG H S. Learning the parts of objects by non-negative matrix factorization [J]. *Nature*, 1999, **401**(21): 788-791.
- [13] ACHANTA R, ESTRADA F, WILSP, *et al.* Salient region detection and segmentation; Computer Vision Systems: proceedings of the 6th International Conference, ICVS 2008 Santorini, Greece, Many 12-15, 2008[C]. Berlin: Springer, 2008: 66-75.

Polarization Image Fusion Approach Based on Non-Negative Matrix Factorization and IHS Color Model

ZHOU Pu-cheng, HAN Yu-sheng, XUE Mo-gen, WANG Feng, ZHANG Lei
(*Department of Information Engineering, Artillery Academy of PLA, Hefei 230031, China*)

Abstract: To overcome the drawback of conventional false color fusion methods for polarization images, a image fusion approach based on non-negative factorization and IHS(Intensity Hus Saturation)color model is presented. Firstly, all of the polarization parameter images obtained by polarization information analysis are taken as source data set for non-negative matrix factorization, so as to extract three feature basis images containing most of the polarization information of the object. Then, after histogram matching, these three feature basis images are mapped into three color channels of IHS color model. Finally, the fused image is achieved after the transform from IHS to RGB color model. Experiment results have shown that, the proposed method has better color representation capability, and effectively pops out detailed information of objects, and enhances its readability.

Key words: Optical polarization; Image fusion; Non-negative matrix factorization; IHS color model



ZHOU Pu-cheng was born in 1977. He received the Ph. D. degree in computer application technology from Harbin Institute of Technology in 2006. Now he is a lecturer at Department of Information Engineering of Artillery Academy. His research interests focus on information processing in polarimetric remote sensing, image fusion and intelligent computing.