

文章编号:1004-4213(2011)01-0149-5

基于颜色迁移和聚类分割的偏振图像融合方法

周浦城,张洪坤,薛模根

(解放军炮兵学院 信息工程系,合肥 230031)

摘 要:为克服当前偏振图像融合方法存在的不足,提出了一种基于颜色迁移和聚类分割的偏振图像近自然彩色融合方法.该方法首先将偏振参量图像映射到 HSI 颜色空间,再得到初步的融合图像后将它变换到 YIQ 颜色空间,并采用颜色迁移技术对其进行颜色修正.通过将修正后的图像变换到 HSI 颜色空间,并利用对线偏振度图像进行模糊 C-均值聚类分割的结果调整融合图像的色调和色饱和度.最后,将处理结果变换回 RGB 颜色空间,得到最终的图像融合结果.实验结果表明,利用该方法得到的融合图像不仅与人眼视觉感知习惯一致,而且显著增强了目标与背景的对比度.

关键词:光学偏振;图像融合;颜色迁移;聚类分割

中图分类号:TP391

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114001.0149

0 引言

在光波与物体相互作用的过程中,由于物体材料、表面粗糙度、几何形状等的不同,从而导致入射光波的偏振态的变化.利用偏振成像探测获取的物体反射或辐射光波的偏振态信息,可以有效区分不同材质、不同表面形态、不同导电率的散射体,因而在目标探测与识别等领域具有广泛的应用前景.

在偏振成像探测中,通常利用斯托克斯参量 I 、 Q 、 U 以及偏振度和偏振角来表征偏振信息,并以灰度图像的形式表现出来.根据人眼的视觉特性,人眼一般只能同时区分出数十种不同的灰度等级,但对颜色的分辨力却可以达到成千上万种^[1].实践表明,适当的伪彩色渲染有助于提高观察者在目标探测与识别等任务中的效率^[2].为此,研究人员提出了各种偏振图像伪彩色融合方案,例如,Wolff 提出将偏振度映射到色饱和度,偏振角映射到色调、合成光强映射到亮度的偏振信息融合方案^[3];Jihad 等人提出从邦加球到颜色空间的偏振信息伪彩色融合方法^[4];Olsen 等人提出将合成光强、偏振度和 Q 分别映射到 RGB 颜色空间的 R 、 G 和 B 分量^[5];Zhao 等人提出利用线偏振度调制和 HSI 颜色模型来融合光谱和偏振图像信息^[6].

尽管现有的偏振图像伪彩色融合方法能够在一定程度上获得伪彩色渲染效果,但结果往往与人眼实际视觉感知习惯并不一致.研究表明,长时间的观察反而容易使观察者产生疲劳甚至错觉,从而可能

会阻碍正确的态势感知^[7].因此,本文提出一种新的偏振图像伪彩色融合方法,以便使融合结果更加符合人类视觉的感知习惯,达到改善融合图像的质量、提高偏振成像探测性能的目的.

1 偏振信息的定量描述

在量化描述物体的反射或辐射光波的偏振态时,常采用斯托克斯参量来表征

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

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 $V=0$.

在任一 xoy 平面,与 x 轴夹角为 β 的偏振片透过方向上进行观测所得到的光强可以用式(2)表示

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

当改变偏振片透光轴与所选参考坐标轴的夹角,即分别得到夹角为 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(2)即可联立求出 I_i 、 Q_i 和 U_i ,并由此可以计算出线偏振度(Degree of Linear Polarization, DoLP)和偏振角 ψ

第一作者:周浦城(1977—),男,讲师,博士,主要研究方向为偏振遥感、图像信息处理. Email:zhoupc@hit.edu.cn

收稿日期:2010-06-03;修回日期:2010-07-19

$$\begin{cases} \text{DoLP} = \frac{\sqrt{Q_i^2 + U_i^2}}{I_i}, 0 \leq \text{DoLP} \leq 1 \\ \psi = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U_i}{Q_i}\right), 0^\circ \leq \psi \leq 180^\circ \end{cases} \quad (3)$$

这里把斯托克斯参量 I 、 Q 、 U 以及线偏振度 DoLP 和偏振角 ψ 所成的图像统称为偏振参量图像。

2 偏振图像伪彩色融合

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,其中合成强度图像 I 反映了物体的反射率,它包含了物体丰富的细节信息,而线偏振度图像 DoLP 和偏振角图像 ψ 则可以反映出物体表面的粗糙度、导电率以及纹理等信息^[8]. 因此,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. 所以通过将合成强度图像、线偏振度图像以及偏振角图像三者的融合,其结果将携带场景更加丰富的信息,从而达到改善目标探测与识别性能的目的。

2.1 偏振参量图像伪彩色融合

为了使偏振信息伪彩色融合图像具有近自然的色彩表现形式,以便使融合结果与人眼视觉感知习惯接近或一致,本文借鉴 Reinhard 提出的颜色迁移技术^[9],利用白天拍摄的自然场景图像对偏振参量图像伪彩色融合结果进行颜色修正. Toet 最早将这种技术用于夜视图像融合,取得了较好的效果^[10]. 为了避免原始的颜色迁移技术需要在 RGB 与 $l\alpha\beta$ 颜色空间进行转换而带来的对数与指数等复杂运算的问题,这里采用 YIQ 颜色空间进行颜色传递,具体融合过程为:

1) 将偏振参量图像映射到 HSI 颜色空间,得到初步的伪彩色融合结果 $FI_1 = (I_1, S_1, H_1)$.

借鉴 Wolff 的做法,即分别将 I 、DoLP 和 ψ 映射到 HSI 颜色空间的 I 、 S 和 H 三个颜色通道

$$\begin{cases} I_1 = I \\ S_1 = \text{DoLP} \\ H_1 = 2 * \psi \end{cases} \quad (4)$$

通过上述映射,实现不同偏振信息到 HSI 颜色空间的转换,从而可以利用亮度特征来分析目标辐射强度特性,借助色彩特性来分析目标偏振特性.

2) 将融合结果 FI_1 转换到 RGB 颜色空间,得到伪彩色融合图像 FI_2 .

从 HSI 颜色空间转换到 RGB 颜色空间有多种方法,这里采用线性变换函数^[11],如式(5)

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \\ 1 & \sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 v_1 和 v_2 定义为

$$\begin{cases} v_1 = S_1 * \frac{1}{\sqrt{1 + (\tan H_1)^2}} \\ v_2 = S_1 * \frac{\tan H_1}{\sqrt{1 + (\tan H_1)^2}} \end{cases} \quad (6)$$

3) 选择参考图像 RI , 在 YIQ 颜色空间利用 RI 对 FI_2 进行颜色迁移,得到融合结果 FI_3 .

为了使融合结果具有近自然的色彩外观,本文首先选择一幅具有相似背景的自然场景图像 RI 作为参考图像,然后在 YIQ 颜色空间利用 RI 的颜色特性对融合结果 FI_2 进行颜色修正. 为此,分别将图像 RI 和 FI_2 转换到 YIQ 颜色空间

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.274 & -0.322 \\ 0.211 & -0.523 & 0.312 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (7)$$

然后,利用 RI 在 Y 、 I 和 Q 通道的均值和标准差分别对 FI_2 在对应的颜色通道上进行颜色调整,即

$$\begin{cases} Y_F = \frac{\sigma_R^Y}{\sigma_S^Y} (Y_S - \mu_S^Y) + \mu_R^Y \\ I_F = \frac{\sigma_R^I}{\sigma_S^I} (I_S - \mu_S^I) + \mu_R^I \\ Q_F = \frac{\sigma_R^Q}{\sigma_S^Q} (Q_S - \mu_S^Q) + \mu_R^Q \end{cases} \quad (8)$$

式中:下标 S 、 R 和 F 分别代表图像 FI_2 、参考图像 RI 以及处理结果; μ 和 σ 分别为相应颜色通道的均值和标准差. 得到的结果 (Y_F, I_F, Q_F) 记为 FI_3 .

4) 将融合结果 FI_3 由 YIQ 颜色空间变换至 RGB 颜色空间,得到融合结果 $FI_4 = (R_F, G_F, B_F)$.

为此,采用变换公式

$$\begin{bmatrix} R_F \\ G_F \\ B_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.956 & 0.621 \\ 1.000 & -0.272 & -0.647 \\ 1.000 & -1.106 & 1.703 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_F \\ I_F \\ Q_F \end{bmatrix} \quad (9)$$

通过采用上述颜色迁移技术,可以使融合图像与所选的自然场景图像具有相似的颜色统计分布规律,从而使得偏振参量图像伪彩色融合结果的色彩外观接近或者与人眼视觉的感知习惯相一致.

2.2 颜色对比度增强

根据偏振成像探测原理,利用线偏振度信息能够较好地区分人工目标和自然地物. 因为人工目标表面大体上是一种非自然的光滑,所以与自然地物表面相比,它将产生较大的线偏振度. 因此,为了进

一步突出自然地物背景下的人工目标, 提高目标与背景之间的颜色对比度, 改善目标的可探测性, 考虑到 HSI 颜色模型与人的颜色感知一一对应, 本文基于线偏振度图像提出的颜色对比度增强为:

1) 将偏振参量图像伪彩色融合结果 FI_4 变换到 HSI 颜色空间, 即 $FI_4 = (I_4, S_4, H_4)$.

2) 利用模糊 C-均值聚类算法对线偏振度图像 DoLP 进行聚类分割, 得到分割结果 sP .

模糊 C-均值聚类是从 C-均值聚类推广而来的一种聚类算法. 记线偏振度图像 DoLP 中所有像素构成的集合为 $X = \{x_i\} (i=1, 2, \dots, n, n \text{ 为图像上的像素总数}), C$ 为设定的类别数目, $v_j (j=1, 2, \dots, C)$ 为第 i 个聚类的中心, u_{ji} 为第 i 个像素 x_i 对第 j 类的隶属度函数, 则模糊 C-均值聚类的目标就是最小化全局代价函数

$$\min J(\mathbf{U}, \mathbf{V}) = \min \left\{ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^C u_{ji}^b \|x_i - v_j\|^2 \right\} \quad (10)$$

式中: b 是一个用来控制不同类别的混合程度的自由参量; $\mathbf{U} = \{u_{ji}\}$ 为隶属度矩阵; $\mathbf{V} = (v_1, v_2, \dots, v_C)$ 为聚类中心的集合, 并且满足

$$\sum_{j=1}^C u_{ji} = 1, \forall i=1, 2, \dots, n \quad (11)$$

为进一步改善模糊 C-均值聚类分割的效果, 对聚类分割后的结果进行数学形态学腐蚀和膨胀运算, 并采用中值滤波器进行平滑处理.

3) 利用模糊 C-均值聚类分割结果 sP 分别对 FI_4 的色调分量 H_4 和色饱和度分量 S_4 进行调整.

为提高目标与背景之间的颜色对比度, 对融合结果的色调和色饱和度分量的调整方式如式(12)、(13)

$$H_5(i, j) = \begin{cases} H_4(i, j), & sP(i, j) = 0 \\ \frac{E(H_4) + H_4(i, j)}{2} + 180^\circ, & sP(i, j) = 1 \end{cases} \quad (12)$$

$$S_5(i, j) = \begin{cases} S_4(i, j), & sP(i, j) = 0 \\ \frac{|S_4(i, j) - E(S_4)|}{E(|S_4(i, j) - E(S_4)|)}, & sP(i, j) = 1 \end{cases} \quad (13)$$

式中 $E(\cdot)$ 表示求平均值. 根据式(12), 对于分割结果中属于目标的像素, 其色调采用整幅图像的平均色调与当前像素的色调的平均值的补色进行修正.

式(13)表明, 若当前像素属于目标区域, 那么其色饱和度和分量是利用该像素点的色饱和度与整幅图像的平均色饱和度的偏差与该偏差的平均值的比值来调整.

4) 将结果 (I_4, S_5, H_5) 由 HSI 颜色空间变换回 RGB 颜色空间, 得到最终的伪彩色融合结果 FI .

3 实验结果与分析

为了验证本文提出的偏振图像伪彩色融合方法的可行性和有效性, 本文采用由中国科学院安徽光学精密机械研究所遥感研究室研制的地面多波段偏振成像系统所拍摄的多组偏振图像数据来进行测试.

图 1(a)~(c) 给出的是其中一组采用 665 nm 波段拍摄的绿草地背景下的伪装网偏振图像数据, 经偏振信息解析得到的合成强度、线偏振度以及偏振角图像.

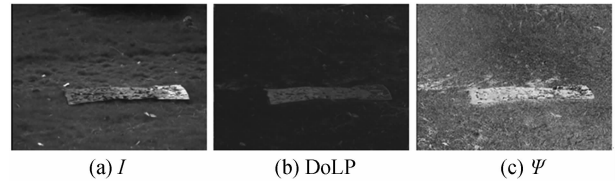


图 1 伪装网对应的不同偏振参量图像
Fig. 1 Different polarization parameter images of the camouflage fabric

图 2 是采用不同伪彩色融合方法得到的结果. 其中, 图 2(a) 是利用 Wolff 提出的融合方案得到的结果; (b) 是基于 Olsen 等人提出的融合方法得到的结果; (c) 是采用 Zhao 等人提出的融合方法; (d) 是选取的自然场景彩色图像; (e) 是基于 Toet 等人提出的基于 $l\alpha\beta$ 颜色空间得到的伪彩色融合结果; (f) 是利用本文提出的方法得到的结果. 从目视效果来看, 与其他几种伪彩色融合方法相比, 本文提出的方法以及 Toet 提出的方法得到的融合结果均能够获得接近自然彩色的渲染效果, 图像中场景的颜色搭配更加合理, 较好地接近人眼的视觉感知习惯. 同时通过比较图 2(e) 和 (f) 可以看出, 在利用本文提出的方法得到的融合结果中, 伪装网与草地背景之间的颜色差异更大, 使得伪装网更加显著和突出.

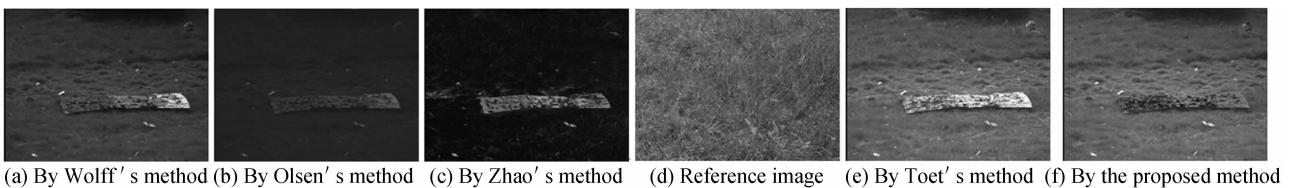


图 2 不同伪彩色融合方法得到的结果
Fig. 2 Results using different false color image fusion methods

为定量比较不同偏振图像伪彩色融合方法的性能,鉴于采用 HSI 颜色空间能够较好地定量分析人眼对颜色的视觉作用,本文首先将不同图像融合结果变换到 HSI 颜色空间,然后从两个方面进行比较.一方面比较不同融合结果分别对应于光强分量 I 的图像质量,这里选择图像熵(简称 EntrP)、图像灰度标准差(简称 AvD)和平均梯度(简称 AvG)三个定量评价指标;另一方面,采用 TseCha 提出的 HSI 彩色空间的彩色差公式^[12]来计算目标与背景之间的相对颜色对比度,具体定义为

$$D_{\text{Color}} = \sqrt{(I_T - I_B)^2 + S_T^2 + S_B^2 - 2S_T S_B \cos\theta} \quad (14)$$

式中 T 代表目标, B 表示背景, θ 是目标和背景对应于色调分量之间的夹角,即

$$\theta = \begin{cases} |H_T - H_B|, & |H_T - H_B| \leq \pi \\ 2\pi - |H_T - H_B|, & |H_T - H_B| > \pi \end{cases} \quad (15)$$

基于定量评价指标计算得到的结果如表 1. 可以看出,利用本文方法得到的融合结果中 EntrP、AvD 以及 AvG 均有一定幅度的提高. EntrP 越大,说明图像包含的信息量越大. AvD 越大表明图像灰度分布越大,图像的对比度越大. AvG 可敏感地反映图像对微小细节反差表达的能力, AvG 越大表明图像层次越多,图像越清晰. 目标与背景之间的相对颜色对比度越大,表明目标具有更加易于区分背景的颜色特征. 计算结果表明,利用本文方法得到的融合结果不仅图像质量较好,而且目标与背景的颜色对比度也有较大幅度地提高,从而使得目标的特征明显异于自然背景,目标的可探测性得到显著改善.

表 1 不同融合图像的评价结果

Table 1 Evaluation results for different fusion images

	EntrP	AvD	AvG	D_{Color}
Wolff's method	2.787	42.6	58.3	0.257
Olsen's method	2.269	42.8	60.27	0.467
Zhao's method	2.584	16.9	19.5	0.502
Toet's method	2.759	45.5	62.2	0.238
The proposed method	2.901	45.9	62.1	0.913

4 结论

根据偏振参量图像之间存在的冗余性和互补性,本文首先将偏振参量图像映射到 HSI 颜色空间的不同颜色通道,实现初步的偏振信息伪彩色融合.在此基础上,通过选择合适的自然场景彩色图像,基

于 YIQ 颜色空间采用颜色迁移技术对伪彩色融合结果进行颜色修正,使之具有近自然彩色的渲染效果.为进一步改善目标的可探测性,利用对线偏振度图像进行模糊 C-均值聚类分割的结果,分别对融合结果的色调和色饱和度分量进行调整,以增强颜色对比度.实验结果表明,利用本文提出的方法得到的融合结果,不仅使目标与背景具有较好的颜色区分度和接近人眼视觉感觉习惯的近自然彩色效果,而且图像的质量更好.

参考文献

- [1] NI Gguo-qiang, XIAO Man-jun, QIN Qing-wang, *et al.* Development of near natural color image fusion algorithms and real-time image fusion system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2102-2109.
倪国强,肖蔓君,秦庆旺,等.近自然彩色图像融合算法及其实时处理系统的发展[J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2101-2109.
- [2] FU J, CAULFIELD H J. Applying color discrimination to polarization discrimination in images[J]. *Opt Commun*, 2007, **272**(2): 362-366.
- [3] WOLFF L B. Polarization vision: a new sensory approach to image understanding [J]. *Image and Vision Computing*, 1997, **15**(2): 81-93.
- [4] AINOUS S, ZALLAT J, de MARTINO A, *et al.* Physical interpretation of polarization-encoded images by color preview [J]. *Opt Express*, 2006, **14**(13): 5916-5927.
- [5] OLSEN R C, EYLER M, PUETZ A M, *et al.* Initial results and field applications of a polarization imaging camera[C]// SHAW J A, TYO J S. Proceeding of the SPIE. Bellingham: SPIE, 2009, **7461**: 7461-7470.
- [6] 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.
- [7] VARGA J T. Evaluation of operator performance using true color and artificial color in natural scene perception [R]. Monterey, CA: Naval Postgraduate School, 1999.
- [8] 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.
- [9] REINHARD E, ASHIKHMIN M, GOOCH B, *et al.* Color transfer between images[J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2001, **21**(5): 34-41.
- [10] TOET A. Natural colour mapping for multiband night vision imagery[J]. *Information Fusion*, 2003, **4**(3): 155-166.
- [11] TU T M, SU S C, SHYU H C, *et al.* A new look at IHS-like image fusion methods[J]. *Information Fusion*, 2001, **2**(2): 177-186.
- [12] TSENG D C, CHANG C H. Color segmentation using perceptual attributes [C]// BARETT E B. Proceeding of 11th International Conference on Pattern Recognition. Hague, Netherlands, 1992, III: 228-231.

Polarization Image Fusion Method Using Color Transfer and Clustering-Based Segmentation

ZHOU Pu-cheng, ZHANG Hong-kun, XUE Mo-gen

(Department of Information Engineering, Artillery Academy of People's Liberation Army, Hefei 230031, China)

Abstract: To overcome shortcomings of current polarization image fusion methods, a novel false-color imagery fusion approach based on color transfer and clustering-based segmentation was proposed. Firstly, the images by polarization information analysis were mapped into HSI color space, thus the initial false-color fused image was obtained. Then, the fused image was transformed into YIQ color space, and the chromatic characteristics each channel was modified using those of the reference image. After that, the modified image was transformed into HSI color space, and the segmentation result of the image of degree of linear polarization using fuzzy C-means clustering algorithm was used to adjust its hue component and saturation component. Finally, the resultant image was transformed back into RGB color space, so the final fused image was obtained. Experimental results show that, the proposed method has the merit that the fused result is consistent with the habit of human vision perception, and makes the contrast of artificial targets within the cluttered background more outstanding.

Key words: Optical polarization; Image fusion; Color transfer; Clustering-based segmentation