

文章编号:1001-9014(2006)06-0455-05

基于拮抗视觉特性的多波段彩色夜视 融合方法研究

王岭雪, 金伟其, 石俊生, 王生祥, 王霞
(北京理工大学 光电工程系, 北京 100081)

摘要:以差分高斯函数(DOG)模拟人眼视网膜中的同心圆拮抗特性,分析了基于DOG的ON-中心OFF-周边分离网络(CSSN)平衡方程,发现其有增强反差、突出边缘和压缩动态范围的特点.将CSSN平衡方程应用于夜视图像的增强与融合,取得了保留图像间共有信息、增强互补信息的作用.提出了以CSSN平衡方程为基础的多种彩色夜视融合结构,包括双波段微光、微光/长波红外、中/长波红外、微光/中/长波红外,其中的彩色映射规则用色彩的冷暖突出红外图像的冷热目标,细节丰富的微光图像作为绿色背景.仿真结果表明,这些融合结构均获得了色彩自然的彩色融合效果.

关键词:彩色夜视;图像融合;拮抗视觉特性;微光;红外
中图分类号:TN219 **文献标识码:**A

RESEARCH ON FUSION SCHEMES OF MULTI-BAND COLOR NIGHT VISION IMAGES BASED ON OPPONENT VISION PROPERTY

WNAG Ling-Xue, JIN Wei-Qi, SHI Jun-Sheng, WANG Sheng-Xiang, WANG Xia
(Dept. of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Equilibrium equation of on-center off-surround shunting network (CSSN) based on difference of Gaussians (DOG) that simulated concentric circle pattern opponent receptive field in retina was analyzed and utilized to enhance and fuse night vision images, which could improve contrast, pop out edge, compress dynamic range, reserve common information and enrich complementary information. Multi-band fusion architectures for color night vision images built on CSSN equilibrium equation were proposed, which included multi-spectrum low-level light visible (LLL), LLLV (long-wave infrared (LWIR)), LWIR/media-wave infrared (MWIR), and LLLV/LWIR/MWIR images. Color mapping rules in these architectures used cool and warm color to present cold and warm targets in infrared, and map LLLV image with plenty of details into green channel as green background. Emulating results show that all architectures obtain natural color appearance.

Key words: color night vision; image fusion; opponent vision property; low-level light visible; infrared

引言

传感器间的信息存在三种关系^[1]:①共有信息;②互补信息,只存在一个传感器,分为利于或干扰目标探测两种;③噪声图像融合算法应增强共有信息,显示有用互补信息,压缩不相关互补信息,去除噪声.

夜视图像的信息来自多光谱微光夜视、近红外成像、短波红外、中波与长波红外热成像.按照色彩

自然性,彩色夜视技术分为三类^[2]:①根据灰度进行伪彩色编码;②将多波段图像直接或基于一定规则简单组合后映射到彩色空间.如荷兰人力因素所(TNO)的Toet^[3]90年代提出的算法;伪彩色编码与彩色空间映射虽然增加了图像色彩,增强人眼观察的“兴奋度”,但其色彩与实际人眼视觉不一致,不利于长时间观看.因此,第③类方法追求色彩自然,视觉感舒适,如20世纪90年代中期麻省理工学院

收稿日期:2005-08-15,修回日期:2006-05-22

Received date: 2005-08-15, revised date: 2006-05-22

基金项目:“十五”国防重点预研(40405050103)和中国博士后科学基金(2004035272)资助项目

作者简介:王岭雪(1973-),女,彝族,云南石屏人,工学博士,主要研究光电成像及图像融合.

Waxman 提出的 MIT 法^[4], 增强对场景的认知力, 但算法较为复杂, 需要采用多处理器才能实现实时处理.

本文在仿真研究 MIT 法的基础上, 选用差分高斯函数(Difference Of Gaussians, DOG)作为人眼视网膜中心圆拮抗特性的数学模型, 研究基于 DOG 的 ON-中心 OFF-周边分离网络 (on-Center off-Surround Shunting Network, CSSN)^[5], 分析其平衡方程在图像增强与融合中的特点和参数的取值规律, 提出多波段彩色夜视融合结构.

1 基于 DOG 的 CSSN

1.1 人眼视网膜同心圆拮抗特性的数学模型—DOG

人眼视网膜中的神经细胞对光照的反应存在区域性, 当光照射区域中心时, 细胞反应增加, 此时如果再照射周边区域, 反应就会减小, 这说明区域的周边对中心存在抑制作用, 生物物理学将此作用称为拮抗 (Opponent), 中心与周边相互拮抗的结果是强调视觉中有变化的信息或提取边缘, 而此区域称为该细胞的感受野 (Receptive Field)^[6]. 感受野的空间分布呈同心圆模式, 1965 年 Rodieck 用 DOG 描述同心圆拮抗模式的感受野^[6]:

$$DOG = C_1 - C_2 = c_1 \cdot e^{-a_1^2(\rho^2+q^2)} - c_2 \cdot e^{-a_2^2(\rho^2+q^2)}, \quad (1)$$

C_1 和 C_2 是高斯核, p, q 是高斯核大小.

1.2 基于 DOG 的 CSSN

CSSN 是根据人眼的几种视觉能力提出的动态方程^[5], 首先是能提取边缘的拮抗特性, 二是即使人眼面对刺激强度范围很大的光照, 均能自动适应的压缩动态范围特性. 由于彩色夜视中也需要进行图像增强和动态范围压缩, 所以本文拓展 CSSN 为处理二维图像的动态方程, 其中的拮抗特性数学模型采用了同心圆模式的 DOG^[5]:

$$\frac{dE_{i,j}}{dt} = -AE_{i,j} + (B - E_{i,j})[C_1 * I^C]_{i,j} - (D + E_{i,j})[C_2 * I^S]_{i,j}, \quad (2)$$

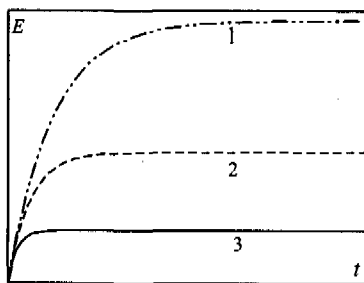


图 1 曲线 3 和 2 的 $I^C + I^S$ 分别是曲线 1 的 4 倍、2 倍
Fig. 1 $I^C + I^S$ of line 3 and 2 is fourfold, double of line 1

i, j 表示图像大小, $I^C = [I^C_{i,j}]$ 表示中心兴奋图像, $I^S = [I^S_{i,j}]$ 表示周边抑制图像, $E = [E_{i,j}]$ 表示处理后的结果图像. 常数 B 和 D 分别表示兴奋饱和值与抑制饱和值, 常数 A 是向零值衰减的速率. C_1 和 C_2 是式 (1) 中的高斯核. 假定所有参数都是非负的.

求解方程 (2), 假设初始时刻 $t = 0$ 时, $E_{i,j} = 0$, 得

$$E_{i,j} = \frac{B \cdot [C_1 * I^C]_{i,j} - D \cdot [C_2 * I^S]_{i,j}}{A + [C_1 * I^C]_{i,j} + [C_2 * I^S]_{i,j}} (1 - \exp(-(A + [C_1 * I^C]_{i,j} + [C_2 * I^S]_{i,j})t)) + E_{0,i,j} (1 - \exp(-(A + [C_1 * I^C]_{i,j} + [C_2 * I^S]_{i,j})t)), \quad (3)$$

总输入 $I^C + I^S$ 越大, 输出 E 达到稳态值 $E_{0,i,j}$ 的速度越快 (图 1). E 的大小取决于 $|B \cdot C_1 * I^C - D \cdot C_2 * I^S|$, 即如果中心兴奋输入 I^C 与周边抑制输入 I^S 间的反差大, 则 E 取得较大的值 (图 2). 在停止输入 (即 I^C 和 I^S 为 0) 时, 式 (2) 变为 $dE_{i,j}/dt = -AE_{i,j}$, 求解得 $E_{i,j} = e^{-At}$, 可以得出: 输入停止时, E 以速率 A 衰减, 直至为 0. 一般情况下, $A \ll I^C + I^S$, 所以只有兴奋输入 I^C 时, E 趋于 B , 只有抑制输入 I^S 时, E 趋于 $-D$, 故无论输入的强度如何, 式 (2) 均保证 E 值限制在 B 和 $-D$ 之间.

2 图像增强与融合

设 $B = D = 1$, 保证 E 值在 -1 至 1 之间, 图像增强与融合时不考虑动态过程, 所以只研究 CSSN 达到平衡时的方程, 即 $dE_{i,j}/dt = 0$, 求解得:

$$E_{i,j} = \frac{[C_1 * I^C]_{i,j} - [C_2 * I^S]_{i,j}}{A + [C_1 * I^C]_{i,j} + [C_2 * I^S]_{i,j}}, \quad (4)$$

2.1 图像增强

采用简单的带斜坡的阶跃函数作为输入信号 ($I^C = I^S = I$), 不同宽度和幅值 DOG 及其增强结果如图 3 所示.

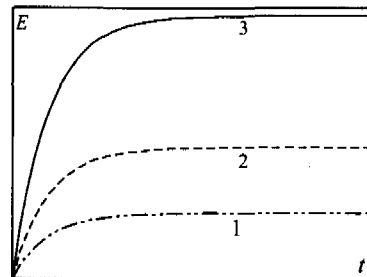


图 2 曲线 3 和 2 的 $|B \cdot C_1 * I^C - D \cdot C_2 * I^S|$ 分别是曲线 1 的 4 倍、2 倍
Fig. 2 $|B \cdot C_1 * I^C - D \cdot C_2 * I^S|$ of line 3 and line 2 is fourfold, double of line 1 respectively

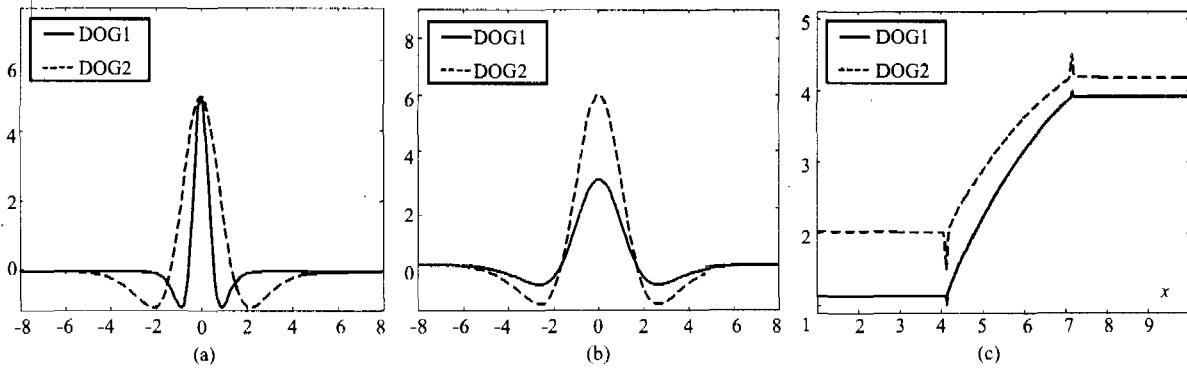


图3 不同宽度和幅度 DOG 的式(4)对带斜坡阶跃函数的增强结果 (a)不同宽度的 DOG (b)不同幅值的 DOG (c)带斜坡的阶跃函数经式(4)增强后的输出

Fig.3 Enhanced result of formula (4) based on different width and amplitude DOG for slope step function (a)DOG with different width (b)DOG with different amplitude (c)enhanced results of step functions with slope using formula(4)

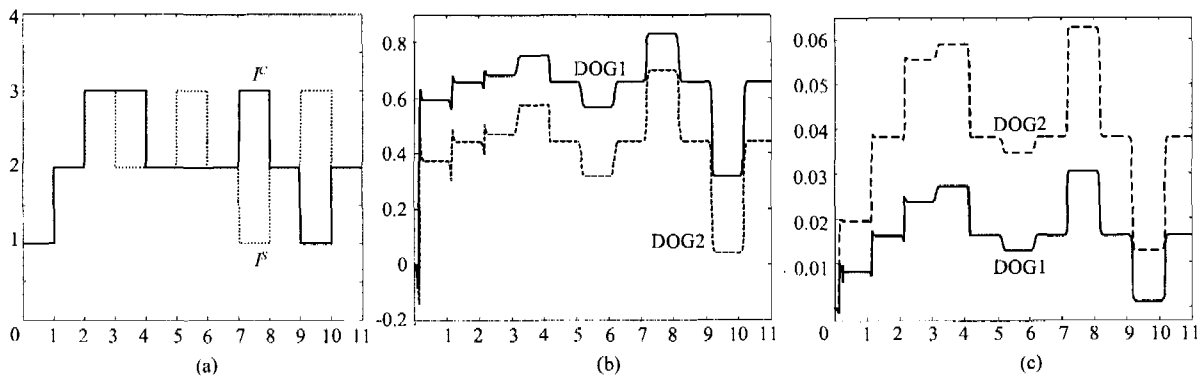


图4 输入 I^c 和 I^s 经式(4)融合的结果 (a)输入 I^c 和 I^s (b) A 小于 $\max[C_1 * I^c + C_2 * I^s]$ 一个数量级 (c) A 大于 $\max[C_1 * I^c + C_2 * I^s]$ 一个数量级

Fig.4 Fused results based on formula (4) for input I^c and I^s (a)inputs I^c and I^s (b) A is one magnitude smaller than $\max[C_1 * I^c + C_2 * I^s]$ (c) A is one magnitude larger than $\max[C_1 * I^c + C_2 * I^s]$

从图3(c)中看出,在带斜坡阶跃函数的转折处,数值的变化被放大了,而且被放大的变化趋势与周围的数值有关.横坐标 $x = 4$ 的输入值受到 $x < 4$ 和 $x > 4$ 区域的抑制,由于 $x > 4$ 的输入值大一些,所以它对 $x = 4$ 处的抑制也更大,因此使得 $x = 4$ 的输出值减小,形成低谷.而在 $x = 7$ 处, $x < 7$ 区域的输入值小,对 $x = 7$ 处的抑制小,因此 $x = 7$ 处的输出值增大,形成尖峰.这意味着,在一幅图像中,灰度值与邻近区域有差异的地方(如边缘),差异将得到增强,增强的程度除了与灰度值和差异的大小有关之外,适当增大 DOG 系数 a_1 和 a_2 (宽度)、 c_1 和 c_2 (幅值),均能提高增强反差、突出边缘的能力.但为保证图像不出现平滑, a_1 和 a_2 的取值应使得二维 DOG 数组的大小不超过 5×5 ,一般采用 3×3 或 5×5 .另外, A 的取值应与 $\max[(C_1 + C_2) * I]$ 处于同一个数量级.

输入来自同一幅图像时,式(4)有增强反差和突出边缘的作用.

2.2 图像融合

输入 I^c 和 I^s 如图4(a)所示,部分输入值相同,其余部分的差值 $I^c - I^s$ 有大有小,且有正负之分.

采用图3(a)和3(b)的 DOG 后融合结果见图4(b)和4(c),可以看出, $0 < x < 3$ 期间, I^c 与 I^s 相同, $I^c - I^s$ 为零,但通过式(4)后输出中保留了输入信号的共有信息,且数值有变动的地方出现边缘增强; I^c 与 I^s 不相同 ($3 < x < 10$), DOG2 对融合结果的增强程度更大, a_1 和 c_1 大意味着 I^c 被增强的程度更大,融合结果中叠加进更多 I^c 的极值信息,最大值为1; a_2 和 c_2 大则更多 I^s 的极值信息叠加进融合结果.

常数 A 在融合中的作用: A 小于 $\max[C_1 * I^c + C_2 * I^s]$ 一个数量级时,融合结果的动态范围和对比

度被大幅度压缩,且正极与负极信息的输出不均衡,如图4(b); A 的取值应大于 $\max[C_1 * I^c + C_2 * I^s]$ 一个数量级,这时对比度和不均衡现象均得到改善,如图4(c).但是如果 A 过大,则起不到压缩动态范围的作用.

输入来自不同图像时,式(4)能压缩动态范围,保留并增强两图像的共有信息,并提高图像间的对比度.

3 多波段彩色夜视融合结构及实例

应用式(4)提出了针对多波段夜视图像的彩色夜视融合结构,见图5~图8,图中的同心圆代表式(4),中心和外圈圆分别表示兴奋、抑制图像.融合结构包含增强、融合和彩色映射3个步骤,图像首先送入同心圆后得到增强,然后,2幅已增强的图像分别送入中心或周边作为兴奋或抑制图像,通过式(4)进行融合,最后按照彩色映射规则送入红(R)、绿(G)、蓝(B)通道成为彩色融合图像.图8中的负极MWIR通过交换式(4)中的 C_1 和 C_2 获得.融合实例见图10.

微光与LWIR融合时(图5),增强后的微光作为 I^c ,LWIR作为 I^s ,融合为“微光-LWIR”图像,送入B通道后,蓝色的强度主要由-LWIR(负极LWIR)决定,负极LWIR中灰度级越高的部分(即正极LWIR中灰度级低的冷目标)呈现越强的蓝色;接着,微光再作为 I^c ,”微光-LWIR”作为 I^s ,融合为“微光+LWIR”图像,LWIR中的热目标随灰度级的大小呈现不同强度的红色.这样,就用冷的蓝色和暖的红色分别突出了LWIR中的冷热目标.细节丰富的微光图

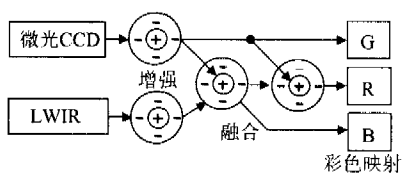


图5 微光与LWIR的融合结构
Fig.5 Fusion architecture of low-level light (LLL) CCD and LWIR

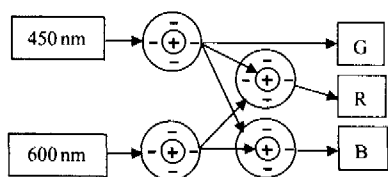


图6 双波段微光的融合结构
Fig.6 Fusion architecture of dual-band LLL CCD

像则作为绿色背景.

双波段微光间具有很强的相关性(图6),所以使用截止型450nm和600nm滤光片去除部分相关性,式(4)也可以很好地对二者去相关处理.

LWIR与MWIR融合时(图7),MWIR的高温目标显示红色,LWIR的室温目标显示蓝色.微光与MWIR、LWIR的三波段融合结构中(图8),用红色突出MWIR中的热目标,蓝色突出LWIR中的冷目标.

目前,我们已使用3片TM1300多媒体DSP实现了微光CCD/LWIR、双波段微光的准实时彩色融合,实物图见图9.

4 结论

本文研究分析了基于DOG的CSSN平衡方程,发现它能增强反差、突出边缘和压缩动态范围,并能有效地保留2幅图像的共有信息,增强互补信息,从而提高图像间的对比度,同时完成图像信息的融合.还分析总结了增强和融合时CSSN平衡方程的参数—DOG系数和常数 A 的取值范围,以及这些参数在增强和融合中的作用.

本文提出了基于CSSN平衡方程的多种简单和实用的多波段彩色夜视融合结构,均取得自然的彩色效果,提升了图像的深度感知,利于观察者对目标的探测和对场景的理解和认知,从而对所处的形势做出正确的判断^[7].

REFERENCES

[1] Mishú Pavel, Ravi K. Sharma. Model-based sensor fusion for aviation[J]. SPIE, 1997, 3088: 169—176.
[2] WANG Ling-Xue. Color fusion of multi-band night vision

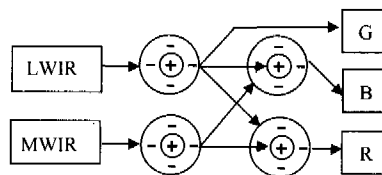


图7 LWIR与MWIR的融合结构
Fig.7 Fusion architecture of LWIR and MWIR

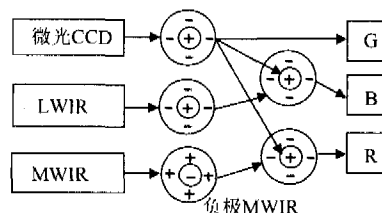


图8 微光,LWIR与MWIR的融合结构
Fig.8 Fusion architecture of LLL CCD, MWIR and LWIR

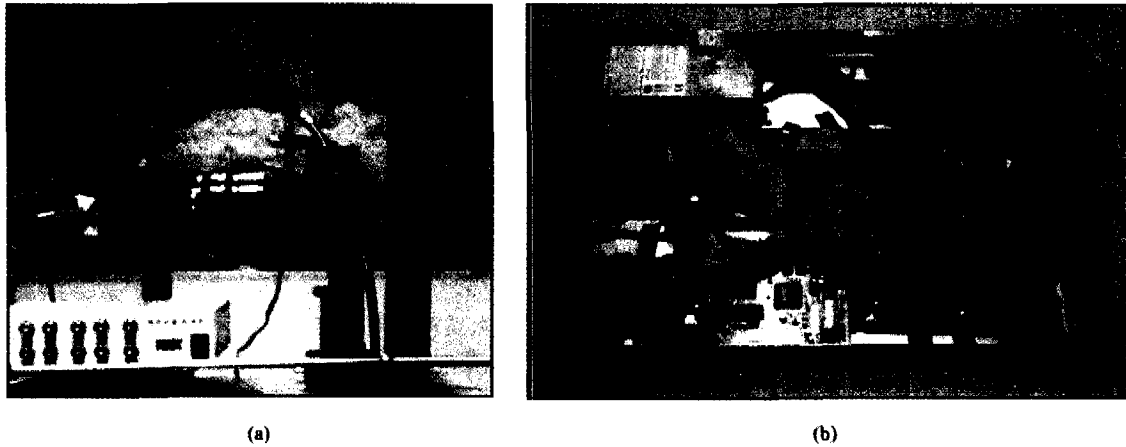


图9 实时双波段彩色夜视系统(a)双波段微光配准平台(b)双路视频实时融合硬件平台

Fig.9 Real-time dual-band color night vision system(a) registration platform for dual-band CCDs (b) real-time fusion hardware system for dual-band video images

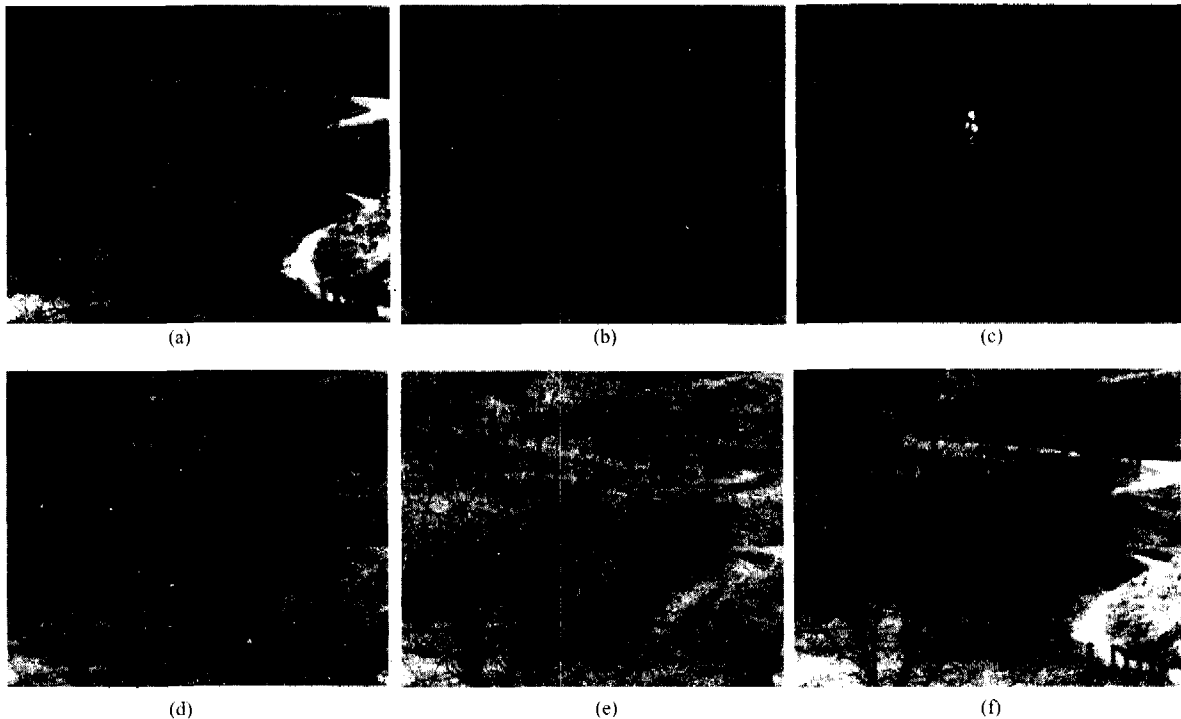


图10 多波段彩色夜视图像举例(a)微光图像(b)近红外图像(c)中波红外图像(d)微光与近红外融合结果(e)微光与中波红外融合结果(f)微光与近红外、中波红外三波段融合结果

Fig.10 Examples of multi-band color night vision images (a) low-level light visible(LLL.V) (b) near infrared(NIR) (c) mid-wave infrared(MWIR) (d) fusion results of LLL.V and NIR (e) fusion results of LLL.V and MWIR (f) fusion results of LLL.V, NIR and MWIR

- images based on biology vision model[D]. Dissertation of Beijing Institute of Technology(王岭雪. 基于生物视觉特性的夜视图像彩色融合技术研究. 北京理工大学博士论文), 2002.
- [3] Toet, van Ruyven A J, Valetton J M. *Merging thermal and visual images by a contrast pyramid*[J]. *Opt. Eng.*, 1989, 28(7): 789—792.
- [4] Waxman A, Fay D, Gove A N, et al. Color night vision: opponent processing in the fusion of visible and IR imagery [J]. *Neural Net*, 1997, 1: 1—6.
- [5] Carpenter G, Grossberg S. *Neural Network for Vision and*

Image Processing[M]: MIT Press, 1992.

- [6] SHOU Tian-De. *Brain Mechanism in Visual Information Processing*[M]. Shanghai: Scientific and Technological Education Press (寿天德. 视觉信息处理的脑机制. 上海: 上海科技教育出版社), 1997.
- [7] SHI Jun-Sheng, JIN Wei-Qi, WANG Ling-Xue. Study on perceptual evaluation of fused image quality for color night vision[J]. *J. Infrared Milim. Waves*(石俊生, 金伟其, 王岭雪. 视觉评价夜视彩色融合图像质量的实验研究. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(3): 236—240.