

文章编号:1004-4213(2010)03-0553-6

基于多分辨率色彩传递的彩色夜视方法研究*

史世明,王岭雪[†],金伟其,赵源萌

(北京理工大学 光电学院,北京 100081)

摘要:为了获得符合人眼感知的彩色夜视图像,帮助观察者获取丰富的场景信息和舒适的观察效果,提出了一种基于多分辨率色彩传递的彩色夜视处理方法.结合微光与红外图像特点,对二者进行 YUV 空间拮抗视觉特性的彩色融合之后,采用控向金字塔对彩色融合图像(源图像)和参考图像各颜色通道进行多分辨率分解,计算子带图像的均值和标准方差,通过参考图像与源图像在各子带的方差比调整源图像的子带系数值,再经金字塔重构,最终使微光与红外彩色夜视图像获得类似参考图像的自然感色彩.分析了 $l\alpha\beta$ 、YUV 和 RGB 颜色空间对色彩传递的影响,并确定 YUV 颜色空间更适于多分辨率分解的色彩传递.相比传统的线性色彩传递方法,本方法不仅使彩色夜视图像拥有更符合真实场景的色彩,还可以提高其细节信息,改善场景感知,提升融合图像目标探测能力.

关键词:图像融合;色彩传递;彩色夜视;控向金字塔;微光;红外

中图分类号:TP751 **文献标识码:**A

doi:10.3788/gzxb20103903.0553

0 引言

彩色夜视技术是指将两个(或多个)波段的夜视成像传感器同时采集的同一场景的多幅图像通过光学和图像处理手段融合为一幅即能反应各波段场景信息,又适于人眼观察的彩色图像,以改善夜视图像的观察效果,提高夜视系统的性能,增强形势感知能力.微光和红外热成像是主要的两种夜视成像模式,二者成像机理不同,能够提供场景的互补信息,因此,被广泛应用于导航、安全侦察、搜救或军事对抗中.

目前的彩色夜视方法着重于彩色的真实性和自然感,使其尽可能与人眼感知的白天自然场景一致.20 世纪 90 年代中期,Waxman 等^[1]提出了基于生物视觉特性的多波段彩色夜视方法,各波段图像经过拮抗特性的中心-周边分离神经网络(Center-Surround Shunting Network, CSSN)进行增强,并映射到 RGB 颜色空间.该方法充分考虑了生物视觉特点,大大改善了融合图像的色彩.2003 年,Toet 等^[2]将校正自然光彩色图像的色彩传递^[3]应用到多波段夜视图像融合中,将可见光参考图像的色彩信息传递到融合后的夜视图像中,使夜视图像看起来

与白天时一样清晰和丰富多彩.但融合效果很大程度上取决于彩色参考图像的选取.Zheng 等^[4]提出了一种应用于彩色夜视的局域彩色处理方法,将彩色空间映射的图像按色彩分割成若干区域,通过区域匹配将参考图像的色彩赋予映射图像,从而得到彩色化的夜视图像.该方法的处理效果受到彩色图像库、图像分割和匹配方法的制约.

国内图像融合的研究多集中于灰度级多分辨率图像融合,如多分辨率分解下融合规则的研究^[5]和多分辨率分解方法在图像融合中的研究^[6].本课题组研究了基于生物视觉特性和色彩传递的多波段彩色夜视方法,并开发了基于色彩传递的彩色夜视实时处理系统^[7-8].

本文以获得符合人眼视觉感知的彩色夜视图像为目的,研究 YUV 空间基于拮抗视觉特性的微光/红外彩色融合结构;为进一步改善彩色融合图像的色彩自然性,增强细节,突出红外热目标,利用控向金字塔多尺度、多方向的特点,研究一种基于多分辨率分解(Multi-Resolution Decomposition, MRD)的色彩传递方法.

1 基于拮抗视觉特性的彩色融合方法

彩色融合不同于灰度图像的伪彩色编码,它集成了多波段的光谱信息,对目标和场景的描述更为全面.但是,不恰当的彩色融合方法会严重影响观察效果,甚至比单波段图像还差.例如,色彩对比强烈的彩色融合图像易于造成视觉疲劳,降低场景意识.线性加权算法和颜色空间的直接映射,可以方

* 高校博士点专项科研基金新教师项目(20070007022)、国家高技术研究发展计划现代交通领域专题课题(2009AA11Z204)和北京理工大学基础研究基金(20070142007)资助

[†] Tel:010-68912569

Email:neobull@bit.edu.cn

收稿日期:2009-04-03

修回日期:2009-07-12

便地获得彩色融合图像,但色彩表现较差.基于拮抗视觉特性的融合方法是在研究 MIT 法^[1]的基础上,选用差分高斯函数(Difference Of Gaussians,DOG)作为人眼视网膜感受野同心圆拮抗特性的数学模型,并将其应用于 CSSN.感受野对入射到其中心和周边区域的光信号产生兴奋或抑制响应,从而能够增强灰度变化剧烈的边缘,图像融合时能增强波段间的互补信息,最终将经过不同系数和规则融合后的图像映射到颜色空间,可获得近自然感的彩色融合图像.图 1 为两种兴奋和抑制响应区域不同的感

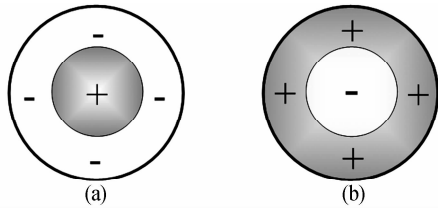


图 1 两种同心圆感受野
Fig.1 Two kinds of concentric-circle receptive fields

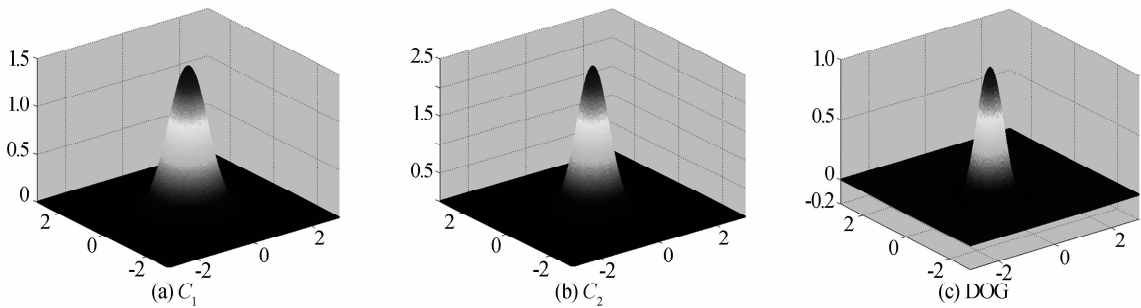


图 2 高斯核和差分高斯函数
Fig.2 Gaussian kernels and DOG function

本文提出了 YUV 空间基于拮抗视觉特性的微光与红外图像融合结构(图 3).融合结构包括波段内和波段间拮抗处理.首先,利用波段内的中心-周边分离网络得到增强的微光图像 Vis^\uparrow 、正极红外图像 IR^\uparrow 和负极红外图像 $-IR^\uparrow$,然后将 Vis^\uparrow 作为兴奋输入图像, IR^\uparrow 和 $-IR^\uparrow$ 作为周边抑制图像进行波段间的处理.根据人眼对色彩的感知特性和 YUV 空间的特点,将 $+Vis^\uparrow + IR^\uparrow$ 送入亮度通道,将 $+Vis^\uparrow - IR^\uparrow$ 送入 U 通道,将 $+IR^\uparrow - Vis^\uparrow$ 送入 V 通道,并转换到 RGB 空间,从而完成了微光与红外图像的初步彩色融合.YUV 颜色空间中,Y 表示亮度信号,U、V 是色差信号($B-Y$ 、 $R-Y$),这里微光图像与红外图像的加权和 $+Vis^\uparrow + IR^\uparrow$ 作为亮度图像 Y, $+Vis^\uparrow - IR^\uparrow$ 和 $+IR^\uparrow - Vis^\uparrow$ 分别为蓝色和红色色差分量,因此,处理结果可使黑热/白热红外图像分别反映在蓝色/红色色差通道,得到较符合人眼的视觉特性的彩色图像.

受野,其中图 (a) 为中心兴奋-周边抑制感受野,图 (b) 为中心抑制-周边兴奋感受野.

CSSN 的平衡方程为

$$F(i, j) = \frac{C_1 * I^C(i, j) - C_2 * I^S(i, j)}{A + [C_1 * I^C(i, j) + C_2 * I^S(i, j)]} \quad (1)$$

式中, $F(i, j)$ 是融合图像, $I^C(i, j)$ 是兴奋输入图像, $I^S(i, j)$ 是抑制输入图像, C_1 和 C_2 为二维高斯核,定义见式(2)和(3). A 为常量.

$$C_1 = c_1 \cdot \exp[-a_1^{-2}(p^2 + q^2)] \quad (2)$$

$$C_2 = c_2 \cdot \exp[-a_2^{-2}(p^2 + q^2)] \quad (3)$$

式中, a_1, a_2, c_1, c_2 为常量,用于建立差分高斯函数,差分高斯函数为

$$DOG = C_1 - C_2 \quad (4)$$

图 2 是 7×7 的高斯核 C_1 和 C_2 以及差分高斯函数 DOG 的图形, $a_1 = 0.6, a_2 = 0.75, c_1 = 2.5, c_2 = 1.5$,由此构成本文所使用的中心兴奋周边抑制 CSSN.

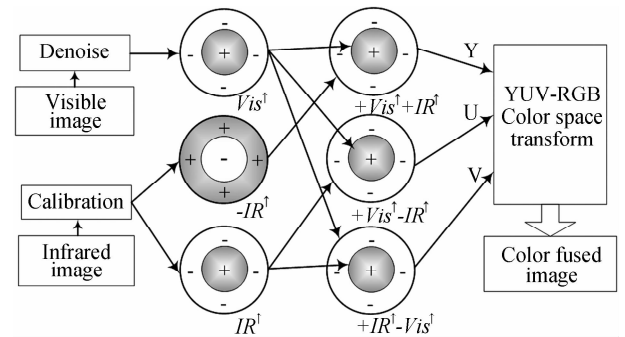


图 3 基于 CSSN 的彩色融合结构
Fig.3 Color fusion scheme based on CSSN

图 4 为一组微光与红外图像的融合结果:图 (a) 为微光图像,图 (b) 为中波红外图像,图 (c) 为 RGB 空间映射图像(微光映射到 G 通道,红外图像映射到 R 通道),图 (d) 为基于 CSSN 的融合图像.可以看出,图 (d) 更适于人眼观察,颜色更舒适,更便于观察者理解.

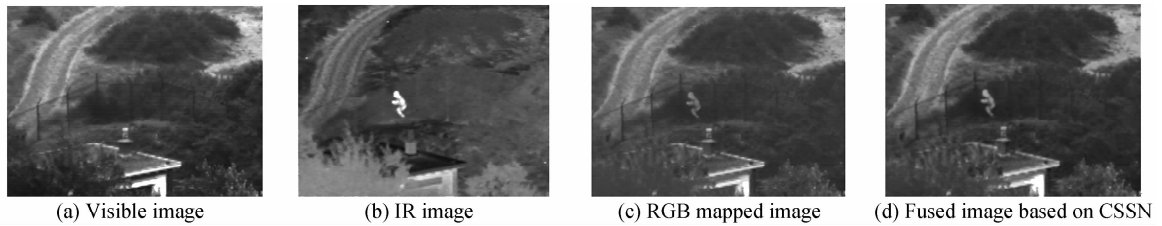


图 4 彩色图像融合结果
Fig. 4 Color image fusion results

2 基于多分辨率分解的色彩传递方法

Reinhard 等人利用 $l\alpha\beta$ 颜色空间通道相关性小的特点,提出了基于此空间的色彩传递方法,以校正彩色照片的偏色^[3]. Toet^[2]等借鉴了该算法并应用于多波段彩色夜视,取得了非常好的效果.我们根据实时视频处理的需要,提出了适于彩色夜视的 YUV 空间色彩传递方法.然而,传统的 $l\alpha\beta$ 和 YUV

空间色彩传递算法属于全局线性处理,一定程度上影响了传递效果,还可能造成图像细节信息的丢失.由于图像中包含大量的局部性、方向性、带通性结构^[9],因此,本文考虑以多分辨率分解为基础,在各多分辨率尺度下完成各通道一阶和二阶统计值的传递,从而实现基于多分辨率分解的色彩传递,算法架构如图 5.另外,还将对比 $l\alpha\beta$ 、YUV 和 RGB 颜色空间下色彩传递的效果.

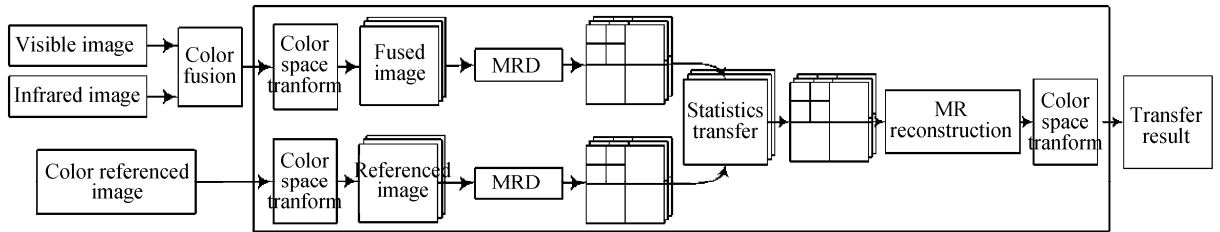


图 5 基于多分辨率色彩传递的彩色夜视架构
Fig. 5 Color night vision architecture based on MRD color transfer

2.1 控向金字塔的分解与重构

Simoncelli 和 Freeman 等^[9]提出控向金字塔 (Steerable pyramid) 分解结构,把图像分解成不同尺度、不同方向的子带,相比拉普拉斯、梯度等金字塔结构,其可进行多方向的分解,提取图像的方向信息,更符合人眼辨别事物的特点,且具有平移不变性和旋转不变性、过完备和防混叠的特性.因此,本文以控向金字塔作为多分辨率分解的工具.通常,控向金字塔分解在频域进行,如图 6. 图像 $f(x, y)$ 通过傅里叶变换到频率域 $F(u, v)$,先经过高通滤波器 FH_0 和低通滤波器 FL_0 分成高通子带 H_0 和低通子带 L_0 . L_0 再分解为方向 k 的带通子带 B_k (使用方向带通滤波器 FB_k) 和 1 个经 $1/2$ 欠采样后频率更低的低通子带 L_1 (使用窄带低通滤波器 FL_1).一般

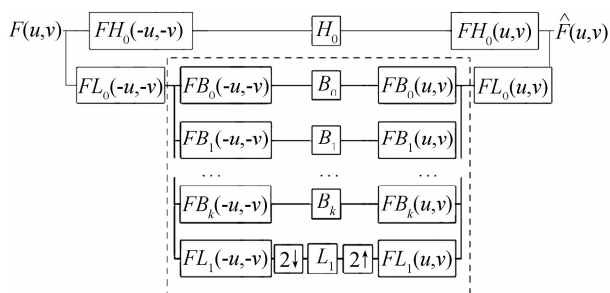


图 6 控向金字塔分解结构图
Fig. 6 Steerable pyramid decomposition structure

地, $K=1$ 时代表水平 (0°) 和垂直 (90°) 两个方向, $K=3$ 时代表 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 四个方向. 第一级低通子带 L_1 可继续分解,获得多尺度多方向的金字塔结构. 重构过程与分解过程相反.

本文中,首先将微光与红外图像分别通过控向金字塔分解到各子带空间,参量: $B_{j,k}$ 表示图像第 j 层,第 k 个方向的带通子带图像,其中 $j(=1, 2, \dots, J)$ 表示分解尺度, $k(=0, 1, \dots, K)$ 表示分解方向; H 表示微光和红外图像高通子带图像; L_j 表示对应的分解第 J 层(即最高层)的低通子带图像.

2.2 色彩传递

在全局线性色彩传递中,通常使用 $l\alpha\beta$ 或 YUV 颜色空间. $l\alpha\beta$ 颜色空间是 Runderman 等人^[10]提出的感知去相关的颜色空间,可以最大限度按照人眼感知特性分离亮度和色彩. YUV 空间是国际电信联盟 ITU 推荐的颜色空间,常用于视频信号处理传输,其中 Y 为亮度信号, U、V 分别为蓝色和红色色差信号. 虽然 YUV 空间没有 $l\alpha\beta$ 空间的感知去相关特性,但同样是将亮度与色彩分离,易于实现色彩的传递. 采用 YUV 空间还可避免 $l\alpha\beta$ 空间中反复的颜色空间转换以及对数、指数运算,减少计算量,便于实现微光/红外视频的实时色彩传递.

首先将经图 3 融合结构处理后的彩色融合图像

(源图像)与参考图像转换到期望的颜色空间(如 $l\alpha\beta$ 、YUV 或 RGB 颜色空间),再通过控向金字塔将各通道图像分解到相同尺度的子带,将源图像与参考图像在对应通道和子带内进行一阶(均值)和二阶统计值(标准方差)的传递,其表达式为

$$\begin{cases} B'_{X,j,k} = \frac{\sigma_{B_{X,r,j,k}}}{\sigma_{B_{X,s,j,k}}} (B_{X,s,j,k} - \mu_{B_{X,s,j,k}}) + \mu_{B_{X,r,j,k}} \\ L'_{X,J} = \frac{\sigma_{L_{X,r,J}}}{\sigma_{L_{X,s,J}}} (L_{X,s,J} - \mu_{L_{X,s,J}}) + \mu_{L_{X,r,J}} \\ H'_X = \frac{\sigma_{H_{X,r}}}{\sigma_{H_{X,s}}} (H_{X,s} - \mu_{H_{X,s}}) + \mu_{H_{X,r}} \end{cases} \quad (5)$$

式中,参考图像的参量用下标 r 表示,源图像的参量用下标 s 表示, X 表示颜色空间, $X \in \{\{l, \alpha, \beta\}, \{Y, U, V\}, \{R, G, B\}\}$, μ 和 σ 分别为子带图像的均

值和标准方差.

式(5)处理后各子带(B', L', H')的均值和方差均与参考图像的相同,进行控向金字塔重构并转换到 RGB 颜色空间,就获得了一幅色彩与参考图像类似的传递图像.

3 色彩传递结果分析

本文采用 4 层 4 方向的控向金字塔,即 $J=4$, $K=3$,在 RGB、 $l\alpha\beta$ 、YUV 三个空间中比较线性色彩传递(Linear color transfer)^[3]与基于多分辨率分解色彩传递(MRD color transfer)的效果,源图像均为基于拮抗视觉特性的彩色融合图像(图 4),选取的参考图像为图 7(a),传递结果如图 7(b)~(f).

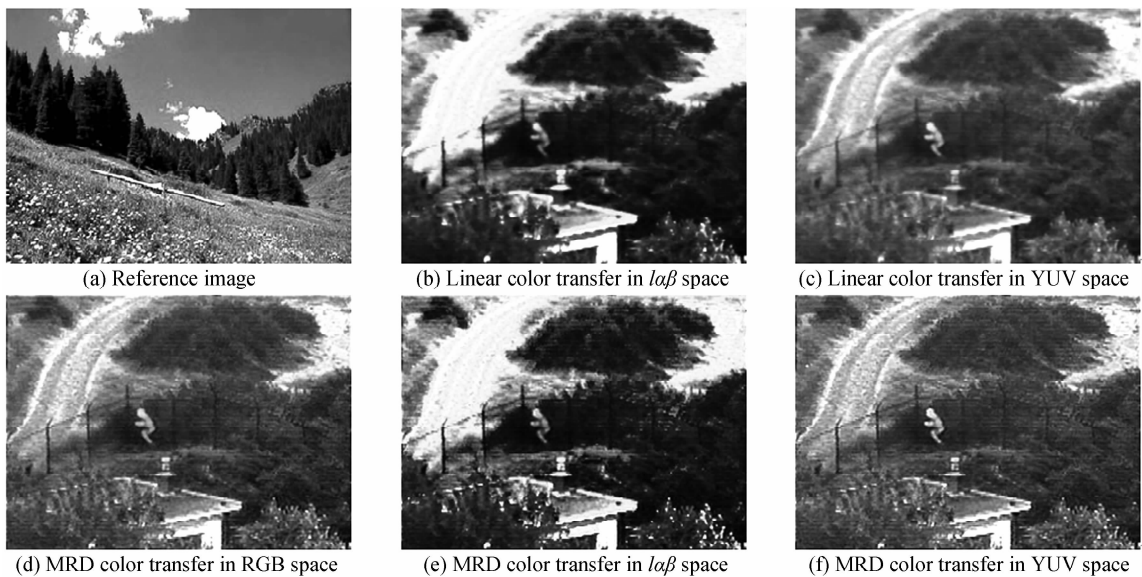


图 7 色彩传递处理结果

Fig. 7 Color transfer results

可以看出,MRD 色彩传递的结果(图 7(d)~(f))比线性色彩传递(图 7(b)、(c))的细节信息更丰富,边缘突出,热目标也更清晰.不同的彩色空间会影响色彩传递效果:1)YUV 和 RGB 空间 MRD 色彩传递结果的色彩自然,场景色调以绿色和蓝色为主,人眼观察更舒适,热目标呈现亮丽的橙色,可以让观察才更快速发现目标;2) $l\alpha\beta$ 空间线性和 MRD 色彩传递都出现了饱和,色彩效果逊色于 YUV 和 RGB 空间.我们分析认为,这主要是由夜视图像和 $l\alpha\beta$ 空间的性质造成的.一般地,微光/红外图像灰度值不高,像素间的灰度变化也不大,即均值低、标准方差小;而自然场景的参考图像色彩丰富,亮度高,所以各通道内的灰度值大,灰度变化也快,即均值高、标准方差大.从 RGB 向 $l\alpha\beta$ 空间转换时,需要经过对数变换,对于夜视图像,对数变换较大程度地提高其灰度值,从而提高了均值,但对数变换属于点运

算,没有改变像素间的灰度差异,所以对数变换前后夜视图像的标准方差变化不大;对于参考图像,对数变换会压缩高灰度值,降低均值,甚至与夜视图像的接近.因此,削弱了式(5)传递颜色的性能,如参考图像图 7(a)的绿色没有传递到图 7(b)和(c)中.另一方面,对数变换后参考图像与夜视图像的标准方差变化不大,因此保持较高的方差比(σ_r/σ_s),式(5)在夜视图像灰度值被对数变换大幅提高的基础上进一步增强其灰度值,最终使传递结果的部分区域出现饱和,如 7(b)和(c)中的路面.因此认为,对于夜视图像, $l\alpha\beta$ 空间的处理力度较 YUV 空间的大,容易造成传递结果饱和或色彩传递性能下降,而 YUV 与 RGB 空间互相转换时只是线性变换,而且亮度和色差分别处理,符合人眼视觉的理解,所以更适用于夜视图像的色彩传递.

RGB 空间的 MRD 色彩传递(图 7(d))也获得

较好的效果,不过由于 RGB 空间 3 个颜色通道间的相关性高,没有分别处理亮度和色差,会因某个颜色通道值被过度增强而导致传递图像的色彩发生整体性变化。

表 1 统计了图 7 中各色彩传递处理结果在

表 1 传递结果的平均梯度和标准方差

Table 1 Average gradients and standard deviations of the transferred results

Color transfer methods	AG_R	σ_R	AG_G	σ_G	AG_B	σ_B
Linear ($l\alpha\beta$)	8.99	40.96	11.63	82.93	12.51	105.32
Linear (YUV)	8.45	52.06	9.01	51.93	11.37	94.88
MRD (RGB)	14.44	53.20	15.24	54.73	15.00	81.14
MRD ($l\alpha\beta$)	15.44	38.68	17.94	80.80	18.33	100.88
MRD (YUV)	16.07	50.51	17.30	50.51	16.44	93.01

由表 1 可见,MRD 色彩传递处理结果的平均梯度比线性传递结果的大,说明细节信息更丰富;RGB 空间传递结果中 R 通道的方差较大,红外图像中灰度值较高的区域在传递结果中呈红色.这是因为彩色融合阶段红外图像在红色通道的成分较高,另一方面,红外图像的细节信息少,方差也就较小,所以红色通道中参考图像与源图像的方差比(σ_r/σ_s)增大,经式(5)处理后,红外图像中灰度值高的区域(包含热目标)会用红色突显出来。

4 结论

本文提出了 YUV 空间基于拮抗视觉特性的彩色融合结构,提出了利用多分辨率分解将参考图像的色彩传递给微光/红外的彩色融合图像.微光与红外图像经过 CSSN 彩色融合后,选取适当的自然场景彩色图像作为参考图像,使用控向金字塔对彩色融合图像和参考图像进行多分辨率分解,并在各子带图像内进行色彩传递,最终得到类似参考图像的自然感彩色夜视图像.通过主观感知和客观参量的分析,本文提出的 MRD 色彩传递不仅可以获得色彩丰富的场景信息,还能突出观察目标和边缘细节,既符合人眼的色彩感知,人眼观察舒适,还能提高辨识目标的速度和对场景的记忆能力。

参考文献

[1] WAXMAN A M, AGUILAR M, FAY D A, *et al.* Solid-state color night vision: fusion of low-light visible and thermal

infrared imagery[J]. *Lincoln Lab Journal*, 1998, **11**(1):41-60.

[2] TOET A. Natural colour mapping for multiband nightvision imagery[J]. *Information Fusion*, 2003, **4**(3):155-166.

[3] REINHARD E, ASHIKHMIN M, GOOCH B, *et al.* Color transfer between images[J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2001, **21**(5):34-41.

[4] ZHENG Y, ESSOCK E A. A local-coloring method for night-vision colorization utilizing image analysis and fusion[J]. *Information Fusion*, 2008, **9**(2):186-199.

[5] TAO Guan-qun, LI Da-peng, LU Guang-hua. On image fusion based on different fusion rules of wavelet transform[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2):221-224.

[6] ZHANG Qiang, GUO Bao-long. Fusion of multifocus images based on the nonsubsampling contourlet transform[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4):838-843.

[7] WANG Ling-xue, JIN Wei-qi, SHI Jun-sheng, *et al.* Research on fusion schemes of multi-band color night vision images based on opponent vision property[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2006, **25**(6):455-459.

王岭雪,金伟其,石俊生,等.基于拮抗视觉特性的多波段彩色夜视融合方法研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2006, **25**(6):455-459.

[8] SHI Shi-ming, WANG Ling-xue, JIN Wei-qi, *et al.* A dual-band color imaging system for visible and thermal IR based on color transfer in YUV color space[J]. *Acta Armamentarii*, 2009, **30**(1):30-35.

史世明,王岭雪,金伟其,等.基于 YUV 空间色彩传递的双通道视频实时融合系统[J]. *兵工学报*, 2009, **30**(1):30-35.

[9] SIMONCELLI E P, FREEMAN W T, ADELSON E H, *et al.* Shiftable multiscale transforms [J]. *IEEE Trans on Information Theory*, 1992, **38**(2):587-607.

[10] RUDERMAN D L, CRONIN T W, CHUAN-CHIN C. Statistics of cone responses to natural images: implications for visual coding[J]. *JOSA A*, 1998, **15**(8):2036-2045.

Color Night Vision Research Based on Multi-resolution Color Transfer

SHI Shi-ming, WANG Ling-xue, JIN Wei-qi, ZHAO Yuan-meng

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to acquire color night vision images accordant with human perception, and help observers to get more abundant scene information, a kind of color night vision method based on color transfer in multi-decomposition structure is proposed. Concerning their characteristics, low-level light visible and IR images are combined into a color fused image (source image) based on opponent vision property in YUV color space. Then the steerable pyramid is used to decompose the fused image and a colorful day-time reference image into multi-scale sub-band images. The mean and standard deviation of each sub-band image are calculated. Each sub-band coefficient of source image is modified according to the deviation ratio of the reference image to the source image in respective color channels. Finally, reconstruct the transferred image and obtain a low-level light visible/IR color night vision image with comfortable color appearance similar to the reference image. The transferred results in $l\alpha\beta$, YUV and RGB space are analyzed. YUV space is recommended to be the best color space for multi-decomposition color transfer. Comparing with traditional linear color transfer, the proposed method can make a color night vision image more realistic and natural, enhance the details, improve the situation perception and target detection ability.

Key words: Image fusion; Color transfer; Color night vision; Steerable pyramid; Low-level light visible; IR



SHI Shi-ming was born in 1981. He is currently a Ph. D. degree candidate, and his research interests focus on color night vision, image and video fusion, real-time video processing.



JIN Wei-qi received his Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 1990. He is currently a professor and Doctoral Supervisor, and his research interests focus on low-level light and infrared imaging, optoelectronic detection, and image processing.