

文章编号: 0253-2239(2007)12-2101-9

近自然彩色图像融合算法及其实时处理系统的发展*

倪国强 肖蔓君 秦庆旺 黄光华

(北京理工大学信息科学技术学院光电工程系, 北京 100081)

摘要: 在军事和生产领域,特别是在极其恶劣的可视条件下,图像融合技术越来越强调融合效果显示的“近自然”感觉,以及人类视觉感知的要求。从彩色图像融合算法的发展概况出发,着重介绍了两种具有代表性的基于视觉特性的近自然彩色图像融合方法,并特别阐述了课题组近期开展的相关算法研究成果。总结了国内外实时彩色图像融合系统的发展现状,概括了课题组已具备的硬件实验基础,综合分析了实时彩色图像融合技术的若干关键技术,如多源图像特征分析、实时图像配准、融合图像后处理等。针对实时图像融合技术的应用状况,提出图像融合系统未来的发展趋势。

关键词: 图像处理; 图像融合; 近自然彩色; 视觉特性; 图像配准; 实时处理系统

中图分类号: TP391; TN911.37 文献标识码: A

Development of Near Natural Color Image Fusion Algorithms and Real-Time Image Fusion System

Ni Guoqiang Xiao Manjun Qin Qingwang Huang Guanghua

(Department of Optical Engineering, School of Information Science and Technology,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract: Along with the need in military and industry, especially in certain tough and dynamic environment, image fusion need emphases to display in near natural color results and consider the requirements of human visual perception. The development of color image fusion algorithms are introduced and two representative near natural color image fusion methods based on visual characters are described, and our researches on this field are summarized in detail. The progress on real-time color image fusion system and our hardware researches are specified. Several main technologies are discussed particularly, such as multi-source image characteristics analysis, real-time image registration, post processing of fused image and so on. With current application situation of image fusion, the prospect of image fusion technique and system are forecasted.

Key words: image processing; image fusion; near natural color; visual characteristics; image registration; real-time processing system

1 引 言

图像融合技术最早于 20 世纪 70 年代后期提出,旨在将多源信道(或不同时相)所采集的关于同一目标与背景的图像经过一定的处理,提取各自信道的信息,最后在系统输出端输出统一的图像或综合图像特征,以供进一步观测或进行决策和估计任务。这种充分利用多源数据的互补性和计算机智能化、高速运算能力的信息综合处理技术,首先应用于军事领域,涉及到侦察、观瞄、精确制导、目标探测、识

别和跟踪的各个方面,在民用领域也遍及地球资源遥感与监测、天气预报、交通指挥和医学影像处理等。

图像融合系统具有突出的探测优越性,能克服各单一传感器在时间、光谱和空间分辨力等方面的局限性,并利用其互补性提高图像质量,为后续处理节约时间、降低成本,并提高图像综合应用效能。因此从图像融合技术发展至今,一直受到各国普遍关注,并在实际应用中取得了明显效益。

随着高性能的新型图像传感器不断涌现,人们

* 国家自然科学基金(60377038)资助课题。

作者简介: 倪国强(1946—),男,江苏无锡人,博士,教授,主要从事光电成像器件、技术、系统、应用、图像处理及高速实现、自由空间光通信技术等方面的研究。E-mail: nigq@bita.org.cn

收稿日期: 2007-09-04; 收到修改稿日期: 2007-10-15

对图像融合技术的要求也不断提高,由灰度图像融合到简单的伪彩色映射,融合图像视觉效果的优劣已经越来越重要。在追求充分利用和挖掘现有图像传感器潜力的同时,图像融合技术的研究已开始强调融合图像应当符合人类视觉的特点,显示成简单、适合人眼观察的近自然(“似真”)彩色形式,可明显改善融合图像的识别性能,减小操作者的疲劳感。由于人眼对色彩更为敏感,其分辨力比灰度图像高,还具备很好的颜色恒定性和动态范围压缩能力,特别是目前彩色图像的高速获取、处理、传输已成为现实,因此符合人类视觉特性的彩色图像融合技术及其高速实时处理成为重要的发展方向之一。

本文将从彩色图像融合算法的发展出发,着重介绍几种基于视觉特性的彩色图像融合算法和实时融合系统的发展动态,包含近几年课题组在该领域的研究进展;简略叙述课题组在硬件实时处理系统研究方面的部分成果;分析图像融合技术的几个关键技术难点,如多源图像特征分析、图像配准、融合图像后期处理等;最后总结当前实时彩色图像融合技术的发展趋势。

2 彩色图像融合算法的发展

在灰度图像中,人眼只能同时区分出由黑到白的低于 100 种不同的灰度级,而人眼对彩色的分辨力可达到几百种甚至上千种^[1]。基于人眼视觉的这一特征,如果采用某种彩色化处理技术将蕴藏在多源信道(或多时相)图像灰度等级中的细节信息以彩色的方式来表征,可以使人眼对图像的细节有更丰富的认识。

最早的图像灰度假彩色编码融合方法,先对输入的多源图像进行灰度融合,然后将融合输出的灰度图像进行彩色编码输出彩色图像。这种方法是图像融合的后处理,其本质与图像融合并无直接联系,因此并不是实际意义上的彩色图像融合方法。

随后发展的彩色图像融合方法都是通过某种处理,将不同源图像间不同灰度分布所表现的信息差异,直接用色彩表述并强化显示。而在色彩表现空间上,也出现了采用不同的颜色空间[如亮度-色调-饱和度(LHS)、红绿蓝(RGB)]的彩色图像融合技术。LHS 颜色空间能较好地体现人眼对色调、亮度和饱和度的反映^[2,3]。但是由于任何图像处理过程的终端设备都将归结为 RGB 颜色空间,因此,直接在 RGB 颜色空间实现彩色图像融合,无疑具有计算简单、速度快、易于硬件实时实现的优点。

目前主流的图像融合方法大都基于多分辨分析结构。最初的多分辨结构是 P. J. Burt 和 E. H. Adelson 提出的高斯和拉普拉斯金字塔^[4,5],在此基础上出现一些变形和扩展,相应地发展出一些融合算法^[6~8]。之后,其实质也为多分辨结构的小波分析由 Hassaina^[9]和 Li^[10]等引入到图像融合领域,并得到广泛的研究。这些融合方法得到的图像色彩,往往没有考虑到人类本身的视觉特性,色彩对比过于鲜明,易造成观察者疲劳,不适宜长时间观察,甚至融合后的彩色影像与真实色彩偏差很大,影响到观察者的正确判读。于是,符合人类视觉特性的彩色图像融合方法越来越受到研究者的重视。

国外利用视觉生理学进行图像融合的工作起步较早。R. P. Broussard 等^[11]利用脉冲耦合神经网络(PCNN)进行了特征级图像融合,据称可以显著提高目标识别率。J. Waldemark 等^[12]也利用脉冲耦合神经网络进行巡航导弹的导航目标识别研究。美国麻省理工学院(MIT)林肯实验室的 A. M. Waxman 利用对抗受域理论(仿响尾蛇双模式细胞工作机理)提出了夜视微光和红外图像的对抗融合^[13~18];TNO 人力因素研究所的 A. Toet 等^[19,20]提出的以源图像的共有成分和特有成分分析为基础的彩色映射方法,类似于生物彩色对抗机理。近年来,基于视觉特性的融合方法在理论上较少有更大突破,主要是上述算法的改进、融合源的拓展和逐步实用化。

北京理工大学光电工程系是国内最早开展图像融合技术研究的单位之一,特别是在基于视觉特性的彩色图像融合技术研究方面做了较多工作^[21~23],在全面研究 A. Waxman 和 A. Toet 融合算法的基础上,进行合理改进,同时进一步开展了若干视觉特性应用于图像融合领域的尝试,搭建相应的硬件实验平台,为自主开发实时彩色图像融合系统提供了技术基础。

3 基于视觉特性的彩色图像融合算法

3.1 国外相关成果

已知人类视觉系统中具有中心-环绕对抗结构,能对到达感受域不同位置的光信号产生不同的兴奋或抑制响应。图 1 显示了以视神经节细胞为代表的同心圆结构受域模型,其中“+”区域表示兴奋区,“-”区域表示抑制区。由 Kuffler^[24]于 1953 年通过实验验证了两种基本的受域类型:ON-Center OFF-Surround 受域(又称 ON 通道或“给光”中心)、OFF-Center ON-Surround 受域(又称 OFF 通道或

“撤光”中心)。就 ON 通道而言,它由中心的兴奋区及其环绕的抑制区构成,对完全覆盖中心的光照有最强的反应,对覆盖整个环绕区的光照产生最有效的抑制;两者功能上是对抗的,同时给予光照,会趋向于彼此抵消。OFF 通道与之正好相反。而在更高的视皮层细胞中,受域更为复杂,具有一定的朝向性和运动方向判断的选择机理^[25]。

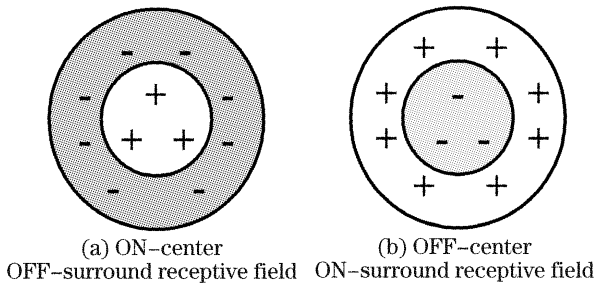


图 1 两种基本同心圆受域结构示意图

Fig. 1 Diagram of two basic concentric receptive fields

事实上,这种结构在生物系统中普遍存在,尤其是响尾蛇视顶盖的双模式细胞结构,还能够同时对来自可见光和红外图像的信息输入产生感知^[26]。研究发现在响尾蛇视顶盖存在 6 种对可见光和红外光产生不同非线性响应的双模式细胞:

- 1) 或(OR)细胞——对可见光或者红外光中的任何一种刺激产生响应,对两种信号刺激同时存在的情况下也产生响应。
- 2) 红外增强可见 (IR-enhanced visible) 细胞——仅对可见光刺激产生响应,单独的红外信号不起作用。一旦在可见光信号刺激的同时,存在红外信号刺激,细胞响应将明显增强。
- 3) 可见增强红外 (Visible-enhanced IR) 细胞

——仅对红外信号刺激产生响应,单独的可见光刺激不起作用。一旦在红外信号刺激的同时,存在可见光信号,细胞响应将明显增强。

4) 与(AND)细胞——对单独的可见光和红外信号刺激仅具有非常微弱的响应,只有两种信号刺激同时存在,细胞响应才能显著增强。

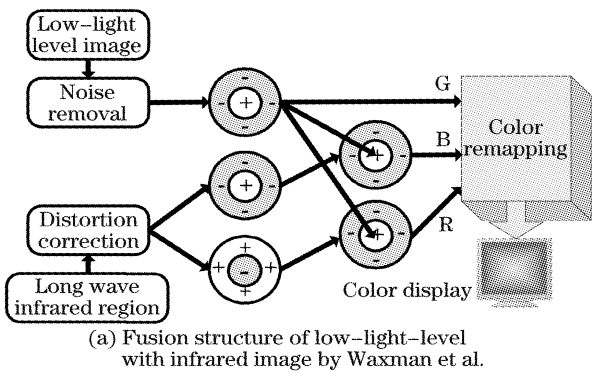
5) 红外抑制可见 (IR-depressed visible) 细胞——仅对可见光刺激产生响应,单独的红外信号不起作用。一旦在可见光信号刺激的同时,存在红外信号刺激,细胞将受到抑制,响应将明显减弱。

6) 可见抑制红外 (Visible-depressed IR) 细胞——仅对红外信号刺激产生响应,单独的可见光刺激不起作用。一旦在红外信号刺激的同时,存在可见光信号,细胞将受到抑制,响应将明显减弱。

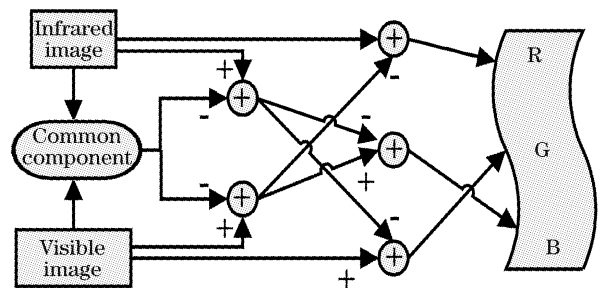
6 种双模式细胞相互协作,构成了响尾蛇视觉系统中天然的可见光-红外双波段融合处理机制。借鉴这些功能机理,针对不同的目标与环境(季节、气候、时相、距离、背景等)条件加以假设^[27],采用不同的图像融合策略,有利于发展可靠的接近自然效果的图像融合理论^[28,29]。

A. Waxman 等^[13~18]正是利用上述对抗结构建立了如图 2(a)的典型融合结构,其中的 ON-OFF 结构体现了对比度感知属性,第二阶段红外增强微光、红外抑制微光的处理符合响尾蛇对可见光和红外双通道图像的处理机制。

图 2(b)是 A. Toet 等^[19,20]提出的可见光与红外图像融合方法的示意图,先分别计算两者的共有部分和特有部分,利用特有部分的对比,仿照对抗结构映射到 RGB 空间,形成彩色融合效果。



(a) Fusion structure of low-light-level with infrared image by Waxman et al.



(b) Structure of Toet's fusion method

图 2 两种模拟视觉特性的融合算法示意图

Fig. 2 Flow chart of two fusion algorithms based on human visible characteristics

图 2 所示的两种方法都采用了拟视觉特性的方法对源图像进行相关性分析。由于视觉系统具有增强图像共有信息、增强互补信息以及良好的动态范围压缩能力,因此从这一角度出发建立的彩色图像

融合方法都取得了优秀的效果(见图 3、图 4)。一些其他的去相关方法,如基于特征分析的图像统计方法^[30]也在研究中。

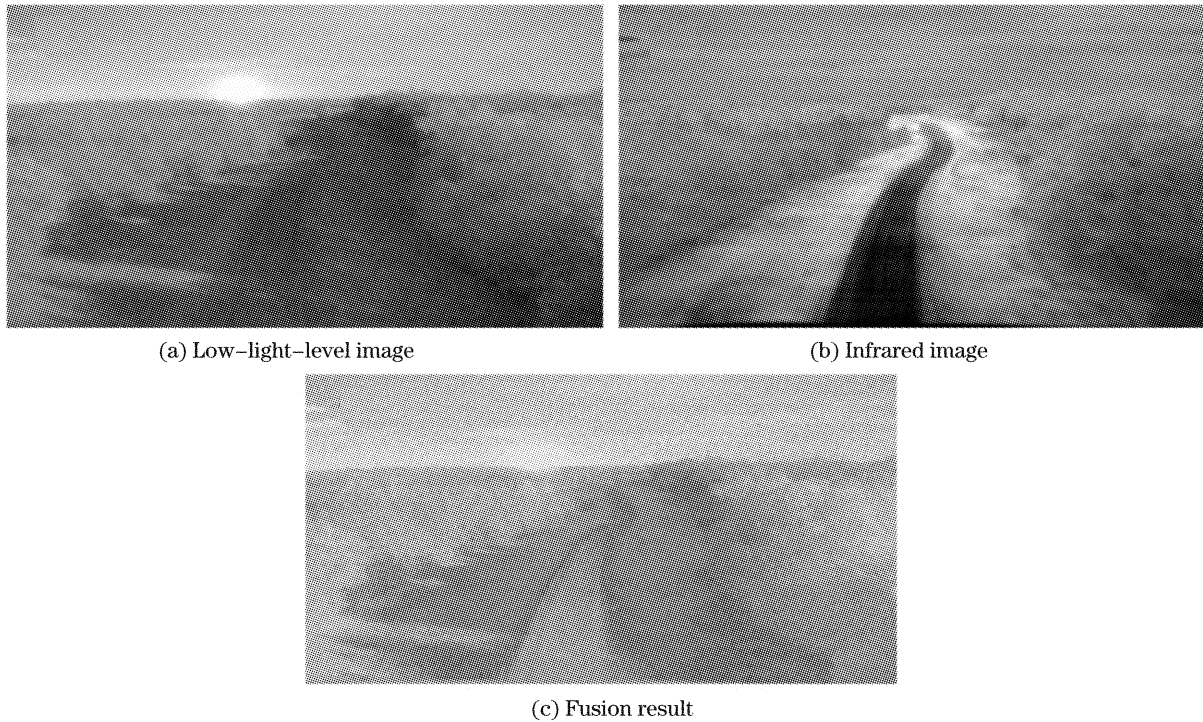


图 3 图 2(a)算法效果图
Fig. 3 Results by Fig. 2(a) algorithm

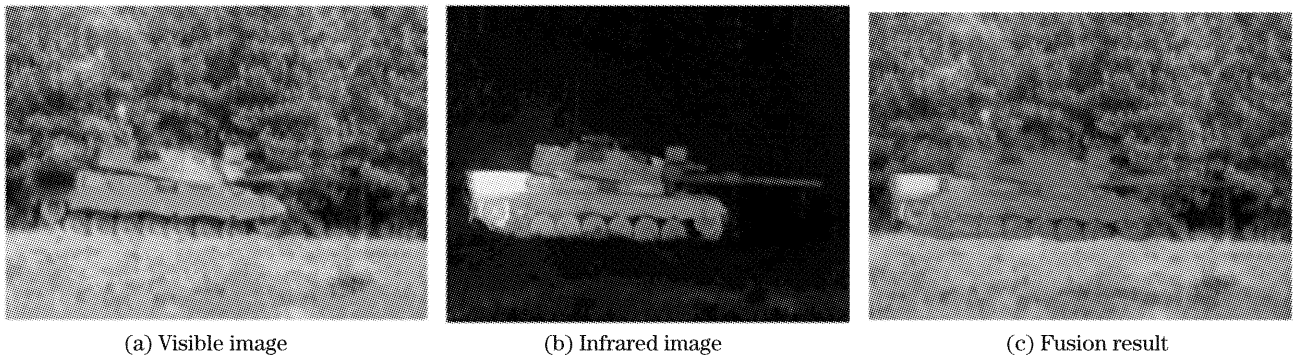


图 4 图 2(b)算法效果图
Fig. 4 Results by Fig. 2(b) algorithm

课题组近年来在基于视觉特性的图像融合领域开展工作,主要研究成果有:

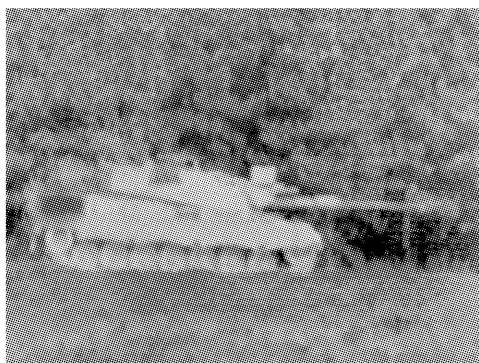
1) 研究基于 Waxman 模型的改进方法^[28]。通过对响尾蛇双模式细胞的工作方式进行较为细致的研究,模拟其视觉特性进行彩色图像融合,在进一步保持融合信息完整性、对比度增强等方面取得一定的成效。Waxman 设计的融合拓扑结构,将经过整流后的不同红外信号馈入对抗神经网络的环绕区域,其实质仍是抑制信号,整流的结果是只保留正对比度,必将导致负对比度信息的丢失。因此文献[28]设计了增强、抑制混合型神经网络,既能利用抑制信号去相关,同时也有效分离原始图像的正、负对比度,增强可见光与红外图像的公有信号,保持分辨力。

2) 文献[31]则从 Land 的一个 Retinex 实验^[32]出发提出了一种彩色图像融合方法。Land 将经过

红、绿透明片的光,再适当通过滤波片,得到其投影效果与原始图像完全一样。受其启发,文献[31]中建立了红外图像与红色透明片、可见光图像与绿色透明片的对应关系,将其与 A. Toet 等^[19,20]的方法作对比评价,获得了比 A. Toet 方法更优的图像融合效果,这也是课题组对彩色图像融合效果评价方法的又一次深入探索。

3) 利用视觉系统的阈值特性,强化融合图像的对比度信息^[33]。由心理物理学实验^[34]得出的视锥、视杆阈值-强度函数,充分体现出人类视觉系统在早期亮度处理过程的阈值特点,以此为依据改进金字塔图像融合方法,确定融合要素重构融合图像,与拉普拉斯金字塔、低通比率金字塔融合相比较,能增强融合局部对比度,同时有效避免低通比率金字塔等方法中可能出现的斑点噪声。

4) 皮层变换应用于融合研究^[35]。皮层变换最初应用于图像编码领域^[36],具有很高的纹理分类精度,它将单幅图像映射成一系列分辨力和方向各异的子图像,子图像中的像素类似于视觉皮层中的某个神经元的响应。研究涉及皮层变换的构造步骤及



(a) Result of improved Waxman's method



(b) Fusion result based on Land's experiment

图 5 课题组部分融合算法效果展示[以图 4(a)、图 4(b)为源图像]

Fig. 5 Result of our methods [with Fig. 4(a), Fig. 4(b) as source images]

4 实时彩色图像融合系统的发展动态

目前实时图像融合系统的实现主要分为两类:基于数字信号处理器(DSP)技术;基于大规模现场可编程门阵列(FPGA)技术,即可编程片上处理系统(SoPC)实时融合系统。

国内外利用数字信号处理器进行实时融合系统的研究已取得了重要进展。美国 TI 公司较早开展图像融合系统研究,成果显著。1998 年,美国 MIT 林肯实验室设计了一套基于 C80 处理器的实时融合系统^[17],以完成微光 CCD 与红外图像的彩色融合算法,并取得了很好的效果;2000 年,MIT 在原有基础上增加了中波红外和短波红外摄像机,开发出多传感器实时夜视融合系统^[18]。国内,北京理工大学^[37,38]、南京理工大学^[39]等科研院所也较早开展了图像融合系统的设计和实验,为实际应用创造了条件。

近几年,由于大规模可编程器件的快速发展,使得它在实时融合系统领域倍受瞩目。目前国内外都在开展利用大规模可编程片上处理系统实现可编程片上处理系统实时融合系统的工作,并取得了令人鼓舞的成绩。

较早的英国 OCTEC 公司和 Waterfall Solutions 公司联合研制了一款用于警察直升机上的图像配准融合系统^[40],采用 Altera 公司 StratixII 系列可编程片上处理系统作为处理器,分别接收红外和可见光图像,实现自动配准和融合,其结果直接

其修正,采用不同的融合规则构造融合算法。

图 5 展示了文献[28,31]的融合效果。与常规的彩色图像融合算法相比,基于视觉特性的研究更侧重于融合图像的彩色真实性,尽可能与人眼所见的自然场景一致,强调视觉效果舒适度。

输出到监视器上以供飞行员观测。目前该系统已投入实际使用,但限于其自动配准水平,须将两台摄像机装载在一定距离内,其配准技术有待进一步研究;彩色融合算法、相机自动控制技术是下一步发展的重点。

美国 Equinox 公司的实时彩色图像融合系统开发水平为世界领先水平。Equinox 于 2005 年 6 月在 SPIE(国际光学工程学会)防卫安全研讨会(SPIE Defense Security Symposium)上推出了最新研究成果——DVP-4000^[41,42]。该系统来源于美国 Army/CECOM (US Army Communications-Electronics Command)SBIR(Small Business Innovation Research)名为“夜视红外和微光图像融合”发展计划。DVP-4000 选用 Altera 公司 Cyclone 系列和 Stratix 系列可编程片上处理系统作为处理器,功耗只有 1.5 W,采用 Equinox 公司优化的彩色融合算法,较好地实现了双通道热红外和可见光图像的自动配准及彩色融合。这是实时图像融合系统迈向商用化的重要一步。

课题组围绕图像实时融合系统的研究开展了大量工作,在基于数字信号处理器和大规模可编程片上处理系统实时融合系统方面均有所收获。

在数字信号处理器方面,课题组已开发了基于 3 片 TMS320C6201 的实时融合系统^[37],针对 512×512×8 bit 图像验证了金字塔融合算法的实时实现;设计以 TMS320C6416 为核心的实时融合系统,研究了用单片数字信号处理器完成图像预处理和金

字塔算法的实时融合策略^[43]；应用 TI 数字多媒体处理器 DM642 开发了新一代小型化实时图像融合系统^[44]，实验表明，该系统能够对 $720 \times 576 \times 8$ bit 双视频流完成 3 层拉普拉斯金字塔算法的实时融合处理，并在此平台上进行了其他彩色融合算法的验证。

在可编程片上处理系统方面，课题组紧跟国外动态，开发了第一代基于 Virtex4 系列可编程片上处理系统的实时融合系统^[45]。该系统采用 12 bit 分辨率的视频编解码器，模块化分级流水的算法设计，能实现 $512 \times 512 \times 12$ bit 双通道图像的实时融合处理。实验验证了在单片 Xilinx V4SX35 可编程片上处理系统基础上，实时处理 3 层拉普拉斯金字塔算法的双通道融合算法的能力^[46]，并进一步研究可编程片上处理系统级融合系统设计方案与功耗分析^[47]。同时，为了满足高精度双通道图像采集与显示的要求，相关的辅助系统的设计^[48]也在开展中。

目前，课题组正在开发可编程片上处理系统级图像实时融合系统、数字信号处理器和可编程片上处理系统协同处理的实时融合系统，充分发挥大规模可编程片上处理系统高并行性特点，作为数字信号处理器的协处理器完成复杂运算，进而提高系统性能。

5 关键技术分析

5.1 源图像的特征研究

图像融合以传感器件的关系为基础，不同传感器基于不同的物理现象，所以得到的不同源图像可能有很大差异。

图像融合的信息通道一般来源于可见光、多光谱、微光夜视、近红外、短波、中波与长波红外等成像仪，还包括合成孔径雷达(SAR)成像、高光谱成像等。信息源差别很大，因此融合图像的彩色效果有很大的变化空间。彩色图像融合算法要增强共有信息、显示互补信息、去除噪声，同时要用符合人类视觉感知习惯的色彩表达出来，就需要熟悉不同源图像本身的特征。

例如微光图像最主要的特征是信噪比低，在照度低于 10^{-3}lx 时，噪声几乎把图像淹没，图像的对比度、亮度以及分辨率明显下降；微光图像信号的空间和时间相关性很大，而图像噪声的空间和时间相关性很小。而红外图像信噪比一般比可见光图像低，且动态范围相对较大，但易产生空间不均匀；不同波段的红外图像特征有所差异。综合不同源图像的特征，提高这些互补特征在融合图像中的对比度、

色彩丰富程度，能有效地提高融合图像的质量。

5.2 相关性分析

融合算法本身是对不同源图像信息的交互处理——即采用某种方法来有效包容各自图像蕴含的信息，这个过程最重要的基础就是源图像的相关性分析。

对于不同传感器获得的源图像，可以认为其信息存在以下关系^[49]：

- 1) 共有信息——不同传感器中共同存在的信息；
- 2) 互补信息——只在某个传感器中存在，分为利于融合结果探测或识别的有用互补信息、干扰目标探测的不相关互补信息；
- 3) 噪声。

通常的，如果源图像的相关系数为 1，说明图像完全相关；相关系数为 -1，说明图像完全不相关，即包含大量的有用互补信息；相关系数为 0，说明图像是随机相关的。完全相关的源图像映射到色彩空间后，无法获得丰富的彩色信息，因此有必要选择相关系数小的源图像，得到彩色信息丰富、彩色对比度好的融合图像。

而图像融合算法本身应当具有很好的相关性提取、去相关能力，即有效突出源图像的共有部分、各自的特征部分，压缩不相关互补信息，去除噪声。传统融合方法往往从对等的角度考虑多源图像，而模拟生物视觉特性的方法更看重信息对比，估计不同传感器的特征信息成分，有可能取得接近自然的真实彩色效果的融合方法。

5.3 实时图像配准技术

在很多场合下需要引入实时图像融合技术，其中一个难点是不同传感器获得的图像可能在时间、空间位置、角度等方面有所差异，因此实时图像配准技术的研究至关重要。

要获得好的图像融合效果，必须保证不同源图像的像素点对应于相同的时间和空间位置，即实时图像配准处理一方面要保证源图像的时间同步，另一方面要弥补由于镜头变形造成的畸变，修正由不同传感器未对准形成的不同源图像空间平移、旋转或比例缩放等问题。

从图 6(c)可以看出^[41]，若不同源图像未作配准处理，其融合结果会产生“鬼影(Ghosting)”现象，在高精度的应用领域(如目标跟踪、精确制导、目标变化检测等)会严重影响后续处理的准确性。需要说明的是，并非所有图像融合的应用领域，都需要高精

度的图像配准技术。在图 6(d)配准的情况下,与图像近景的主体部分(人像)相比,在距离传感器较远的背景区域,其建筑物的图像质量仍在可以接受的范围内。进行实时处理时,场景具有深度,整个场景又不断变化,往往很难找到一种单一的映射方法能同时对源图像不同视差的景物实现精确的配准。一种解决方法^[41]是将该问题独立出来,设置交互式的系统操作接口以供不同应用环境选择,简化思路。

国外已经有较为成熟的实时图像配准技术,嵌入到实时图像融合系统。国内也开展了大量相关研究。目前研究中还存在着很多的困难,特别是图像

或数据类别差异大(如光学与合成孔径雷达图像)、波段差异大(如可见光与长波红外图像)等情况下的图像高精度、自动配准技术的实现,更是存在较大的困难。

目前实时图像配准技术的难点^[50]主要来源于异构传感器图像配准、高精度(亚像素级、深亚像素级)图像配准、高速图像配准、自动图像配准和严重位置差异(共同部分比例小)的图像配准等。但在与实时图像融合技术的协同研究中,应当把握应用环境对图像配准精度、速度的要求,从而获得适合图像融合要求的配准结果。

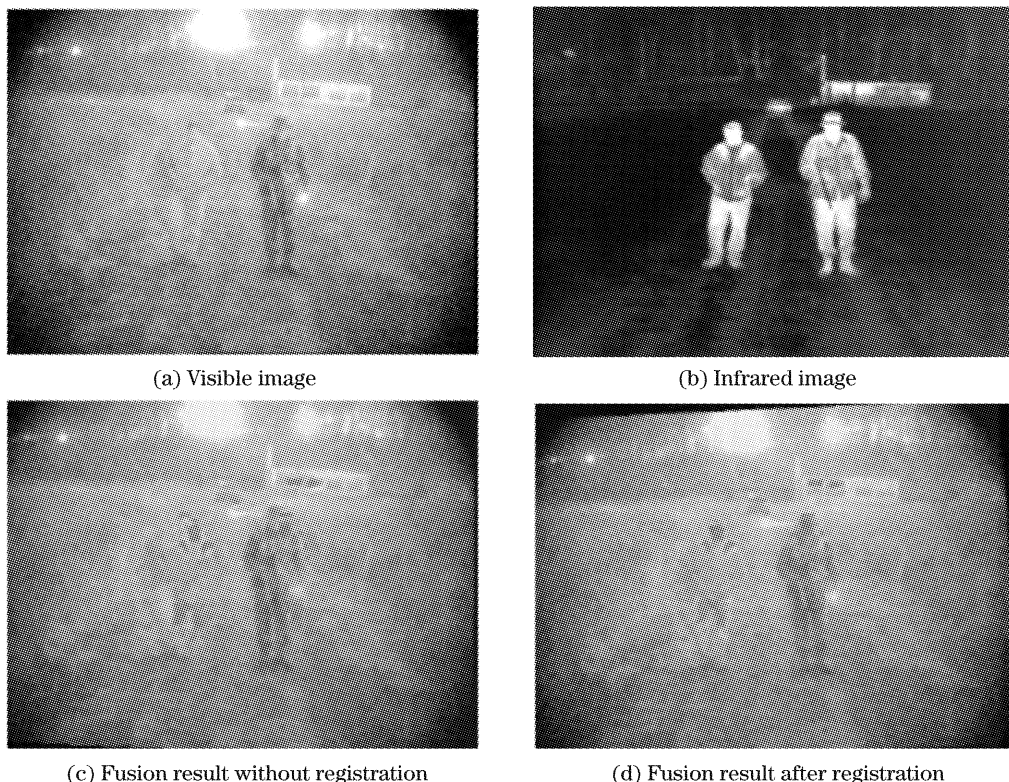


图 6 图像配准技术在实时图像融合中的作用

Fig. 6 Effect of image registration in real-time image fusion

5.4 融合图像的后期处理

彩色图像融合算法的设计过程中已经考虑到动态范围压缩、色彩与人类视觉感知的匹配等问题,对直接融合的结果进一步处理,有可能获得更加贴近自然真实感的彩色融合结果,有利于减轻观察者的负担。

文献[17]在亮度-色调-饱和度空间对直接融合的结果进行色彩重映射(Color remapping),并对不同类型的场景(如森林、沙漠等)设计不同的映射因子。这种色彩重映射的过程能增强不同景物对比度、保持色彩恒定性、有利于显示输出。因此,课题组也开展了相关的真实影像再现技术的研究^[51]。

6 展 望

2007年1月下旬,美国IDGA(Institute for Defense and Government Advancement)召开了第五次图像融合年度会议(The 5th Annual Conference Image Fusion 2007—Improving Visibleization for Better Situational Awareness),对图像融合技术的发展方向进行了前瞻性的探讨。这次大会的中心议题是如何提高实时态势感知的可视化效果,强调在军事环境下,图像技术、传感器技术,特别是图像融合技术的发展如何为可视化、立体视觉等提供可靠的支撑,从而建立针对恶劣环境的生物识别系统的图像(或信息)融合技术。可见,图像融

合技术与其他实际应用场合的交互作用日趋显著。

目前,各发达国家都非常重视实时图像融合系统的研究,已逐步走向小型化、实用化、商业化;并将图像融合技术的研究深入到更高层次,如基于多传感器的三维图像融合。综合来看,优秀的图像融合技术还依赖于高性能的图像传感器的成熟发展。其总体趋势是最大化地综合不同源图像的互补信息,建立符合人类视觉感知的彩色图像融合方法;融合应用系统应朝着高速实时、低功耗、小巧便捷、功能集成化方向发展。

参 考 文 献

- 1 Alexander Toet. Natural colour mapping for multiband nightvision imagery[J]. *Information Fusion*, 2003, **4**(3): 155~166
- 2 A. R. Smith. Color gamut transform pairs[C]. *Proc. of the 5th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 1978, **12**: 12~19
- 3 G. H. Joblove, D. Greenberg. Color space for computer graphics[C]. *Proc. of the 5th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 1978, **12**: 20~25
- 4 P. J. Burt, E. H. Adelson. The Laplacian pyramid as a compact image code [J]. *IEEE Trans. Commun*, 1983, **COM-31** (4): 532~540
- 5 E. H. Adelson, C. H. Anderson, J. R. Bergen *et al.*. Pyramid methods in image processing[J]. *RCA Engineer*, 1984, **29**(6): 33~41
- 6 Z. Zhang, R. S. Blum. A categorization of multiscale-decomposition-based image fusion schemes with a performance study for a digital camera application[C]. *IEEE*, 1999, **87**(8): 1315~1326
- 7 P. J. Burt, R. J. Kolczynski. Enhanced image capture through fusion [C]. *Proc. of the 4th International Conference on Computer Vision*, 1993. 173~182
- 8 A. Toet, J. Walraven. New false color mapping for imaging fusion[J]. *Opt. Engng.*, 1996, **35**(3): 650~658
- 9 F. Hassaina, I. Magafia, F. Langevin *et al.*. Image fusion by an orthogonal wavelet transform and comparison with other methods [J]. *Engineering in Medicine and Biology Society*, 1992, **14**: 1246~1247
- 10 Hui Li, B. S. Manjunath, S. K. Mitra. Multi-sensor image fusion using the wavelet transform image processing[C]. *IEEE International Conference on Image Processing*, 1994, **1**: 51~55
- 11 R. P. Broussard, S. K. Rogers, M. E. Oxley *et al.*. Physiologically motivated image fusion for object detection using a pulse coupled neural networks [J]. *IEEE Trans. on Neural Networks*, 1999, **10**(3): 554~563
- 12 Joakim Waldemark, Vlatko Becanoric, Thomas Lindblad *et al.*. Pulse-coupled neural networks for cruise missile guidance and mission planning[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3728**: 155~164
- 13 A. M. Waxman, D. A. Fay, A. N. Gove *et al.*. Color night vision: fusion of intensified visible and thermal IR imagery[C]. *Proc. SPIE*, 1995, **2463**: 58~68
- 14 A. M. Waxman, A. N. Gove, M. C. Seibert *et al.*. Progress on color night vision: Visible/IR fusion, perception & search and low-light CCD imaging[C]. *Proc. SPIE*, 1996, **2736**: 96~107
- 15 M. Aguilar, D. A. Fay, W. D. Ross *et al.*. Real-time fusion of low-light CCD and uncooled IR imagery for color night vision[C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3364**: 124~135
- 16 A. Toet, J. K. Ijspeert, A. M. Waxman *et al.*. Fusion of visible and thermal imagery improves situational awareness[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **3088**: 177~188
- 17 Allen M. Waxman, Mario Aguilar, David A. Fay *et al.*. Solid-state color night vision: fusion of low-light visible and thermal infrared imagery[J]. *Lincoln Laboratory J.*, 1998, **11**(1): 41~60
- 18 D. A. Fay, A. M. Waxman, M. Aguilar *et al.*. Fusion of 2-/3-/4- sensor imagery for visualization, target learning and search [C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4023**: 106~115
- 19 A. Toet. Image fusion by a ratio of low pass pyramid [J]. *Pattern Recogn. Lett.*, 1989, **9**(4): 245~253
- 20 A. Toet, L. J. van Ruyven, J. M. Valetan. Merging thermal and visual images by a contrast pyramid[J]. *Opt. Engng.*, 1989, **28**(7): 789~792
- 21 Pu Tian. *Studies for Real Image Rendition and Image Fusion Based on the Neurodynamics of Visual System* [D]. Ph. D's Thesis of Beijing Institute of Technology, 2002. 68~78 (in Chinese)
- 蒲 恬. 基于视觉神经动力学的真实影像再现和图像融合技术研究[D]. 北京理工大学博士学位论文, 2002. 68~78
- 22 Wang Lingxue. *Color Fusion of Multi-Band Night Vision Images Based on Biology Vision Model* [D]. Ph. D's Thesis of Beijing Institute of Technology, 2003. 71~80 (in Chinese)
- 王玲雪. 基于生物视觉特性的夜视图像彩色融合技术研究[D]. 北京理工大学博士学位论文, 2003. 71~80
- 23 Huang Guanghua. *Visual Characteristics Based Image Lightness Perception and Image Fusion* [D]. Ph. D's Thesis of Beijing Institute of Technology, 2007. 101~156 (in Chinese)
- 黄光华. 基于视觉特性的图像明度感知与图像融合技术的研究[D]. 北京理工大学博士学位论文, 2007. 101~156
- 24 S. W. Kuffler. Discharge patterns and functional organization of mammalian retina[J]. *J. Neurophysiol.*, 1953, **16**(1): 37~68
- 25 J. G. Nicholls, A. R. Martin, B. G. Wallace *et al.*. *Beuro Biology—From Neuron to Brain* [M]. Fourth Edition, Yang Xiongli *et al.*, Transl., Beijing: Science Press, 2003. 468~495 (in Chinese)
- J. G. 尼克尔斯, A. R. 马顶, B. G. 华莱士等. 神经生物学——从神经元到脑[M]. 第四版, 杨雄里等译, 北京: 科学出版社, 2003. 468~495
- 26 E. A. Newman, P. H. Hartline. The infrared "vision" of snakes [J]. *Scientific American*, 1982, **246**(3): 116~125
- 27 S. Grossberg. Contour enhancement, short term memory, and constancies in reverberating neural networks [J]. *Studies in Applied Mathematics*, 1973, **52**(3): 213~257
- 28 Ni Guoqiang, Dai Wen, Li Yongliang *et al.*. Visual/IR color image fusion based on rattlesnake bimodal cell neurodynamics: advances and prospects [J]. *Trans. of Beijing Institute of Technology*, 2004, **24**(2): 95~100 (in Chinese)
- 倪国强, 戴 文, 李勇量等. 基于响尾蛇双模式细胞机理的可见光/红外图像彩色融合技术的优势和前景展望[J]. 北京理工大学学报, 2004, **24**(2): 95~100
- 29 Ni Guoqiang. Image fusion technology and its new development [J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(11): 817~821 (in Chinese)
- 倪国强. 基于视觉神经动力学的图像融合与处理技术若干新进展[J]. 激光与红外, 2005, **35**(11): 817~821
- 30 Jinzhong Yang, Rick S. Blum. Multi-frame image fusion using the expectation-maximization algorithm [C]. 2005 7th International Conference on Information Fusion (FUSION), 2005, **1**: 469~474
- 31 Guanghua Huang, Guoqiang Ni, Bin Zhang. Visual and infrared dual-band false color image fusion method motivated by Land's experiment [J]. *Opt. Engng.*, 2007, **46**(2): 027001-1~10
- 32 E. H. Land, J. J. McCann. Lightness and retinex theory [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1971, **61**(1): 1~11

- 33 Huang Guanghua, Ni Guoqiang, Zhang Bin. Image fusion by a visual threshold based pyramid[J]. *Trans. of Beijing Institute of Technology*, 2006, **26**(10): 907~911 (in Chinese)
黄光华, 倪国强, 张彬. 一种基于视觉阈值特性的图像融合方法[J]. 北京理工大学学报, 2006, **26**(10): 907~911
- 34 J. A. Ferwerda, S. N. Pattanaik, P. Shirley *et al.*. A model of visual adaptation for realistic image synthesis[C]. *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 1996. 249~258
- 35 Huang Guanghua, Ni Guoqiang, Zhang Bin *et al.*. A cortex transform based image fusion method[J]. *Trans. of Beijing Institute of Technology*, 2007, **27**(6): 536~540 (in Chinese)
黄光华, 倪国强, 张彬等. 一种基于皮层变换的图像融合方法[J]. 北京理工大学学报, 2007, **27**(6): 536~540
- 36 A. B. Watson. The cortex transform: rapid computation of simulated neural images[J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1987, **39**(3): 311~327
- 37 Li Xin, Ni Guoqiang, Chen Xiaomei. The realization of real-time image fusion system with multi-DSP[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4925**: 369~375
- 38 Wang Shengxiang. Study of real-time digital image process technology in color night vision image system[D]. Ph. D's Thesis of Beijing Institute of Technology, 2003. 53~56 (in Chinese)
王生祥. 彩色夜视成像系统中实时数字图像处理技术的研究[D]. 北京理工大学博士学位论文, 2003. 53~56
- 39 Qian Weixian, Bai Lianfa, Gu Guohua *et al.*. The real-time dual band image fusion system with improved gray modulating fusion algorithm[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5637**: 57~64
- 40 David Dwyer, Duncan Hickman, Tom Riley *et al.*. Real time implementation of image alignment and fusion on a police helicopter[C]. *Proc. SPIE*, 2006, **6226**: 622607-1~11
- 41 Lawrence B. Wolff, Diego A. Socolinsky, Christopher K. Eveland. Advances in low-power visible/thermal IR video image fusion hardware[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5782**: 54~58
- 42 Lawrence B. Wolff, Diego A. Socolinsky, Christopher K. Eveland. Versatile low-power multi-spectral video fusion hardware[C]. *Proc. SPIE*, 2006, **6206**: 620624-1~6
- 43 Lu Rong, Gao Kun, Ni Guoqiang *et al.*. Study on multi-resolution real-time processing strategy in image fusion system[J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(11): 1075~1078 (in Chinese)
卢蓉, 高昆, 倪国强等. 图像融合系统中多分辨率实时处理策略的研究[J]. 激光与红外, 2006, **36**(11): 1075~1078
- 44 Wang Qiang, Ni Guoqiang, Gao Kun *et al.*. A design of DSP-based small integrated system for image fusion[J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(11): 902~905 (in Chinese)
王强, 倪国强, 高昆等. 一种基于 DSP 的小型集成化图像融合系统设计[J]. 激光与红外, 2005, **35**(11): 902~905
- 45 Song Yajun, Xu Tingfa, Ni Guoqiang *et al.*. Low power image fusion system based on Virtex-4 FPGA[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(6): 935~940 (in Chinese)
宋亚军, 许廷发, 倪国强等. 基于 Virtex-4 FPGA 的低功耗图像融合系统[J]. 光学精密工程, 2007, **15**(6): 935~940
- 46 Lu Rong, Gao Kun, Ni Guoqiang *et al.*. Study on real-time implementation of multi-resolution image fusion system based on FPGA[J]. *Laser & Infrared*, 2007, **37**(Suppl.): 1018~1021 (in Chinese)
卢蓉, 高昆, 倪国强等. 基于 FPGA 的多分辨率图像融合系统实时实现的研究[J]. 激光与红外, 2007, **37**(增刊): 1018~1021
- 47 Qin Qingwang, Ni Guoqiang, Gao Kun *et al.*. Design of dual-channel image fusion system based on SoPC level[J]. *Laser & Infrared*, 2007, **37**(Suppl.): 1013~1017 (in Chinese)
秦庆旺, 倪国强, 高昆等. SoPC 级双通道图像融合系统设计[J]. 激光与红外, 2007, **37**(增刊): 1013~1017
- 48 Song Yajun, Ni Guoqiang, Gao Kun *et al.*. Design of high precision dual-channels image acquisition and VGA display system[J]. *Laser & Infrared*, 2007, **37**(Suppl.): 1010~1012 (in Chinese)
宋亚军, 倪国强, 高昆等. 高精度双通道红外图像采集与 VGA 显示系统的设计[J]. 激光与红外, 2007, **37**(增刊): 1010~1012
- 49 Misha Pavel, Ravi K. Sharma. Model-based sensor fusion for aviation[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **3088**: 169~176
- 50 Ni Guoqiang, Liu Qiong. Analysis and prospect of multi-source image registration techniques[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(9): 1~6 (in Chinese)
倪国强, 刘琼. 多源图像配准技术分析与发展[J]. 光电工程, 2004, **31**(9): 1~6
- 51 Ni Guoqiang, Xiao Manjun, Hu Hongqing *et al.*. New progress and prospect of realistic image rendition based on visual characteristics[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(4): 451~460 (in Chinese)
倪国强, 肖蔓君, 胡宏清等. 基于视觉特性的真实影像再现技术进展及展望[J]. 中国激光, 2007, **34**(4): 451~460