

远距离红外与微光/可见光融合成像系统

张俊举, 常本康, 张宝辉, 闵超波, 袁轶慧, 姜 斌

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 提出了一种基于查找表的硬件方法, 实现了基于 $l\alpha\beta$ 空间色彩传递的图像融合, 并以此为基础研制了一种红外热像仪/微光电视/CCD 融合成像系统。微光电视和 CCD 分别在夜间和白天与热像仪融合, 构成一全天时的融合成像系统。该系统能够获得近似自然色的图像融合效果, 并具有较好的色彩一致性。系统还设计了两种视场, 以适应大视场搜索、小视场跟踪的需要, 增加了激光测距能力, 以满足距离估算的需要。实验结果表明了该系统在导航、监控和目标探测等方面的应用潜力。

关键词: 图像融合; 红外热像仪; 微光电视; CCD

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2012)01-0020-05

Long-distance image fusion system for infrared and LLL/visible bands

Zhang Junju, Chang Benkang, Zhang Baohui, Min Chaobo, Yuan Yihui, Jiang Bin

(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: A hardware approach based on looking-up table was proposed to implement image fusion by transferring natural daylight colors to multi-band images in the $l\alpha\beta$ space, and consequently a long-distance infrared and low light level (LLL)/visible fusion imaging system was developed. An LLL camera and a CCD fusing with an infrared thermal imager in the night and day respectively, which ensured the system to keep 24-hour fusion imaging. The colors in the resulting colorized multiband night-time images closely resemble the colors in the daytime color reference image and object colors remain good color constancy. Two fields of view were designed, which satisfied the need of searching in the big field of view and tracking in the little field of view. A laser rangefinder was embedded in this system to satisfy the need of measuring distance. Preliminary field trials demonstrate the potential of the system for applications like surveillance, navigation and target detection.

Key words: image fusion; infrared thermal imager; low light level camera; CCD

收稿日期: 2011-05-14; 修订日期: 2011-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(60871012); 南京理工大学自由探索项目(2010ZYTS032); 江苏省研究生创新基金项目(CX09B-097Z)

作者简介: 张俊举(1979-), 男, 讲师, 博士, 主要从事光电成像技术方面的研究工作。Email: zj_w1231@163.com

0 引言

红外热像仪和微光电视 (I²CCD 或 EMCCD)/CCD 是主要的远距离侦察装备。红外热像仪对热目标敏感,能穿透烟雾识别隐藏的人员与车辆;微光电视/CCD 工作于可见光至近红外光谱,所成图像符合人眼视觉特性,分辨率较高,因此红外与微光图像的融合将有利于综合红外图像较好的目标指示特性和微光图像的清晰场景信息^[1-3]。

红外与微光图像融合因其在夜视侦察、观瞄制导等方面的巨大应用潜力而成为近年来的研究热点。Waxman 等发展了基于人眼 Retinex 特性的图像融合算法,并设计了 2/3/4 波段图像融合演示系统,但此类方法色彩一致性较差^[4]。A.Toet 将 $l\alpha\beta$ 空间的色彩校正技术引入到红外与微光图像融合领域,提出了基于参考图像的色彩传递算法,可将参考图像的颜色特征传递给融合图像,使得融合图像具有近似自然色的效果^[5-6]。由于色彩传递算法需要在 $l\alpha\beta$ 空间进行,而 RGB 到 $l\alpha\beta$ 空间变换需要对数运算,难以直接在硬件实现,限制了该算法在实时系统中的应用。为此,很多学者都对色彩传递算法进行了改进^[7-9],如将色彩传递由 $l\alpha\beta$ 空间改为 YUV、YCBCR 或 HSV 空间,但在精简计算结构的同时也损失了部分色彩传递效果。

文中针对 RGB 与 $l\alpha\beta$ 空间变换运算复杂的特点,提出了基于查找表的硬件实现方法,实现了基于 $l\alpha\beta$ 空间的色彩传递图像融合。通过 FPGA 和 DSP 相互配合设计了视频图像的实时融合电路,并以此为基础研制了一种远距离红外热像仪/微光电视/CCD 融合成像系统。微光电视和 CCD 分别在夜间和白天与热像仪融合,构成一全天时的融合成像系统。

1 系统算法

A.Toet 提出的基于色彩传递的图像融合算法需要在 $l\alpha\beta$ 空间进行,利用参考图像的颜色统计信息作为基准对初始色彩映射图像进行标准化,可实现将参考图像的颜色特征传递给融合图像^[5-6]。该方法首先需要选择一幅参考彩色图像,将其转换到 $l\alpha\beta$ 空间,计算出参考图像在 $l\alpha\beta$ 空间的均值和标准方差;按照直接映射法将红外和微光/可见光图像映射

到 RGB 空间,产生彩色映射融合图像,例如可将其预定义为:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{IR} \\ Y_{LL} \\ Y_{LL} \end{bmatrix} \quad (1)$$

然后将彩色映射图像的 RGB 空间数据转换到 $l\alpha\beta$ 空间,计算其在 $l\alpha\beta$ 空间的均值和标准方差;然后,按照公式(2)进行色彩传递:

$$\begin{cases} l_t^* = \frac{\sigma_{l,\text{ref}}}{\sigma_{l,s}}(l_s - \mu_{l,s}) + \mu_{l,\text{ref}} \\ \alpha_t^* = \frac{\sigma_{\alpha,\text{ref}}}{\sigma_{\alpha,s}}(\alpha_s - \mu_{\alpha,s}) + \mu_{\alpha,\text{ref}} \\ \beta_t^* = \frac{\sigma_{\beta,\text{ref}}}{\sigma_{\beta,s}}(\beta_s - \mu_{\beta,s}) + \mu_{\beta,\text{ref}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ 和 μ 分别为标准方差和均值;下标 ref 为参考图像; s 为彩色映射融合图像; t 为色彩传递后的融合图像。为了能够成像系统显示,还需要将其从 $l\alpha\beta$ 转换回 RGB 空间。 RGB 空间到 $l\alpha\beta$ 空间的变换过程为:

(1) 由 RGB 空间变换到 LMS 空间;

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3811 & 0.5783 & 0.0402 \\ 0.1967 & 0.7244 & 0.0782 \\ 0.0241 & 0.1288 & 0.8444 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3)$$

(2) 对 LMS 空间作对数变换,从而降低 LMS 空间数据的偏斜程度;

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \log L \\ \log M \\ \log S \end{bmatrix} \quad (4)$$

(3) 对 $\log LMS$ 空间进行正交化处理,从而变换到 $l\alpha\beta$ 空间。

$$\begin{bmatrix} l \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{3} & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{6} & 0 \\ 0 & 0 & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} \quad (5)$$

可以看出,从 RGB 空间变换到 $l\alpha\beta$ 空间需要用到对数运算,其逆变换需要用到指数运算。由于目前的 DSP 和 FPGA 内均没有集成对数运算器和指数运算器,对数运算和指数运算都需要用循环乘法嵌套逼近的方式实现,限制了该算法在实时系统中的应用。然而图像的灰度值范围是固定的,所以图像灰度值的对数和指数运算可以采用查找表的方式来实现。

由于 RGB 空间中 R 、 G 、 B 三个通道均为 256 灰度级, 因此从 RGB 空间到 $l\alpha\beta$ 空间的变换为 $256 \times 256 \times 256$ 种组合, 因此, 可以将从 RGB 空间到 $l\alpha\beta$ 空间的变换做成查找表。这样就可以通过查表, 根据 RGB 的实际值直接获得 $l\alpha\beta$ 空间的值, 从而避免了复杂的对数与指数运算。在图像融合的实际应用中, 通常为红外与微光/可见光图像的双通道融合, 因此, 只要将如公式(1)所示的映射方式确定以后, 实际从 RGB 空间到 $l\alpha\beta$ 空间的变换组合只有 256×256 种, 可以进一步精简查找表。由于 0 的对数不存在, 因此不需要对 IR 和 LL 为 0 时进行 $l\alpha\beta$ 空间变换。图 1 给出了 IR/LL 、 RGB 与 $l\alpha\beta$ 空间的映射关系。

IR	1	1	.....	255	255
LL	1	2	.....	254	255
R	1	1	.....	255	255
G	1	2		254	255
B	1	2		254	255
l	-0.000 1	0.438 4	.....	4.167 3	4.167 9
α	0.000 1	0.050 8		0.000 8	0.001 1
β	0.000 0	-0.033 0		0.000 1	0.000 3

图 1 IR/LL 、 RGB 与 $l\alpha\beta$ 空间的映射关系

Fig.1 Mapping between the IR/LL 、 RGB and $l\alpha\beta$ space

2 系统构成

系统以基于查找表的色彩传递算法为基础, 设计了相应的图像融合电路, 研制了红外热像仪/微光电视/CCD 融合成像系统。系统主要由摄像转台与电控盒两部分组成, 其摄像转台的实物如图 2 所示。摄

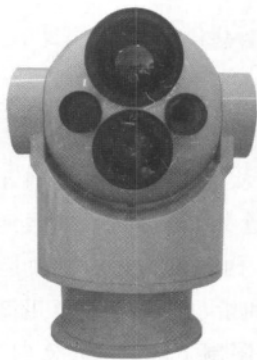


图 2 摄像转台

Fig.2 Camera turret

像转台内嵌红外热像仪、微光电视、CCD、激光测距机。热像仪为 VOx 非制冷长波红外焦平面阵列, 其热响应灵敏度 $>4 \text{ mV/K}$, 噪声等效温差 (NETD) $<100 \text{ mK}$ 。微光电视为国产 XX2050 型微光像增强器耦合 1/2 英寸黑白 CCD, 灵敏度为 $600 \mu\text{A/lm}$, 像素数为 752×582 。CCD 选用 WAT-525Ex 型黑白摄像头。激光测距机采用单次脉冲激光器, 工作波长为 $1.06 \mu\text{m}$, 测距能力可达到 10 km。

光机结构是融合成像系统的重要组成部分, 对后续的图像配准和激光目标定位具有影响。图像融合必须是视场中重合部分的融合, 因此光机结构中成像设备之间必须满足两个基本要求: (a) 必须具有几乎相同的视场; (b) 光轴必须高度平行。相同的视场可以根据成像设备的像面大小选择相同比例的焦距实现。该系统的大视场为 $8 \times 6^\circ$, 小视场为 $4 \times 3^\circ$, 因此可以根据焦平面阵列的像面计算出红外镜头的长焦距和短焦距分别约为 180 mm 和 90 mm。成像设备的光轴一致性需要由光学调校和机械调校两方面来保证。光学调校要确保长焦和短焦成像具有精确的光轴一致性; 机械调校通过精确的机械设计和合适的调节机构确保不同成像设备之间的光轴平行度。

2.1 系统的工作模式

红外热像仪与 CCD 组合工作于白天, 与微光电视组合工作于夜晚, 实现全天时的融合成像。摄像转台内部安装了伺服电机, 可以俯仰和水平转动。电控盒中包含图像预处理电路、图像融合电路和伺服控制电路。系统可以通过人机软件进行远程操控, 主要进行探测器控制、信号处理控制和伺服控制。探测器控制包括前端探测器的开关、工作状态的返回、大小视场的切换等; 信号处理控制主要进行信号处理参数的配置、工作模式切换等; 伺服控制接收上位机指令, 控制电机驱动转台水平和俯仰转动。转台内部嵌有光照度敏感元件, 可自动识别是白天还是夜晚, 自动切换微光电视和 CCD。

图像处理单元是系统的核心部分, 主要由 FPGA、DSP、视频 A/D、视频 D/A、串口等组成, 其中 FPGA 承担红外图像的增强、微光/CCD 图像的配准和同步信号生成功能, DSP 承担图像融合和视频合成功能。系统的工作流程如图 3 所示。在系统工作状

态, 转台内的红外视频输入到视频 A/D, 经视频采集后送往 FPGA 进行自适应图像增强处理; 微光/CCD 视频以红外图像为基准, 进行配准处理。经过配准后的红外和微光/CCD 图像进行图像融合, 融合后的数字视频经视频合成后输出。经过自适应图像增强的红外图像和经过配准的微光图像均以数字信号的形式直接输出到图像融合电路, 避免了模拟信号易受干扰的问题。

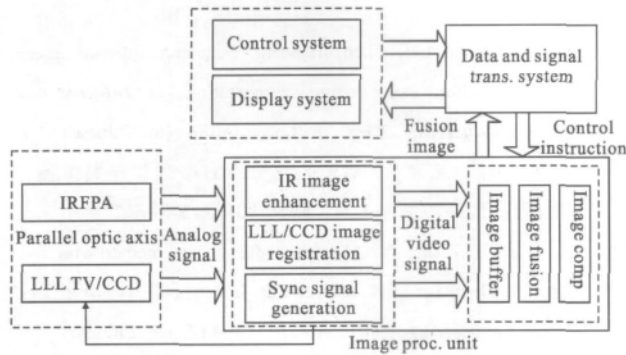


图 3 系统的工作流程

Fig.3 Diagram of system's workflow

2.2 图像增强、配准与视频同步信号生成

FPGA 芯片 EP3C55 完成红外图像的增强、微光/CCD 图像的配准和同步信号生成功能。视频数字化采用 ITU 标准制式 BT.656, 与未来数字式成像设备保持了兼容性。在 FPGA 内部将通过提取 BT656 格式头的方式提取出红外图像的行场信号, 并反馈给微光电视/CCD 进行强制同步, 确保微光电视/CCD 与红外热像仪具有完全相同的帧频。红外图像增强采用线性拉伸的方式, 以满足后续图像融合的需要。经过数字化后的微光/CCD 视频图像以乒乓方式存储到帧存储器 SDRAM 中, 并以简单算术运算实现配准。如果光机结构保证了各成像设备的行与列保持分别平行, 则对于基准图像中的像素点 (x, y) , 待配准图像中的对应像素点为 $(a_{11}x+b_1, a_{22}y+b_2)$ ^[12]。在系统中, 以红外图像为基准, 对微光/CCD 图像逐像素对准, 确定图像间对应点的匹配关系。

2.3 图像融合与视频输出

图像融合与视频输出是通过 TMS320DM642 完成的。DM642 的视频接口 VP1 和 VP2 配置为视频输入, VP0 配置为视频输出, 与视频 DA 芯片 SAF7129 相连。DM642 的视频输入输出接口驱程在 TI 的 RF5

框架下设计, 而融合程序设计采用了 DSP/BIOS 多任务实时操作系统, 任务之间的通讯通过同步通讯 SCOM 模块实现。软件包含视频采集、融合处理和视频输出 3 个任务。视频采集将采集到的新一帧数据通过 EDMA 搬运到 SDRAM 中的处理缓冲区中, 用于后续处理。视频输出将处理后的数据通过 EDMA 搬运到输出缓冲区, 最终通过 EDMA 将数据送到视频端口的输出 FIFO 缓冲区, 然后发送到 SAF7129, 经过视频编码后输出模拟视频。DSP 中的软件流程如图 4 所示。

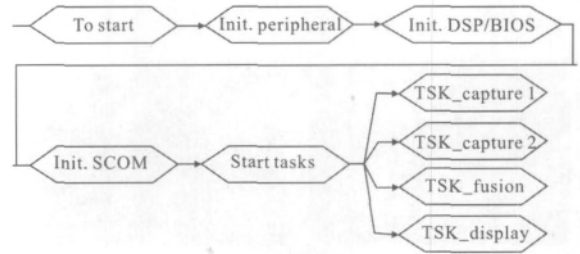


图 4 DM642 程序流程

Fig.4 DM642's program flow diagram

红外、微光/CCD 图像与 $l\alpha\beta$ 空间之间的灰度映射表存储在 SDRAM 中, 系统不必存储整幅参考图像, 只需存储参考图像的 $l\alpha\beta$ 均值和标准差。为了满足不同场景融合图像的要求, 存储一系列典型场景图像的特征参数供观察者选择。系统程序经过结构优化和 DM642 开发环境 CCS 的代码优化后, 可充分发挥 DSP 并行运算和流水线结构的性能, 获得了尽可能高的运行效率, 确保了融合算法的实时处理。

3 实验结果

为了测试所研制的融合成像系统的性能, 文中对其进行了实验测试, 其结果如图 5 所示。实验场景包含树木、草地、电力控制柜、躲在暗处的人和水泥路面, 实验时间为 2011 年 3 月 10 日凌晨 1 点, 下有小雨, 照度约为 10^{-1} lux, 实验场景距离融合成像系统约 110m。由图 5(a)可知, 红外图像对热目标非常敏感, 可以很明显地辨认出电力控制柜前面的人, 但存在雾的感觉, 细节分辨能力不强。树木和草地比较潮湿, 温差小, 近处的树木和草地已经不能分辨。图 5(b)是对比度增强后的效果, 尽管细节分辨力仍然不高, 但对对比度明显改善。从图 5(c)可知, 微光电视图像具有较强的层次感, 树、草地和变压箱的细节较清晰,

可分辨出树枝、草和变压箱上的条纹;但由于背光,在微光电视图像中分辨不出电力控制柜前面的人。图 5(d)为经过配准后的微光图像。此时微光图像已经与红外图像精确配准。图 5(e)是用于色彩传递的参考图像。图 5(f)是利用色彩传递得到的实时彩色融合图像。可以看出,融合图像兼具有红外和微光的特点,例如近处的草地,树木的枝叶等为微光电视图像反映的信息;而变压箱前的人反映了红外图像的特征。融合图像色彩也比较自然,整幅图像具有与参考图像类似的色调,而人的色彩为亮色,观察者可以很容易分辨出不同的目标。

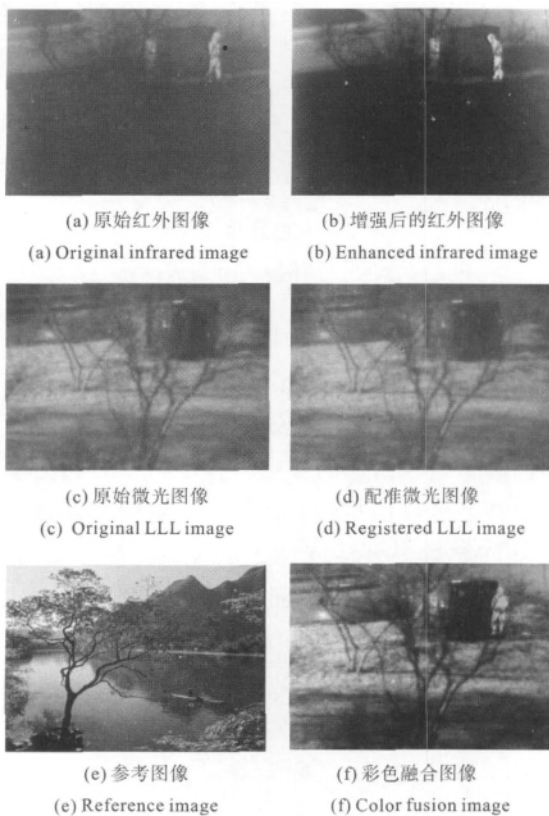


图 5 微光与红外融合实验结果

Fig.5 Experiment result of LLL and infrared image fusion

4 结论

文中以 $l\alpha\beta$ 空间的色彩传递图像融合算法为基础,提出了基于查找表的硬件实现方法,通过 FPGA 和 DSP 相互配合实现了视频图像的实时融合。研制了一种全天时工作的远距离红外热像仪/微光电视/CCD 融合成像系统。测试结果表明,该系统能够获

得近似自然色的图像融合效果,能够有效地提取和综合各自特征信息,增强和突出目标,能提高目标的发现和识别概率。系统双视场工作,满足了大视场搜索、小视场跟踪的需要;增加了激光测距功能,满足了距离估算的需要。然而,该系统仍然属于原理样机,其气密性、散热、冲击和振动等特性还没有进行充分的测试和验证,这是需要进一步完善的工作。

参考文献:

- [1] Liu Kun, Guo Lei, Chen Jingsong. Sequence infrared image fusion algorithm using region segmentation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 553-557. (in Chinese)
刘坤, 郭雷, 陈敬松. 基于区域分割的序列红外图像融合算法[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(3): 553-557.
- [2] Bai Lianfa, Zhang Yi. Analysis and fusion methods on low light level image and ultra-violet image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 113-117. (in Chinese)
柏连发, 张毅. 微光图像和紫外图像分析与融合方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(1): 113-117.
- [3] Jin Weiqi, Wang Lingxue, Zhao Yuanmeng. Developments of image processing algorithms for color night vision [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 147-150. (in Chinese)
金伟其, 王岭雪, 赵源萌. 彩色夜视成像处理算法的新进展[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(1): 147-150.
- [4] Waxman A M. Solid-state color night vision: fusion of lowlight visible and thermal infrared imagery [J]. *MIT Lincoln Laboratory Journal*, 1999, 11(1): 41-60.
- [5] Toet A. Natural color mapping for multiband night vision imagery[J]. *Information Fusion*, 2003, 4(1): 155-166.
- [6] Tsagaris V, Anastassopoulos V. Fusion of visible and infrared imagery for night color vision [J]. *Displays*, 2005, 26(2): 191-196.
- [7] Zhang Junju, Han Yiyong, Chang Benkang. Real-time color image fusion for infrared and low-light-level cameras [C]// SPIE, 2009, 7383: 3B1-3B7.
- [8] Zhang Junju, Han Yiyong, Chang Benkang, et al. Region-based Image Fusion for Infrared and LLL Images [M]. Buckinghamshire: Image Fusion, Intech Press, 2011.
- [9] 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.