

文章编号 1004-924X(2010)07-1684-07

# 红外双波段图像实时融合系统

曲 锋<sup>1,2</sup>, 刘 英<sup>1,2</sup>, 王 健<sup>1</sup>, 董科研<sup>3</sup>, 刘建卓<sup>1,2</sup>, 郭帮辉<sup>1</sup>, 孙 强<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 长春理工大学, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 选用高性能定点数字信号处理器 DM642 作融合系统核心处理器, S3C2410 作辅助控制处理器, 利用 DM642 的高速图像处理性能及它的视频编/解码单元无缝连接的灵活可配置视频端口, 结合 S3C2410 强大的控制能力, 研制了探测中波红外和长波红外的双波段图像实时融合系统。将一种基于离散小波变换的图像融合算法应用于红外双波段图像的融合, 针对实时嵌入式系统的特点, 对算法进行了优化, 并将其移植在以 DSP+ARM 架构的嵌入式平台上。实验结果表明, 该融合算法经仿真优化后, 只需 39.6 ms 即可完成两幅大小为 320 pixel×240 pixel 的红外图像的实时融合, 满足 25 frame/s 的工程需求, 且融合后的图像能突出中波和长波红外各自的特点。

**关键词:** 双波段; 实时图像融合; 小波变换; 数字信号处理器

**中图分类号:** TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101807.1684

## Infrared dual-band real-time image fusion system

QU Feng<sup>1,2</sup>, LIU Ying<sup>1,2</sup>, WANG Jian<sup>1</sup>, DONG Ke-yan<sup>1,2</sup>, LIU Jian-zhuo<sup>1,2</sup>, GUO Bang-hui<sup>1</sup>, SUN Qiang<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*

*Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

*2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

*3. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130033, China)*

**Abstract:** By taking a high performance fixed-point DSP DM642 as a kernel processor, and a S3C2410 as a assistant control processor, an IR dual-band real-time image fusion system worked at Mid-wave Infrared (MWIR) and Long-wave Infrared (LWIR) is designed by using the high speed operation of DM642 and its configurable video ports combined with the powerful control capability of the S3C2410. An image fusion algorithm based on Discrete Wavelet Transform (DWT) is applied to the IR dual-band image fusion. Then, the algorithm is optimized to run on a DSP+ARM embedded hardware platform based on the features of real-time embedded system. The experiments demonstrate that it is only 39.6 ms to be needed to complete the real-time fusion of two IR images with the resolution of 320 pixel×240 pixel, which meets the engineering requirements of 25 frame/s. It also demonstrates that ob-

收稿日期: 2009-05-06; 修订日期: 2009-07-23.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2007AA12Z110); 国家自然科学基金资助项目 (No. 60977001); 吉林省科技发展计划杰出青年项目; 省院省校合作基金资助项目

tained images can show the characteristics of MWIR and LWIR, respectively.

**Key words:** dual-band; real-time image fusion; wavelet transform; Digital Signal Processor(DSP)

## 1 引言

图像融合是通过某种融合系统,将两个或多个互补的波段中传感器的有用信息综合成统一图像或综合图像特征以供观察或进一步达到对目标或场景更为精确、全面的识别、分析和判决的图像处理办法。由于单一传感器获取的数据信息量有限,往往难以满足实际需要。随着传感器技术的发展,单一光谱波段的成像模式逐渐发展成为多传感器工作模式,利用各种传感器具有不同的工作波长范围及工作环境来实现不同的功能。因此,将多传感器获得的更多信息合并到一个新的数据集的图像融合技术在20世纪70年代后期被提出并得到广泛应用<sup>[1]</sup>。

图像融合系统的核心任务是图像融合算法的实现,随着融合算法的改进,处理效果也越来越接近理想。然而,大多图像融合算法需要进行大量的数据处理,使得图像融合系统的研制具有相当大的难度。数字信号处理器处理速度的大幅提高和低功耗特性的完善,为实时图像融合的硬件实现提供了可能性<sup>[2-4]</sup>,而且近几年来,作为一种多分辨率的分析方法,小波变换算法具有很好的时-频或空-频局部特性,特别适合按照人类视觉系统特性设计图像处理方案,目前已成为图像融合领域的一种重要工具<sup>[5-6]</sup>。

本文根据实际工程的要求,设计了一套基于

DSP+ARM的低功耗高性能图像融合系统,并优化了基于离散小波变换(DWT)的图像融合算法,使其能在保证图像融合质量的情况下,实时完成两幅大小为320 pixel×240 pixel的中波和长波红外图像的图像融合,满足25 frame/s的工程需求。

## 2 系统工作原理

本设计将中波红外(3~5 μm)和长波红外(8~12 μm)双波段通过2个光学通道同时进行成像,然后将获得的中、长波段的红外图像同时输入到后续控制电路进行图像融合处理,原理如图1所示。

由于多传感器图像的数据量极大,要实现本系统的主要功能,必须对系统进行简化,在区域内完成融合算法,同时还要利用有效的快速算法。采用快速的DSP处理器件是目前图像处理的一个比较流行的用法,但目前国内同类样机中大多采用单纯一片DSP芯片进行算法处理,对于处理完成的结果无法保存或必须借助PC机来完成。为了满足系统的独立性及便携性,本文采用了TI的DaVinci系列芯片TMS320DM642芯片作为系统的核心进行算法处理,利用三星的ARM9核控制芯片S3C2410作为系统控制,这样不仅满足了算法的运算处理,还满足了系统的控制功能,同时提高了系统的集成度。

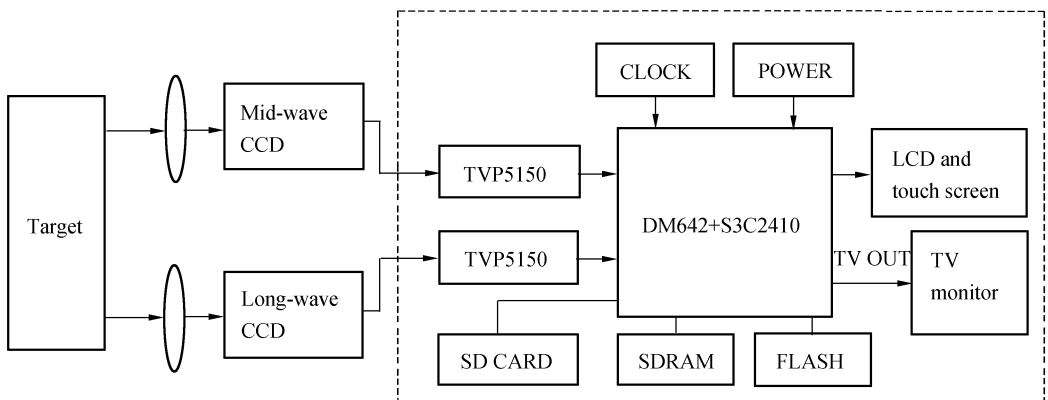


图1 系统结构框图

Fig. 1 Frame of the system

### 3 硬件系统实现

#### 3.1 信号处理系统的设计

红外双波段图像融合实验系统主要由 TMS320DM642 + S3C2410 及其相关外设组成,包括时钟、电源、JTAG 等。为便于携带和控制,系统具有一个 15.13 cm 的分辨率为 640 pixel × 480 pixel 的 LCD 屏及触摸屏,同时系统具有一个 SD 卡和硬盘接口,以方便存储及处理图像。

利用 TMS320DM642 特殊的结构特性,可以配置灵活高效的视频捕捉、回放模式并可以实现高速视频流的转移。因此,该处理器通常被称为视频信号处理器。它具有以下主要特点<sup>[7]</sup>:

- (1) C64X +<sup>TM</sup> DSP 核主频为 600 MHz, DSP 运算速度是 4 800 MIPS;
- (2) DSP 核具有超长指令字技术,采用指令打包技术减小代码容量;
- (3) 具有一个 16 kbyte 的 L1P 程序缓冲区、一个 16 kbyte 的 L1D 数据缓冲区及一个 256 kbyte 的 L2 缓冲;

(4) 类似于 RISC 的指令集,所有指令均可“条件执行”;

(5) 有 3 个双通道视频口,每个视频口可由软件配置成为输入或输出口,支持 8/10/16/20 bit,具有视频滤波功能和水平缩放功能,能够直接与视频器件无缝连接;

(6) 一个 32 bit/16 bit 的主机接口(HPI)。

S3C2410 是三星公司一款基于 ARM9 的芯片,它一方面在高性能和低功耗特性方面提供最佳的性能;同时又具有非常丰富的片上资源,其特点如下:

- (1) 5 级整数流水线,指令执行效率更高;
- (2) 扩展接口支持 32 bit 256 Mbyte 的 DDR2 SDRAM,支持 128 Mbyte 的 NOR flash 或 NAND flash。
- (3) 具有 MMC/SD 卡接口,IDE 硬盘接口等。

TMS320DM642 是 C6000 系列 DSP 中最高性能的定点 DSP,其计算能力在 720 MHz 下可达 5 760 MIPS。它具有一个 HPI 并行端口,通过 HPI,外部主机可以直接访问除中断选择寄存器和仿真逻辑外的整个 DSP 存储器空间。主机对

接口具有控制权,主机和 DSP 可以通过内部或外部存储器交换信息,主机还可以直接访问存储器映射的外设。HPI 和 DSP 存储空间的内连是通过 DMA 控制器实现的。HPI 接口信号线包括与外部主机连接的单独的 32 根数据线 HD[31:0],2 根访问控制选择信号线 HCNTL[1:0],1 根读写选择信号线 HHWIL,1 根地址选通输入信号线 HAS,1 根读写选择信号线 HR/W,3 根选通信号线 HCS、HDS1、HDS2,1 根准备好信号线 HRDY 及 1 根向主机发送中断的信号线 HINT<sup>[8]</sup>,如图 2 所示。

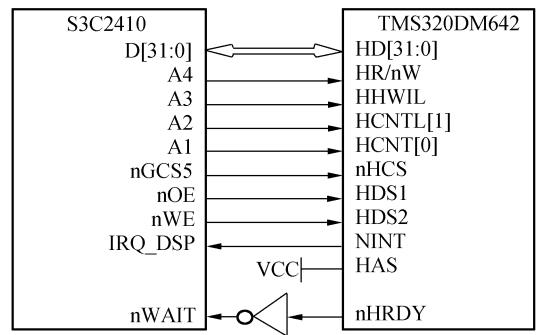


图 2 TMS320DM642 与 S3C2410 的 HPI 连接示意图  
Fig. 2 HPI connect of TMS320DM642 and S3C2410

通过这种方式简化了器件通信方式,满足了系统控制及数据传输需要。

#### 3.2 图像采集及显示存储设计

系统的光学部分包括中波和长波红外两个通道,分别利用制冷型中波探测器和非制冷长波探测器进行成像。探测器信号输出为标准的 PAL 制式信号,因此采用 TVP5150 解码芯片对其解码转化为数字信号提供给 DSP 进行处理,采集进来的数字信号按奇、偶场分别存储,并将存储设计为乒乓结构,使得 DSP 的读取操作可与存储体的写入操作同时进行。单个存储体的读取和写入由地址和数据选择器确定。同样,另一部分存储体存储经 DSP 处理后的图像数据,其存储方式与上述存储体类似。

而 S3C2410 运行 Linux 操作系统,主要用于对触摸屏信号及按键的解码,并通过 HPI 接口对 DM642 进行指令控制操作,满足操作者与系统间的交换控制;同时 S3C2410 还可以通过 HPI 接口将处理后的图像往进行 SD 卡或硬盘存储等操作。

对于 DM642 的 3 个可配置视频口,可取 0、1 口为视频数据采集口,2 口作为 TV 信号输出口,以便于连接监视器或数据采集卡进行其它操作,而通过 HPI 口也可将视频信号送往 S3C2410 的 LCD 控制寄存器以便于用 LCD 进行现场显示。

### 4 融合算法的实现

#### 4.1 融合算法的硬件实现过程和优化策略

融合过程为:通过 DSP 视频口输入由 TVP5150 输入的视频数据,并自动触发 EDMA 事件,将数据存入 SDRAM。每场图像采集完成后触发 DSP 产生中断,从而更新图像存储区,并进行下一场图像采集;一帧图像采集完成后,即进行融合处理。每个通道在存储器中开辟 3 个视频缓冲区存放待处理数据。在融合处理子程序中,每一帧图像分成 8 个宏块,每次使用一个 EDMA 通道从外部 SDRAM 搬运一个宏块数据到片内 L2 缓冲区,与另一个通道的图像宏块进行融合处理。处理这个宏块的同时,EDMA 通道继续搬运下一个宏块的数据,处理完成后,程序可以直接处理下一个宏块数据,同时使用另一个 EDMA 通道把处理结果搬运到外部 SDRAM 中。每块图

像输出完成后发出中断请求,中断服务程序更新图像存储区,继续下一场的图像输出,一帧输出完成后进入下一帧的输出。整个过程周而复始,由于处理系统的频率是 50 Hz,因此,每帧图像处理时间 < 20 ms,可达到实时处理要求。

算法实现采用 C 语言。采用了优化策略:合理安排流水操作和程序分支;使用 const 关键字、restrict 关键字及 intrinsic 函数;用字、双字访问短型数据进行数据存取;用逻辑运算、加/减/乘运算代替除法运算;使用更高级的优化选项;循环展开并改写;用线性汇编改写耗时长 C 代码等。

#### 4.2 小波变换图像融合算法<sup>[6-9]</sup>

与基于 HIS、PCA 等变换的图像融合算法相比,基于小波变换的图像融合算法不仅可以依据图像的特征进行选择合理的基元波和分解级数,而且也能包括满足实际需求的详细信息。然而在利用小波变换处理高通滤波和低通滤波过程中,融合的图像将会丢失边缘信息,以及产生环效应。

因此为了克服上述问题,必须将图像分解成低频和高频部分进行相应处理,低频部分采用平均法,高频部分采用区域能量最大的融合方式,并通过多个指标对融合图像进行评价。其基本流程如图 3 所示。

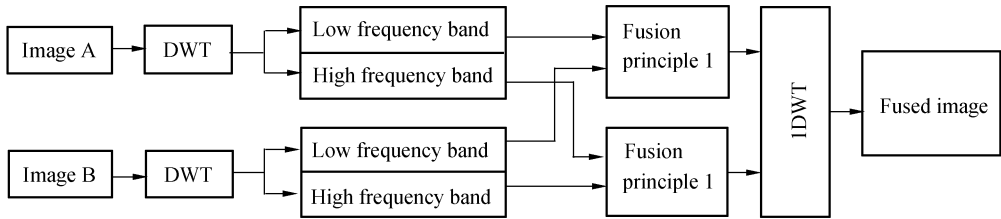


图 3 基于小波分解的图像融合流程图

Fig. 3 Flowchart of fusion algorithm

根据上图可知,图像融合规则主要包括低频和高频两部分的融合规则。对于低频部分,图像的绝大部分能量和信息都在这一区域,结合人体视觉系统特征,其平均法的公式如下:

$$J(B_k) = \frac{1}{N \times N} \sum_{(x,y) \in B_k} \bar{\omega}(m_k) \times \frac{|f(x,y) - m_k|}{m_k} \tag{1}$$

其中:J 为低频平均系数,N × N 代表图像大小,B<sub>k</sub> 代表所选区域,m<sub>k</sub> 为 B<sub>k</sub> 的平均值,f(x,y) 为像素点(x,y)的灰度值,ω̄(m<sub>k</sub>)是由区域平均亮度决定的权重系数,它可以由下式得出:

$$\bar{\omega}(m_k) = \left(\frac{1}{m_k}\right)^a \tag{2}$$

因此,要将两幅图像 A<sub>1</sub> 和 A<sub>2</sub> 进行融合,首先计算相应的平均系数 J(A<sub>1i</sub>) 和 J(A<sub>2i</sub>),然后由下式得出融合后的图像。

$$B_i = \begin{cases} l_1 A_{1k} + l_2 A_{2k} & J(A_{1k}) > J(A_{2k}) \\ l_2 A_{1k} + l_1 A_{2k} & J(A_{1k}) < J(A_{2k}), \\ (A_{1k} + A_{2k})/2 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{3}$$

其中:l<sub>1</sub>, l<sub>2</sub> 是权重值。

对于图像高频部分,它包含了诸如目标边缘等非常重要的信息,常用的高频子带融合规则分

为两类:基于像素的融合规则和基于区域的融合规则。前者只考虑单个小波变换系统的融合,并且要求源图是经过严格对准处理的,具有一定的片面性;而后者在融合过程中还考虑附近的波系数对该小波变换系数的影响,即邻近像素点间小波变换系数的相关性,其融合效果相对要好得多。其高频小波系数计算通常是首先确定窗口尺寸,然后分别计算各高频子带的区域能量;最后根据公式(4)确定融合后的高频子带数据:

$$F^k(x, y) = \begin{cases} A_1^k(x, y), E(A_1) > E(A_2) \\ A_2^k(x, y), \text{otherwise} \end{cases}, \quad (4)$$

式中: $F^k(x, y)$ 表示在点 $(x, y)$ 的融合值; $A_1^k$ 表示图像 $A_1$ 在第 $k$ 个高频子带像素点 $(x, y)$ 的值; $A_2^k$ 表示图像 $A_2$ 在第 $k$ 个高频子带像素点 $(x, y)$ 的值; $k=1, 2, 3$ 分别对应 LH、HL、HH 3 个子带; $E(A_1)$ 和 $E(A_2)$ 表示图像 $A_1, A_2$ 中像素 $(x, y)$ 处窗口大小为 $M \times N$ 的区域能量,计算公式如下:

$$\begin{cases} E(A_1) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [A_1^k(x+i, y+j)]^2 \\ E(A_2) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [A_2^k(x+i, y+j)]^2 \end{cases}. \quad (5)$$

#### 4.3 双波段融合算法的实现及实验结果

(1)将图像 $A_1, A_2$ 多尺度小波分解,得到不同尺度的低频分量和高频分量;

(2)获取低频带小波系数:利用公式(2)和(3),采用平均算子,像素取大或取小的融合方式处理获得;

(3)获取高频带小波系数:利用公式(4)和(5),并取窗口大小为 $3 \times 3$ ;

(4)对得到的高频带和低频带小波系数进行小波逆变换,即可得到融合后的图像。

图4是在设计的硬件平台上,利用优化的基于DWT的图像融合算法,针对中波探测器和长波探测器拍摄的某场景进行处理得出的图样。从3幅图中,可以清晰看到3幅图片的差别,图(a)中位置2的行人、图(b)中位置2的行人及图(c)中位置2的行人;图(a)中位置1的桅杆、图(b)中位置1的桅杆及图(c)中位置1的桅杆出现了不同的变化,通过双波段图像融合后,能够更加清晰准确地获得目标信息,而且保留了图像中的显著特征信息(如边缘、线、区域边界等),这对于现代化战争中隐身与反隐身、伪装与反伪装具有重要的战略意义。

在实验时,利用TI公司的集成开发环境CCS中的RTOS系统测试了融合算法的运行时间,结果达到了39.6 ms,基本满足了实际工程需求。

同时,文中还对得到的结果进行了评价,评价参数包括图像的空间频率(SF)、熵(E)、平均梯度(g)等<sup>[10]</sup>。表1给出的评价结果表明,(此处加评价)融合后的图像要比原图像信息量丰富,同时图像也更加清晰,优化后的小波融合比拉普拉斯金字塔融合算法的效果稍差,但却在保证图像融合质量满足需要的条件下,满足了实时性的要求。



(a) 中波红外图像  
(a) Mid-wave IR image



(b) 长波红外图像  
(b) Long-wave IR image



(c) 本文算法的融合图像  
(c) Fusion image by proposed algorithm

图4 图像处理实验结果

Fig. 4 Results of image processed

表 1 图像融合结果评价

Tab.1 Evaluation of image fusion performance

图像	空间频率	熵	平均梯度	运算时间/ms
中波红外图像	23.915 8	7.651 7	19.756 4	—
长波红外图像	21.318 8	7.063 2	13.898 2	—
拉普拉斯金字塔融合图像	29.358 9	8.001 5	25.520 1	125.32
本文算法融合图像	26.865 5	7.694 1	21.233 9	39.6

## 5 结 论

本文根据实际工程需要,提出了红外双波段融合的方法,并介绍了系统硬件电路结构,最后重点研究图像融合的小波算法,并给出系统实验处理结果。设计和实验结果表明,在系统硬件平台上,对图像融合算法进行软件优化和手工优化结合的方式,使算法时间满足了 25 frame/s 的实际工程需求。

系统采用了 DSP+ARM 的电路结构,并采用了操作系统加图像处理算法结合的方式,具有可扩展性,软件开发高效,移植方便等优点。因为采用了 Linux 嵌入式操作系统,使该系统可完全独立于 PC 机而进行独立操作,具有便携的特点,同时还可以通过存储介质(如 SD 卡)保存图像,便于后续的处理。

目前该系统已成功应用于“基于谐衍射元件的红外双波段热像仪”上,系统运行稳定。

## 参考文献:

- [1] 郭雷,李晖晖,鲍永生. 图像融合[M]. 北京:电子工业出版社,2008:1-2.  
GUO L, LI H H, BAO Y SH. *Image Fusion*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008:1-2. (in Chinese)
- [2] 陈书汉,庞其昌,靳贵平,等. 一种双波段图像实时融合实验系统[J]. 光学技术,2006,32(2):277-279.  
CHEN SH H, PANG Q CH, JIN G P, *et al.*. An experimental system for real-time two-channel image fusion[J]. *Optical Technique*, 2006, 32(2): 277-279. (in Chinese)
- [3] 许廷发,秦庆旺,倪国强. 基于 DM642 融合系统的 A Trou 小波实时图像融合算法[J]. 光学精密工程,2008,16(10):2045-2050.  
XU T F, QIN Q W, NI G Q. A Trou wavelet real-time image fusion algorithm based on DM642 fusion sysytem[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10):2045-2050. (in Chinese)
- [4] 陈升来,黄康卿,郭静寰. 基于整型提升小波变换的图像处理及 DSP 实现[J]. 光学精密工程,2006,14(3):498-502.  
CHEN SH L, HUANG L Q, GUO J H. Image processing based on integral lifting scheme and its implementation by DSP [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3):498-502. (in Chinese)
- [5] 楚恒,朱维乐. 基于 DCT 变换的图像融合方法研究[J]. 光学精密工程,2006,14(2):266-273.  
CHU H, ZHU W. Image fusion algorithms using discrete cosine transform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(2):266-273. (in Chinese)
- [6] 戴光智,陈铁群,薛家祥,等. 小波图像融合改善超声图像分辨率[J]. 光学精密工程,2008,16(11):2290-2295.  
DAI G ZH, CHEN T Q, XUE J X, *et al.*. Improvement of resolution for ultrasonic image based on wavelet image fusion[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(11):2290-2295. (in Chinese)
- [7] TEXAS INSTRUMENTS. TMS320DM642 Video/Imaging Fixed-Point Digital Signal Processor(Rev. 1)[DB/OL]. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tms320dm642.pdf>, 2002.
- [8] 王健,陈启美,陈章德. 基于 DSP 和 ARM 的嵌入式多媒体通信终端的设计与实现[J]. 电子测量技术,2006,29(2):56-57.  
WANG J, CHEN Q M, CHEN ZH D. Design and implementation of embedded multimedia terminal based on DSP and ARM[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2006,29(2):56-57. (in Chinese)
- [9] LIN Q W, FENG G. A novel image fusion alrorthm based on wavelet transforms[J]. *SPIE*,2008, 7001:70010M-1-70010M-8.

[10] 李光鑫. 基于小波变换的像素级图像融合算法的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2004.

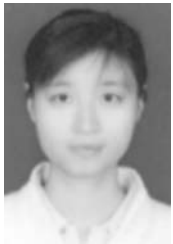
LI G X. *Pixel-level image fusion algorithms with*

*wavelet transform*[D]. Changchun: Jilin University, 2004. (in Chinese)

#### 作者简介:



**曲 锋**(1984—),男,山东泰安人,博士研究生,主要研究方向为数字图像处理、电路硬件设计等。E-mail: ciompqf@sohu.com.



**刘 英**(1980—),女,山东滨州人,博士研究生,2005年于山东师范大学获得学士学位,主要从事红外光学方面的研究。E-mail: liuy613@163.com.



**王 健**(1980—),男,吉林辉南人,博士研究生,2005年于南开大学获得硕士学位,主要从事红外光学方面的研究。E-mail: mrwangj@hotmail.com



**董科研**(1980—),男,吉林梅河口人,博士,2009年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事红外光学方面的研究。E-mail: dongky@163.com.



**刘建卓**(1983—),男,吉林乾安人,博士研究生,2005年于吉林大学获得学士学位,主要从事数字图像处理、软件设计等方面的研究。E-mail: ljz0220@email.jlu.edu.cn.



**郭帮辉**(1983—),男,湖北鄂州人,研究实习员,2008年于华中科技大学获得硕士学位,主要从事红外光学方面的研究。E-mail: gbhyxl@163.com.

#### 导师简介:



**孙 强**(1971—),男,黑龙江海伦人,研究员,博士生导师,2003年于南开大学获得博士学位,2006年于中科院长春光学精密机械与物理研究所博士后出站,主要从事现代红外光学仪器方面的研究。E-mail: sunq@ciomp.an.cn.

(本栏目编辑:白雨虹)