

基于FPGA的红外和CCD图像融合研究及实现

闫光豹 李开宇 杨盛正

(南京航空航天大学自动化学院 南京 210016)

摘要: 为了能够同时显示多个传感器的信息,需要对红外传感器和 CCD 传感器获得的图像信息进行融合。通过对红外图像的插值放大、彩色编码运算,使得红外图像的分辨率和 CCD 图像的分辨率保持一致,并得到红外彩色图像。为了实现 2 幅彩色图像的融合,采用颜色空间变换的方法将颜色信息和亮度信息分离开来,采用不同的融合策略对各通道图像信息进行融合,并在 FPGA 内实现了图像的融合算法。最终设计出了一套基于 FPGA 的实时图像融合系统。

关键词: 红外;电荷耦合元件;图像融合;现场可编程门阵列

中图分类号: TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Infrared and CCD image fusion research and implementation based on FPGA

Yan Guangbao Li Kaiyu Yang Shengya

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to simultaneously display information from multiple sensors, we need to fuse the image information that is acquired from infrared sensors and CCD sensor. This article make the resolution of infrared image is consistent with the resolution of the CCD image after the infrared image interpolation amplification, and get the infrared color images by using colour coding arithmetic. In order to realize the 2 pair of color image fusion, we adopt the method of color space transformation which can split color and brightness information and use different fusion strategies for each channel to fuse the image information, and realize the image fusion algorithm in FPGA. Finally, we design a set of real-time image fusion system based on FPGA.

Keywords: infrared; CCD; image fusion; FPGA

1 引言

随着传感器技术的发展,很多现代成像和监控系统中都含有多个图像传感器^[1]。但是往往这些系统只能单独显示单个图像传感器的信息,这样不仅占用了系统的空间,也不利于观察者对目标的监测^[2]。目前图像研究的热点之一就是基于多传感器的图像融合^[3-5]。它能够综合考虑多传感器的图像之间的互补和冗余信息,达到对目标的更为精确的检测与识别^[6]。

和灰度图像相比,人眼对彩色图像的敏感程度更高。因为彩色图像能够给观察者带来更好的反应速度,也增强了对场景的印象^[7]。而日常生活中接触比较多的就是 CCD 图像和红外图像,CCD 图像的优点在于分辨率高,信息量大。红外图像的优点在于可显示温度信息。因此,CCD 和红外图像融合将兼顾各自的优点,在 1 幅图像上包含更多的信息。

提出的算法就是在 FPGA 上实现红外彩色图像和 CCD 彩色图像的融合。实验结果表明,该算法较好的实现了 2 种图像的融合,融合效果达到了预期要求。

2 系统总体机构设计

本系统的内容包含图像采集、红外图像插值放大、彩虹编码、图像融合 4 个部分。系统结构如图 1 所示。

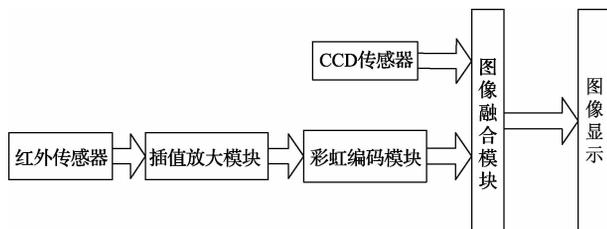


图 1 系统结构

图中,红外传感器读取到的为灰度信息,需要进一步的处理,CCD传感器读取到的就是彩色图像信息,可以直接参与图像融合。红外图像经插值放大模块将图像放大和 CCD 图像大小相同。而后彩虹编码模块将红外图像转为彩色图像,送至图像融合模块。图像融合模块在 FPGA 内实现,因为 FPGA 具有并行处理,运行速度快等优点,并且非常适合实时处理。最后 FPGA 将融合后的彩色图像送至显示屏进行显示。

3 算法实现

3.1 插值放大算法

红外传感器总体上可分为焦平面式和阵列式两种类型。其中,焦平面式分辨率高,价格昂贵,阵列式分辨率低,价格低廉。综合考虑成本和课题目标,本课题采用的是阵列式红外传感器,型号为 MLX90620,分辨率 16×4 ,而 CCD 图像分辨率为 320×240 ,因此课题采用 3 个红外传感器,组成 16×12 红外图像,并对红外图像进行 20 倍放大,完成和 CCD 图像的匹配。由于目前红外传感器的限制,该实验中的结果均为单个红外传感器的计算结果。

常用的图像插值放大算法有最近邻域插值法和双线性插值法。最近邻插值法算法简单,计算量小,但放大后的图像容易出现锯齿现象,双线性插值法效果比较好,计算量适中^[8]。但是由于本课题中红外传感器分辨率较小,如果只采用双线性插值算法,则图像将会出现较大的锯齿现象。因此课题采用最近邻域插值法和双线性插值法相结合的方法实现图像放大。

对于每一个原红外像素点而言,放大后他们都处于中间位置,算法实现采用的是原像素点左、上方分别插入 9 个像素点,右、下方插入 10 个像素点,这样就完成了图像的 20 倍放大。对于图像边缘的像素点,新增加的插值点都采用最近邻插值法,插值点的数值直接取原像素点的数值。对于图像内部的像素点,采用双线性插值法插值。

如图 2 所示, f_{00} 、 f_{01} 、 f_{10} 、 f_{11} 为原红外图像像素点, f_{x_0} 和 f_{y_0} 为插值点,考虑到 FPGA 的性能,双线性插值的系数采用对差值移位的方法获得,下面用 f_{x_0} 的插值过程来说明:

1) 计算像素点差值 $A = |f_{00} - f_{10}|$ 。

2) 通过并行移位求出 $a_2^k = \frac{2^k}{2^4} * A$ ($k = 0, 1, \dots, 4$), 通过对 A 右移 $4 - k$ 位得到 a_2^k 。

3) 通过对已求出的 a_2^k 进行并行加减, 求出其他的系数 a_i , $a_3 = a_1 + a_2$, $a_5 = a_1 + a_4 \dots$ 得到其他的 a_i 。

4) 通过得到的 a_i 计算插值点 f_{x_0} 的灰度值。

5) 多余的 2 个插值点采用周边点灰度值, 均匀分布在插值点内部。

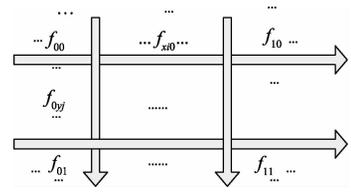
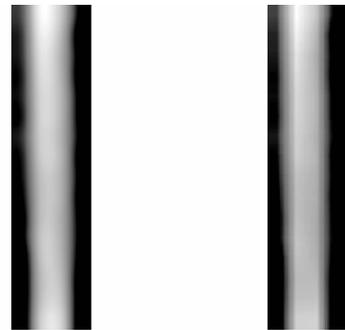


图 2 改进插值算法

基于 FPGA 实现的红外图像改进插值算法效果如图 3 (a) 所示, 图 3 (b) 为原红外图像在 MATLAB 实现的双线性插值, 从结果可以看出, MATLAB 上实现的插值算法更为平滑, 而 FPGA 上实现由于精度的限制, 图像的变化比较明显, 改进算法完成了红外的图像放大功能。



(a) MATLAB 插值

(b) FPGA 插值

图 3 插值算法结果

3.2 彩虹编码算法

彩虹编码是对灰度图像进行伪彩色变换, 将单色图映射为彩色图像。而最常用的颜色空间就是 RGB 色彩空间, 传统的伪彩色变换就是将灰度图像转换为 RGB 彩色图像。文献[9]中提出了一种适用于红外图像的伪彩色变换算法, 效果比较好, 但是其计算过程较复杂, 不利于 FPGA 硬件实现, 而且映射后的图像温度最高处为白色, 与本课题目标不符合, 因此需要对算法进行一定的修改后使用。

图 4 为改进后的彩虹编码变换曲线, k_0 、 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 为灰度范围, R、G、B 为 RGB 彩色空间各个通道, 由图 4 可知, 原灰度红外图像的灰度区域可分为 4 个部分, 分别对应伪彩色变换后的彩色图像, 即: 低温物体 $k_0 \sim k_1$ (蓝色), 中低温物体 $k_1 \sim k_2$ (绿色), 中温物体 $k_2 \sim k_3$ (黄色) 和高温物体 $k_3 \sim k_4$ (红色)。

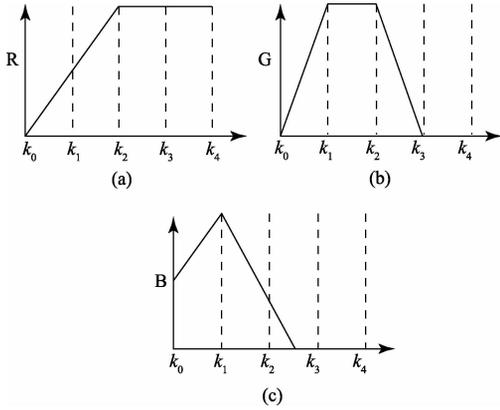


图4 改进彩虹编码变换曲线

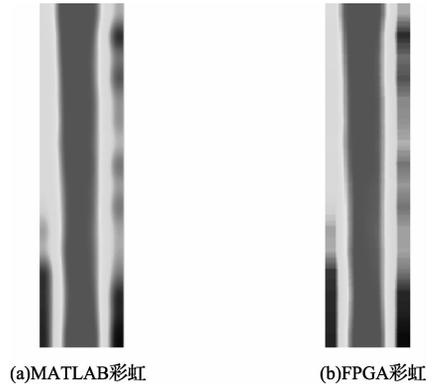


图5 彩虹编码算法结果

算法的变换函数如下:

$$R(x,y) = \begin{cases} \frac{f(x) - k_0}{k_2 - k_0} & k_0 \leq f < k_2 \\ 1 & k_2 \leq f \end{cases} \quad (1)$$

$$G(x,y) = \begin{cases} \frac{f(x) - k_0}{k_1 - k_0} & k_0 \leq f < k_1 \\ 1 & k_1 \leq f < k_2 \\ \frac{k_3 - f(x)}{k_3 - k_2} & k_2 \leq f < k_3 \\ 0 & k_3 \leq f \leq k_4 \end{cases} \quad (2)$$

$$B(x,y) = \begin{cases} \frac{f(x) - k_0}{k_1 - k_0} + 0.5 & k_0 \leq f < k_1 \\ \frac{(k_3 + k_2)/2 - f(x)}{(k_3 + k_2)/2 - k_1} & k_1 \leq f < (k_2 + k_3)/2 \\ 0 & (k_2 + k_3)/2 \leq f \leq k_4 \end{cases} \quad (3)$$

算法中最重要的就是如何选取 k_0, k_1, k_2, k_3, k_4 , 采用平均值的方法计算, 算法具体计算步骤如下:

- 1) 通过比较得到灰度图像灰度值的最大值 \max 和最小值 \min , 使 $k_0 = \min, k_4 = \max$.
- 2) 计算所有灰度点的平均值, 即 k_2 ;
- 3) 采用平均值方法计算 $k_1, k_3, k_1 = (k_0 + k_2)/2, k_3 = (k_2 + k_4)/2$.
- 4) 根据改进的彩虹编码进行计算, FPGA 计算时采用 16 位定点小数计算, 提高算法精度。

图 5(a) 为 MATLAB 彩虹编码算法结果, 图 5(b) 为 FPGA 彩虹编码算法结果。和 MATLAB 实现效果对比可以看出 FPGA 算法较好的实现了彩虹编码效果, 实现了灰度图像到彩色图像的转换。

3.3 图像融合算法

由于 RGB 色彩空间颜色信息和亮度信息混合在一起, 因此 CCD 图像和红外图像融合有很多困难。而在 YUV 空间中 Y 为亮度信号, U、V 为色彩信号, 亮度信号和色彩信号是分离的, 所以对于 Y 信号分量和 U、V 信号分量可以采用不同的融合方法进行融合, 对于 Y 信号分量采用基于拉普拉斯金字塔融合算法, 而色彩信号分量则采用加权融合的方法, 然后将融合后的图像再转为 RGB 彩色图像, 完成整个 2 幅彩色图像的融合。

图像融合的具体方法如下:

- 1) 对 2 幅彩色图像进行颜色空间变换, 将图像从 RGB 图像转为 YUV 图像。

RGB 空间转换到 YUV 空间的式(4)^[10]:

$$\begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.1471 & -0.2888 & 0.4359 \\ 0.6148 & -0.5148 & -0.100 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (4)$$

使用式(4)进行色彩空间变换时, 均采用定点小数运算和移位操作, 确保运算结果的精度。

- 2) 2 幅 YUV 图像 Y 通道进行 Laplace 金字塔融合。

Laplace 金字塔融合是多分辨率塔形分解的一种, 它的基础就是高斯塔形分解, 分解后的每一层图像都是前一层图像的高斯低通滤波结果, 每一层的塔形分解可以表示为:

$$G_l(i,j) = \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 w(m,n) G_{l-1}(2i+m, 2j+n) \quad (5)$$

式中: $l = 1, \dots, N, G_0$ 为原图像, GN 为高斯分解顶层, m, n 为高斯模板行列数, w 为滤波系数, 考虑到算法复杂

度和硬件实现,采用 3 层金字塔分解,高斯滤波器采用 3×3 模板,模板系数 W_3 为:

$$W_3 = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

FPGA 实现高斯分解的流程图如图 6 所示。

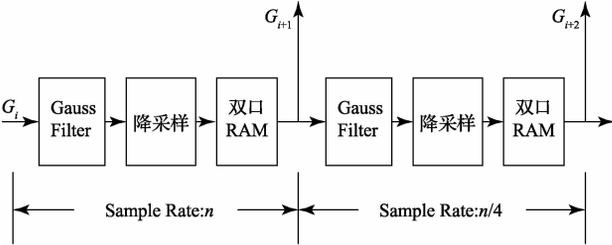


图 6 FPGA 实现高斯分解

高斯分解后的图像可以通过插值和上采样后得到和上一层次大小相同的图像,二者之差即为 Laplace 层图像。计算方式可表示为:

$$L_k = G_k - Expand(G_{k+1}) \quad (7)$$

式中: $Expand(G_{k+1})$ 是 G_{k+1} 层的重构图像,各 Laplace 层图像再进行重构形成最终的图像。FPGA 实现 Laplace 金字塔融合算法的框图如图 7 所示。

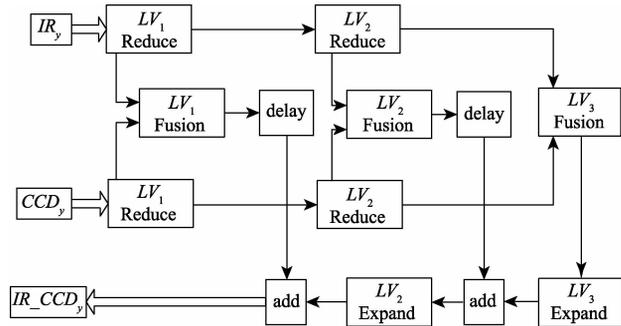


图 7 FPGA 实现 Laplace 金字塔融合算法

图中, IR_y, CCD_y, IR_CCD_y 分别表示红外图像、CCD 图像、融合图像的 Y 通道数据, Reduce、Fusion、Expand 分别表示高斯分解、融合、重构等模块, delay 和 add 表示数据延时和信息叠过程。由于 LV_1, LV_2, LV_3 层的信息分量不同,所采取的融合方法不同,对于 LV_3 ,由于该层包含的都为低频信息,因此采用加权平均的融合策略,计算方式可表示为:

$$L_{F3} = (L_{CCD3} + L_{IR3})/2 \quad (8)$$

式中: L_{F3} 表示第 3 层的 Laplace 融合图像, L_{CCD3} 与 L_{IR3} 分别是可见光和红外图像的第 3 层 Laplace 图像。而对于 LV_1, LV_2 层包含的主要为高频信息,融合方法采用或运算,即绝对值取大运算,数学表达式为:

$$L_{Fi} = \begin{cases} L_{IRi} & |L_{IRi}| \geq |L_{CCDi}| \\ L_{CCDi} & |L_{IRi}| < |L_{CCDi}| \end{cases} \quad (9)$$

式中: $i = 1$ 或 2 。

红外图像和 CCD 图像 U, V 通道采用加权平均方法,得到融合图像的 U, V 通道数据,此时便得到了融合图像的 YUV 图像。

3)将融合后的 YUV 图像转换回 RGB 图像, YUV 空间转换到 RGB 空间的公式为:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1.13983 \\ 1 & -0.39465 & -0.58060 \\ 1 & 2.03211 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix} \quad (10)$$

4 实验结果

整个算法的实验结果如图 8 所示。

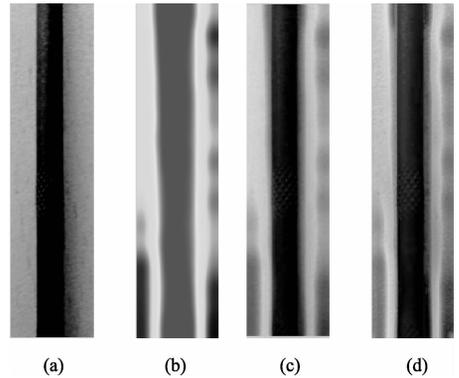


图 8 融合算法实验结果

图 8(a)为 CCD 图像,图 8(b)为红外彩色图像,图 8(c)为加权平均法融合图像,图 8(d)为 Laplace 融合图像。从实验结果可以看出,加权平均法融合图像虽然简单,但是由于采用加权平均,降低了图像对比度,图像的边缘、轮廓变得模糊,而本文研究的 Laplace 融合算法不仅保留了原有 CCD 和红外的图像信息,图像对比度也较好,融合效果要优于加权平均算法。

5 结 论

提出了一种基于 Laplace 金字塔融合的彩色图像融合方法,首先对红外图像进行插值放大,再进行伪彩色变换得到红外彩色图像。之后通过色彩空间的转换将颜色信息和亮度信息分离并分别进行融合,得到了包含更多信息的融合图像。实验结果表明算法实现的效果和传统的加权平均法相比,图像融合效果更佳,有利于目标的识别。针对本文提出的算法,设计了基于 FPGA 的硬件平台,并在此硬件平台上实现了图像的融合算法,因此具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] YUAN Y, XU H, MIAO Z, et al. Real-time infrared and visible image fusion system and fusion image evaluation[C]. 2012 Symposium on Photonics and Optoelectronics (SOPO). IEEE, 2012: 1-4.
- [2] 孙明超. 可见光与红外侦察图像融合技术研究[D].

- 长春:中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所),2012.
- [3] 许良凤,林辉,胡敏. 基于差分进化算法的多模态医学图像融合[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(2): 110-114.
- [4] BARTYS M, PUTZ B, ANTONIEWICZ A, et al. Real-time single FPGA-based multimodal image fusion system [C]. 2012 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST). IEEE, 2012: 460-465.
- [5] 郑红, 郑晨, 闫秀生, 等. 基于剪切波变换的可见光与红外图像融合算法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(7): 1613-1619.
- [6] 李敏, 张小英, 毛捷. 基于邻域方差加权平均的小波图像融合[J]. 国外电子测量技术, 2008, 27(1): 5-6.
- [7] FAN Y, JIN W, LI L, et al. Real time fusion system for visible and IR video based on FPGA[J]. Infrared Technology, 2011, 33(5): 258-261.
- [8] 赵海峰, 周永飞, 黄子强. 图像放大算法比较研究[J]. 现代电子技术, 2010(24): 33-36.
- [9] 李桂芝, 贾峰, 闫海鲲. 红外测量图像自适应彩虹码伪彩色编码方法[J]. 长春理工大学学报:自然科学版, 2011(4): 36-39.
- [10] LIU G, HUANG G. Color fusion based on EM algorithm for IR and visible image[C]. 2010 The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE). IEEE, 2010: 253-258.

作者简介

闫光豹, 硕士研究生。主要研究方向为计算机测控、嵌入式开发。

E-mail: ygb_nuaa@163.com

李开宇, 博士, 副教授。主要研究方向为计算机图形学、数字图像处理、计算机测控。

E-mail: lky_401@nuaa.edu.cn

杨盛亚, 硕士研究生。主要研究方向为计算机图形学、信号处理。

E-mail: yangshengya2@163.com

(上接第33页)

参考文献

- [1] 蔡磊, 周亭亭, 郭云鹏, 等. 基于超声波定位的智能跟随小车[J]. 电子测量技术, 2013, 36(11): 76-79.
- [2] 徐成波, 张常年. 基于嵌入式 Linux 的工业机器人控制系统[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2014, 7: 24-27.
- [3] 夏鲲, 张振国, 丁学, 等. 电动车跷跷板自平衡系统设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(2): 179-183.
- [4] 魏雅, 杜云. 基于单片机遥控超声波测距智能小车[J]. 信息技术, 2014, 11: 67-69.
- [5] 朱海洋, 张合, 马少杰. 低功耗声/超声复合传感器节点设计[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(10): 2223-2230.
- [6] 陈洁, 余诗诗, 李斌, 等. 基于双阈值比较法超声波流量计信号处理[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(11): 1024-1033.
- [7] 兰羽. 具有温度补偿功能的超声波测距系统设计[J]. 电子测量技术, 2013, 36(2): 85-87.
- [8] 章隆彬, 邱恒, 马国荣. 基于 Android 操作系统的 XK-I 教育机器人平台设计[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(8): 50-53.
- [9] 张洁, 刘苹, 卢慧. 基于单片机 AT89C52 的多功能探测小车设计[J]. 电子测量技术, 2014, 37(8): 85-88.
- [10] 兰羽. 基于红外传感器 ST188 的自动循迹小车设计[J]. 电子设计工程, 2013, 21(3): 64-66.
- [11] 李从宏. 基于功能码的红外遥控软件解码技术[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2010, 9: 72-73.
- [12] 陈志丹, 郝卫东, 闫伟, 等. 基于 STM32 遥控数字音量功放系统设计[J]. 微型机与应用, 2014, 33(4): 20-22.
- [13] 凌好, 刘荣忠, 郭锐, 等. 基于 STM32 的太阳自动跟踪控制系统的设计[J]. 计算机测量与控制, 2012, (20)2: 383-385.

作者简介

刘磊, 1993 年出生, 在读本科。主要研究方向为电气自动化、自动控制技术。

E-mail: yxkwxx@126.com