

文章编号: 1672-8785(2020)07-0038-09

## 基于长波红外和可见光相机的 多光谱成像技术

### 0 引言

长波红外相机在国防、安全检测、货品检验、高光谱目标识别等众多领域扮演重要角色。尽管长波红外相机有诸多优势,但与同类的可见光相机相比,它的价格非常昂贵。通常情况下,一台入门级的红外相机就要 1000~3000 美元。为了进行原理性的验证,将一台低成本(259 美元)小尺寸(10.50 mm×12.7 mm×7.14 mm)的长波红外相机模块集成到一款智能手机上。虽然该红外相机模块的分辨率只有 160×120 像素,很难在成像应用上有好的建树,但该项目的研究旨在将可见光相机与长波红外相机结合,探索它们是否能实现优势互补。此外,基于该集成系统我们还研究了光谱信息和梯度信息的图像配准与融合算法。

### 1 实验简介

将可见光和红外相机集成工作须解决若干重要技术:同步获取长波红外与可见光图像、对二者进行图像配准和图像融合。由于图像的光谱差异很大,基于标准描述因子的图像配准方法就不能很好地在这个应用场景中发挥作用了。为了解决图像配准的问题,轮廓和分割检测、城市环境的混合特征提取等特定的应用技术被借鉴过来。此外,为了解决图像融合的问题,高通滤波、小波分解、多通道融合等技术也得到了广泛应用。

本文中搭建的小型系统以 Raspberry Pi Zero W 平台为基础,它使用了 Raspberry Pi V2 相机模块,并集成了 FLIR 公司的 Lepton 3 长波相机模块。为了更好地进行对比,表 1 列出了 FLIR 公司的 Boson 640 与本系统中的相机模块的一些主要参数。

表 1 主要参数对比

	FLIR Boson 640	FLIR Lepton3+R Pi
价格	3000 \$	260 \$ +190 \$
分辨率	640×512	160×120 (红外相机) 3200×2400 (可见光相机)
帧频	60 Hz	9 Hz
灵敏度	50 mK	50 mK
水平视场角	95°	57°
光谱范围	7.5~13.5 μm	8~14 μm

工作流程大致如下:两个相机同时获取图像,再将图像保存到存储器中,然后将图像加载到用于图像配准和融合处理的外部计算机。

由于两个相机的位置大约偏离了 1 in,获取到的可见光和红外图像有视差。此外,可见光相机的视场角比红外相机略大一些。因此,有必要在图像融合处理之前对图像进行配准。为了实现这个目标,我们需要对两个图像进行边缘检测,并计算边缘之间的互相关性。对配准好的可见光与红外热图像进行融合的方法有很多种。一个简单的方法是将可见光图像中的高频分量直接注入到红外图像中,除此之外,还有基于红外图像中的强度信息与可见光图像中的梯度信息、基于亮度与色度信息等的复杂算法,本文后面会对这部分的内容进行详细讨论。

### 2 相机系统

#### 2.1 硬件设计

如图 1 所示,系统中的可见光相机、红外相机还有控制器都被安置在一个铝盒中。在设备的背面,是一个 5 in 的触摸屏面板。面板允许用户访问并可运行相机的配套软件,还可以

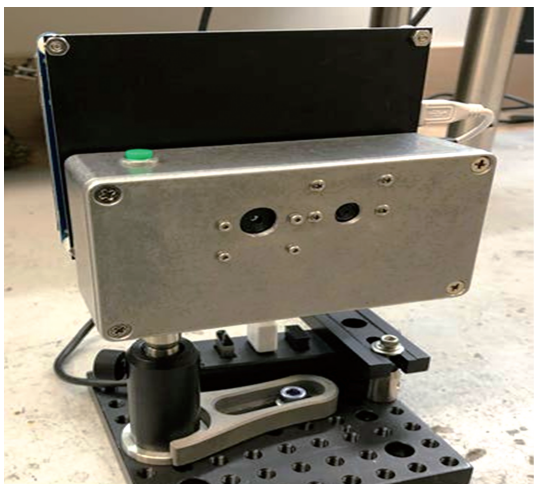


图 1 系统结构前视图

预览将要获取的图像。作为系统的主控制器，Raspberry Pi Zero W 板实现了图像的获取、存储和传输等功能，系统框图详见图 2。

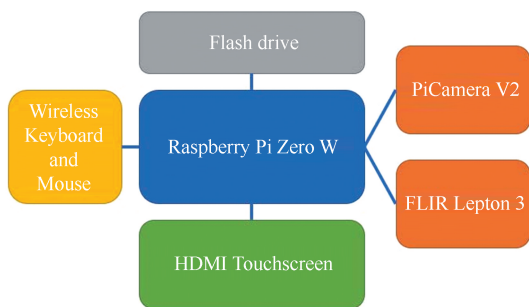


图 2 系统框图

## 2.2 图像获取

相机在待机状态时，可以从显示触摸屏上

预览图像；按下获取图像按钮时，预览停止并立即开始传输图像数据。

本系统中的数据连接没有那么完美，数据传输初期会偶发数据包丢失的现象。为了尽量克服硬件带来的限制，同时又能最小化两幅图像的时间间隔，我们尽可能在采集过程中实现图像的同步获取，并通过主控制器对两幅图像实现时间标记和存储。图 3 所示为对可口可乐售卖机成像的一个案例；图 4 所示为三个更具有代表性的案例；受制于硬件条件，本系统对动目标拍摄的效果不尽如人意，图 5 所示即为对动目标成像的一个案例。

## 3 图像配准算法

可见光与红外图像存储特征信息的方式不同。前者的大部分重要信息是通过梯度获得的，可以通过直方图均衡化来处理梯度信息并重构可见光图像；而红外图像最重要的特征信息体现在强度的极大值和极小值上。因此在提取两类图像的特征信息时，算法是截然不同的，这无疑会使图像配准算法的难度增大。

在算法优化过程中，利用相机的固有几何和位置特征，并引入经验参数  $s$  和转移向量  $\vec{r}$  可以发挥算法的优势。为完成图像配准，首先调整可见光图像的大小，使其与红外图像的尺寸相匹配，在这一步中须引入经验参数  $s$ 。然



图 3 对自动售卖机的成像

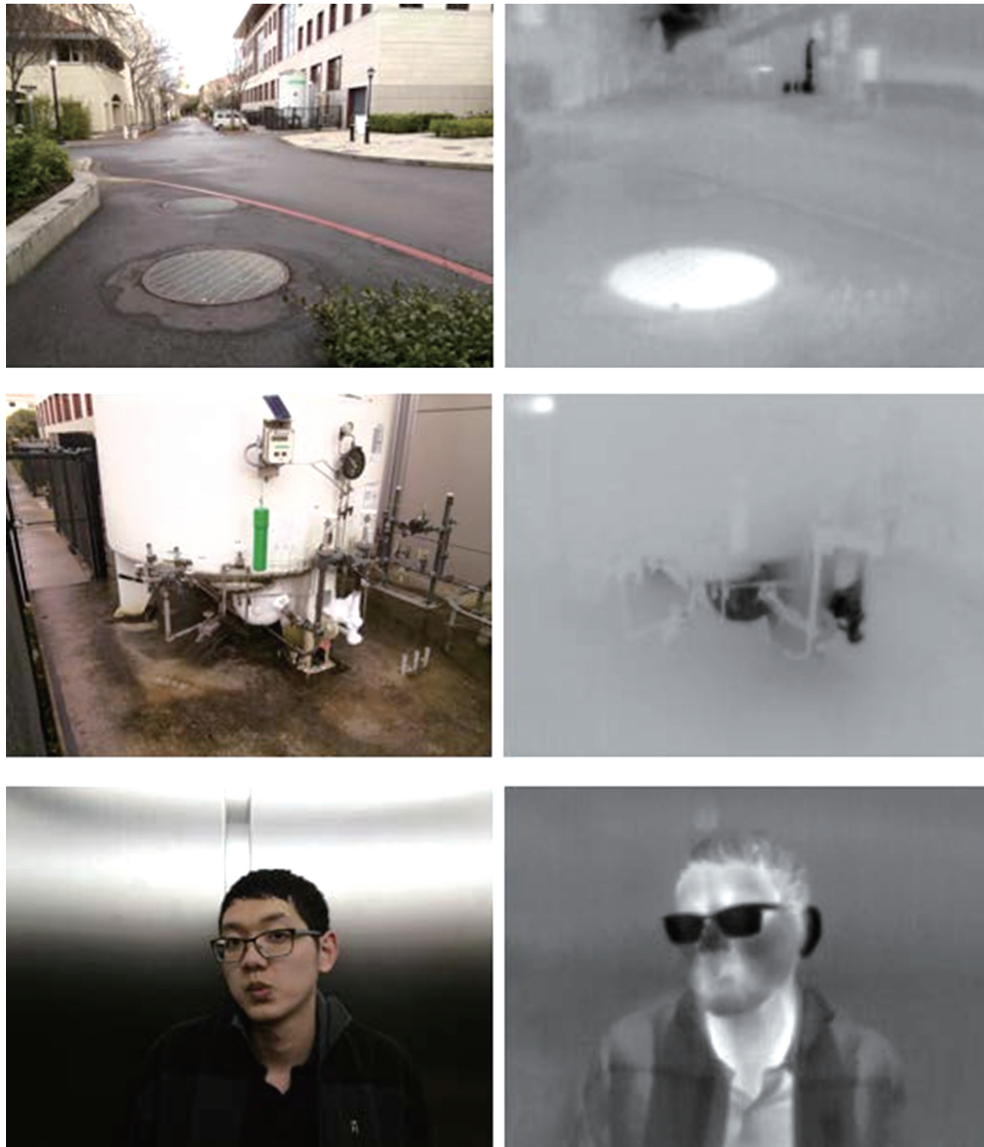


图 4 三种成像目标的可见光和红外图像



图 5 对某动目标成像的结果

后使用 Canny 算子来提取图像边缘, 如图 6(c) 和图 6(d) 所示。采用卷积算法对两个模糊边

缘进行互相关运算, 如图 6(e) 所示。将  $s$  遍历 1.1~1.3 之间的数值, 并重复上述运算过程。得到相关函数最大时  $s$  的数值, 相应的转移向量  $\vec{r}$  也就确定下来了(见图 6(f))。获取了最佳的  $s$  与  $\vec{r}$  后, 红外图像就与可见光图像成功实现了图像配准, 如图 6(g) 和图 6(h) 所示。

我们还尝试了不同的边缘检测算法, 表 2 列出了不同算法的图像配准成功率。从表中可以看出, Canny 算法是最佳选择, 它可以成功将 57 对图像进行配准(共有 62 对图像)。在实验中发现, 在以下两种情况下图像配准会失效: (1) 当近景目标与无限远处的目标重叠时,

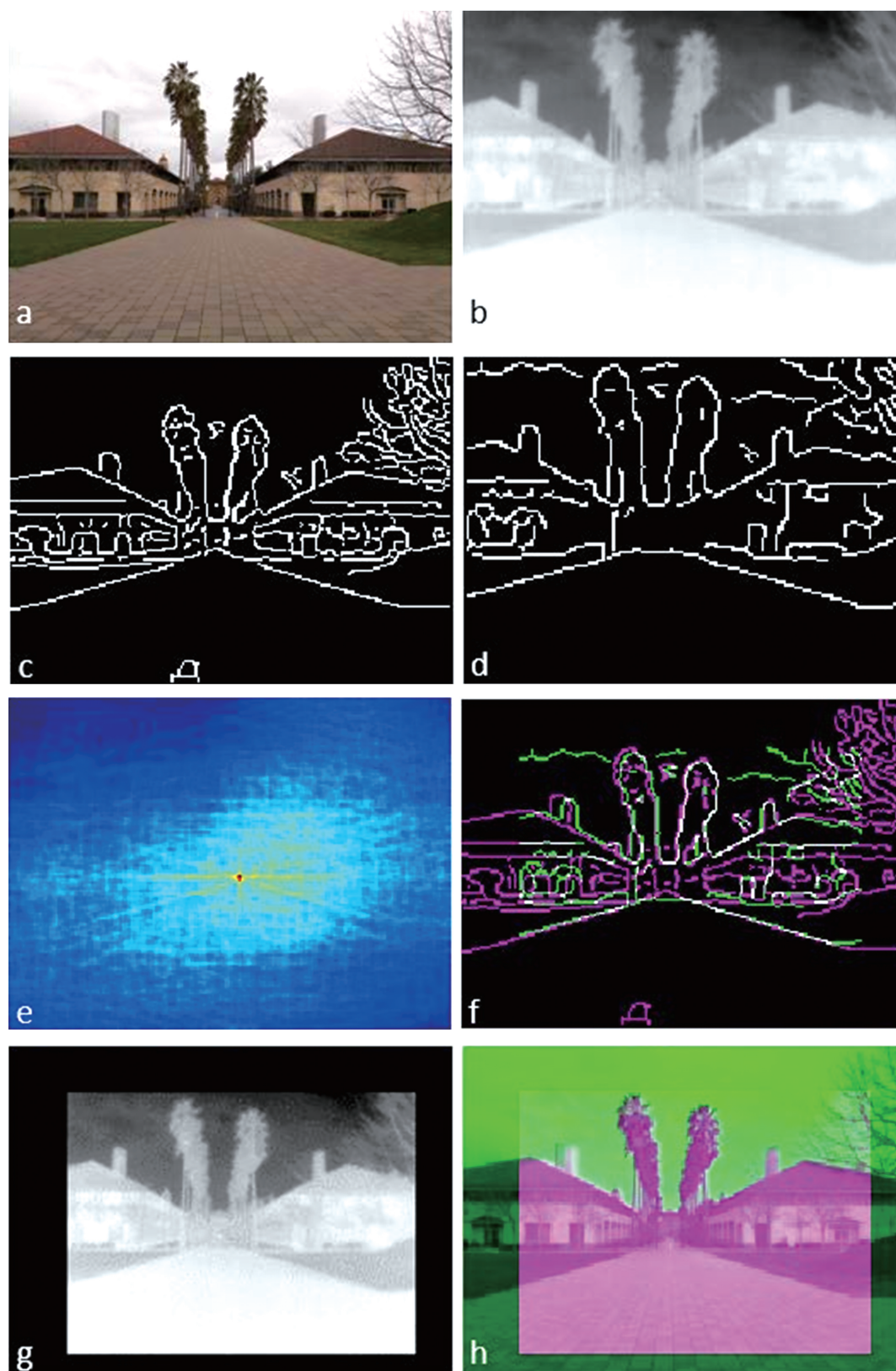


图 6 基于边缘计算的图像配准: (a)可见光图像; (b)红外热图像; (c)基于 Canny 算子的可见光图像边缘; (d)基于 Canny 算子的红外热图像边缘; (e)对两幅图像的边缘进行互相关运算的结果; (f) $s$ 、 $\vec{r}$  最优情况下的边缘; (g)配准后的红外热图像; (h)配准成功的图像

表 2 不同算法的图像配准成功率

算法种类	成功率
Canny	0.92
Log	0.82
Zerocross	0.82
Prewitt	0.73
Sobel	0.73
Roberts	0.66

无限远处的天空边缘被分辨出来，而近景目标的边缘是模糊的，如图 7(a)和图 7(b)所示；(2)可见光图像与红外图像没有共同的边缘。例如图 7(c)和图 7(d)中，红外图像上有加热设备的轮廓，但可见光图像上没有该轮廓。

#### 4 图像融合算法

一旦图像配准成功完成，就可以进行下一步的图像融合了。此处再次强调一下两类图像特征的不同之处：红外图像的显著特征是通过强度的极大值和极小值提取的(由于热辐射的特性，红外图像在梯度上没有尖锐峰)，而可见光图像的显著特征包含在梯度信息中。所以

采用的图像融合方法应该综合考虑提取红外图像的强度信息和可见光图像的梯度信息。接下来将介绍三种图像融合算法。

##### 4.1 YCbCr 算法

由于在 RGB 所有的颜色通道上都载有梯度和强度信息，可以采用基于 YCbCr 色度空间的图像融合算法。首先，我们将红外图像灰度图中的光谱强度信息转换成 RGB 图像上的色度信息，并通过编码的方式映射到 RGB 的空间坐标上。然后，将红外图像和可见光图像均从 RGB 空间映射到 YCbCr 色度空间上。接着，把红外图像中的 Y 分量(亮度信息)用可见光图像中相应的分量替代。最后，将融合后的图像从 YCbCr 色度空间再转换到 RGB 空间上。融合后的最终数据中既包含了可见光图像中的梯度信息，也包含了红外图像中的光谱强度信息。

##### 4.2 高通滤波(HPF)算法

YCbCr 算法需要建立在融合图像具备多通道的基础上，如果这个基础不成立，我们可以选用高通滤波算法来实现单通道下的图像

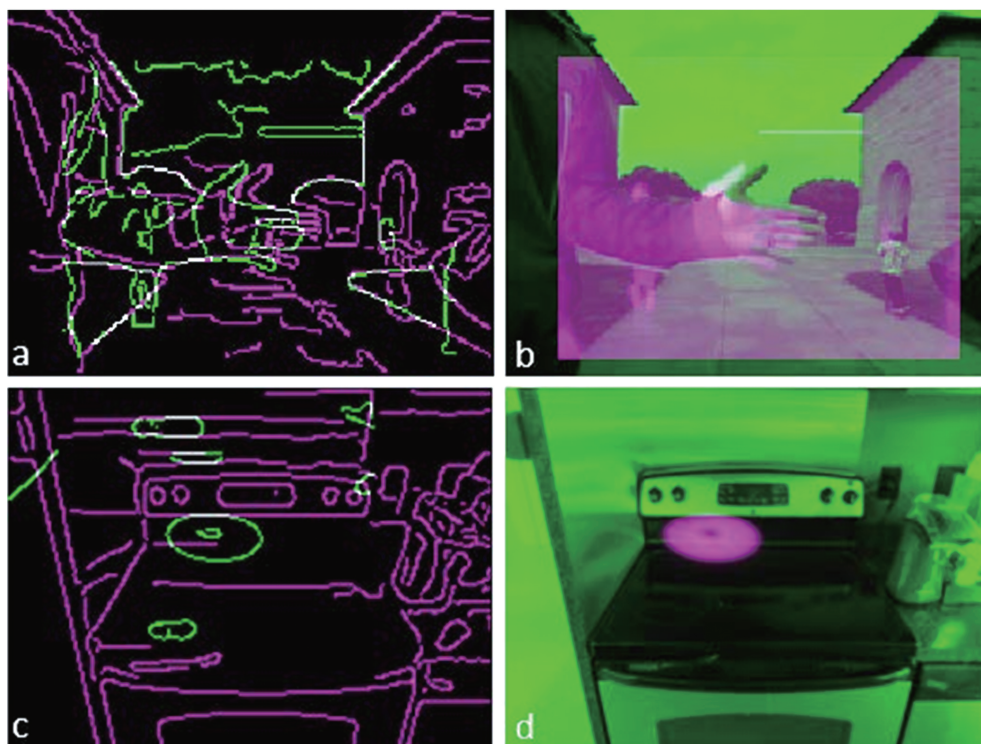


图 7 图像配准的失败案例

融合。

首先, 我们构建一个高斯低通滤波器, 并将其应用于可见光图像。

$$V_{LP} = \text{imgaussfilt}(V, \sigma) \quad (1)$$

式中,  $\sigma$  为高斯核函数的标准差。

接下来, 将低频信号从原始图像中剔除, 得到高频信号。

$$V_{HP} = V - V_{LP} \quad (2)$$

最后, 将可见光图像中的高频信号注入到红外图像  $T$  中去, 就可以得到融合后的图像  $X$  了。

$$X = T + V_{HP} \quad (3)$$

相比于 YCbCr 算法的诸多约束, 高通滤波算法仅有一个参数  $\sigma$ 。为了使算法不受图像尺寸大小的约束, 引入变量  $\alpha$ 。

$$\sigma(\alpha) = \alpha \times \frac{1}{2} \times \frac{S_{ize}(V)}{S_{ize}(T)} \quad (4)$$

当  $\alpha=1$  时,  $\sigma$  为最佳截止频率。

### 4.3 梯度传递函数(GTF)算法

为了避免高通滤波算法带来的光谱失真, 尝试采用了以下算法。为了保留红外图像中的强度信息和可见光图像中的梯度信息, 构建了以下目标函数:

$$\epsilon(X) = \frac{1}{2} \|X - T\|_2^2 + \lambda \|\nabla X - \nabla V\|_1 \quad (5)$$

式中, 等号右边第一项使得融合后图像的强度信息与原始红外图像的强度信息相匹配, 而第二项将可见光的梯度信息注入到融合图像中去。参数  $\lambda$  用来调节两项之间的权重。对于给定的  $\lambda$ , 融合图像  $X$  通过最小化目标函数  $\epsilon(X)$  来获得。

此外, 还有小波变换、比值法、高通调制融合算法等可用于图像融合, 这些在别的研究成果中有详细介绍, 这里就不赘述了。

## 5 图像融合效果

### 5.1 图像融合效果的评价指标

在评估融合算法的效果之前, 我们首先必须定义一组有用的评估指标。除了典型的  $P_{SNR}$  和  $S_{SIM}$ , 图像的量化指标和信息类型也是

图像融合效果的重要评判依据。作为一个常见的图像融合效果衡量指标,  $Q_{NR}$  可以量化多光谱图像的光谱与空间失真度, 它的表达式如下:

$$Q_{NR} = 1 - |Q(f, V) - Q(T - V_{LP})| \quad (6)$$

其中,  $Q$  函数的表达式为

$$Q(x, y) = \frac{4\sigma_{xy}\bar{x}\bar{y}}{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)[(\sigma_x)^2 + (\sigma_y)^2]} \quad (7)$$

此外, 由于我们关注的是最终图像所包含的信息量, 所以熵也是不可或缺的一个评价指标。

### 5.2 图像融合效果分析

YCbCr、HPF 和 GTF 算法具有代表性的成果如图 8 所示。

我们首先定性分析 YCbCr 算法的处理结果。由于红外和可见光图像信息是从 YCbCr 色度空间的不同通道获取的, 因此融合图像中温度较高的区域是用暖色调突出显示的, 详见图 9。

从图 8 可以看出, HPF 和 GTF 方法看起来非常相似( $\alpha=1, \lambda=0.1$ )。仔细对比图 8 中使用这两种算法的融合图像, 我们发现用 GTF 方法处理过的图像缺少一个梯度细节。对此进行了深入的研究, 发现暖水管道口是获取图像前不久才打开的, 故温度梯度比较微弱。分别用 HPF 和 GTF 算法对图 10(a) 中的红外图像和图 10(b) 中的可见光图像进行融合, 效果如图 10(c) 和图 10(d) 所示。两种方法的评价指标的曲线如图 11 所示。

从图 11 可以看出, 当  $\alpha$  和  $\lambda$  增大时, 熵也相应增大。这表明, 可见光图像已经将信息传输进最终的融合图像中了。此外, 随着  $\alpha$  和  $\lambda$  的增大, 两种融合方法的  $P_{SNR}$  和  $S_{SIM}$  指标均是下降的。值得注意的是, 两种方法最大的不同体现在  $Q_{NR}$  指标上: HPF 方法的  $Q_{NR}$  会变成负数, 而 GTF 方法的  $Q_{NR}$  会在某一个正值附近达到饱和。

从图 10(c) 可以看出, HPF 方法未能将温度较低的建筑物和温度较高的暖水管道口的强

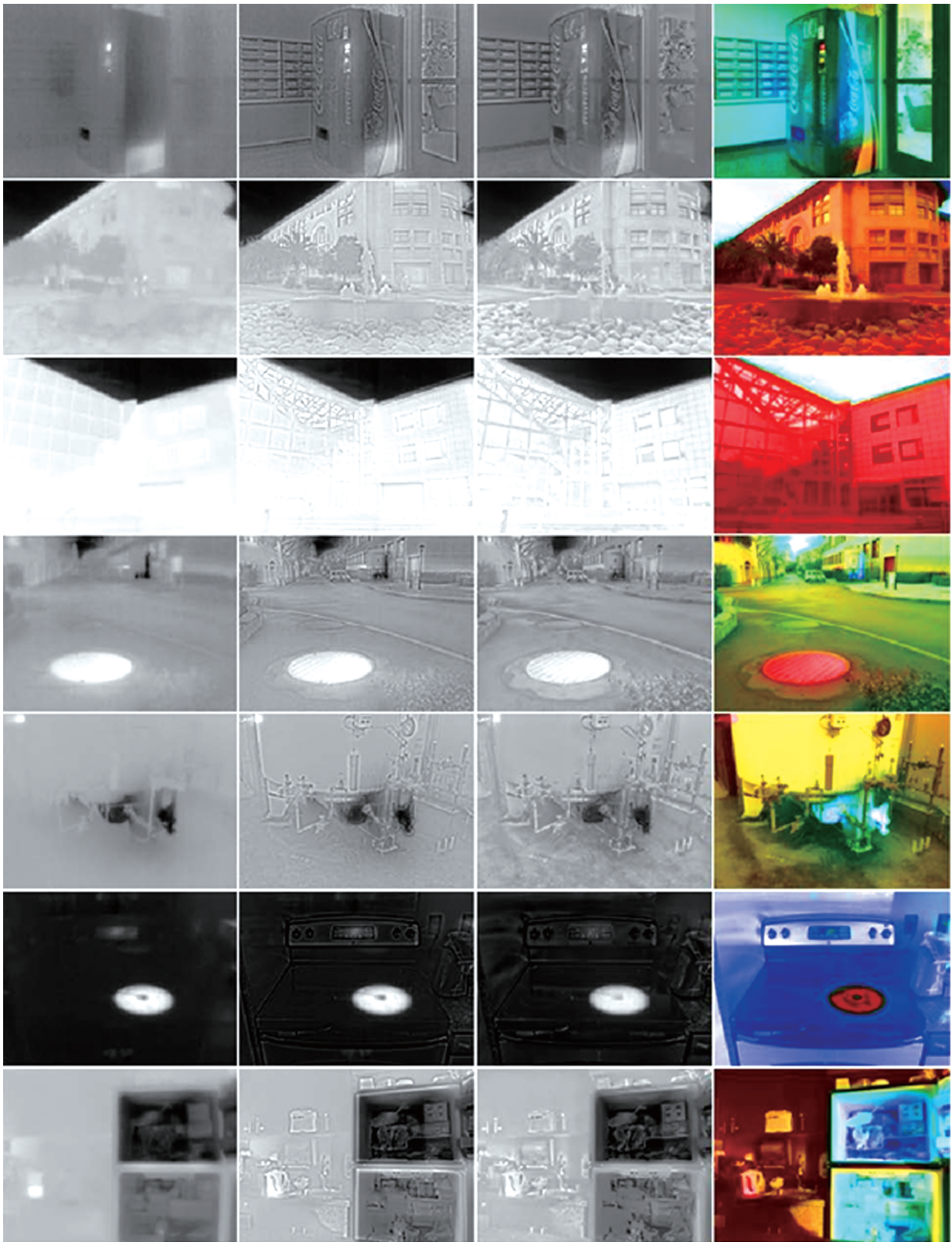


图 8 使用不同算法对各类成像目标进行图像融合的结果比较图(从左往右:第一列为原始图像;第二、第三和第四列分别为使用 HPF、GTF 和 YCbCr 算法的融合图像)



图 9 YCbCr 图像融合结果

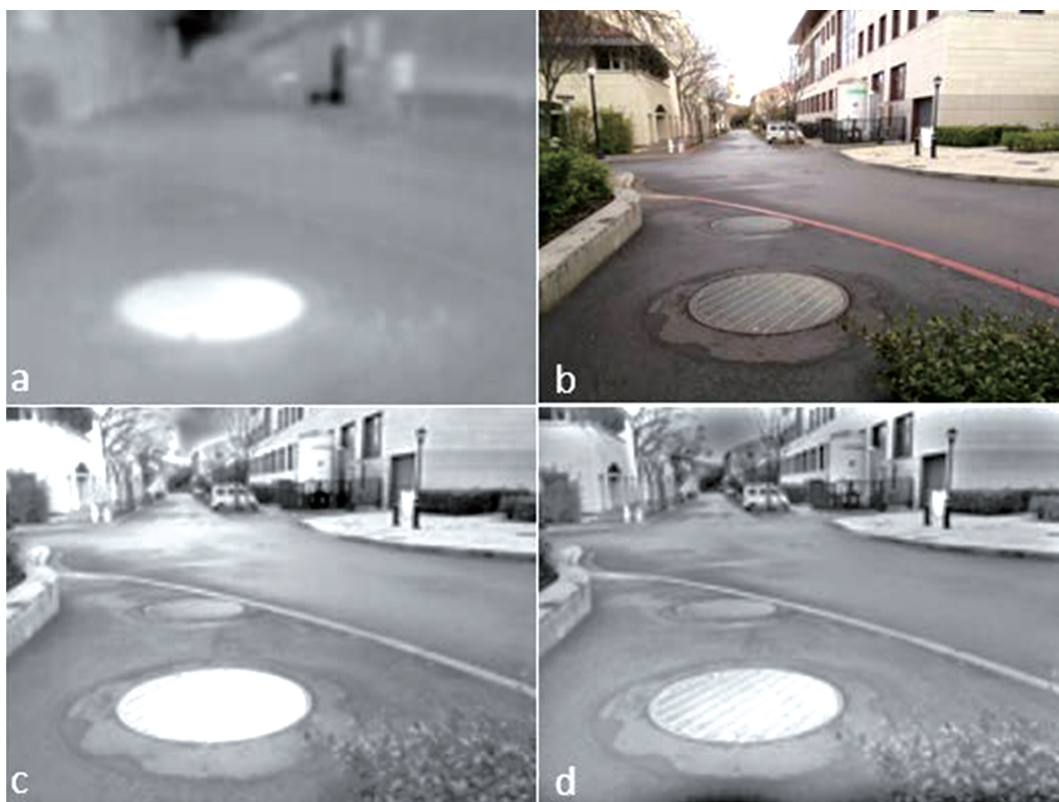


图 10 (a)红外图像; (b)可见光图像; (c)HPF 算法融合图像; (d)GTF 算法融合图像



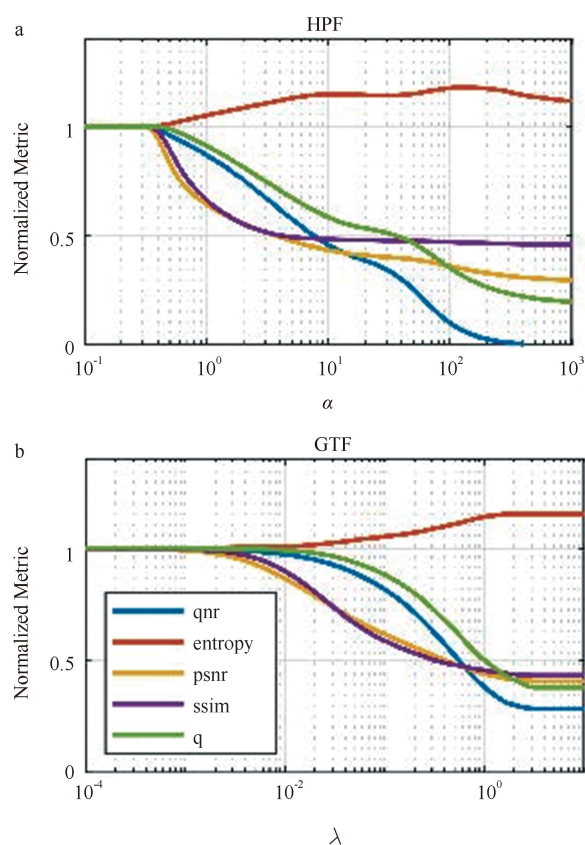


图 11 HPF 和 GTF 算法的各类评价指标曲线图

度信息区分开，这会导致红外图像的失真，这个结果也与 HPF 方法中  $Q_{NR}$  曲线的陡峭下降（见图 11(a)）相符。比较下来，图 10(d) 就抑制了建筑物的强度信息（目标函数中  $|X - T|_{\frac{1}{2}}$  项作用的结果），同时暖水管道口的强度信息也不可避免地下降了（目标函数中  $|\nabla X - \nabla V|_1$  项的权重上升带来的结果）。

## 6 进一步的工作

硬件上，未来工作的首要目标是需要建立一个更好的数据传输通道。现有的不完善的数据传输通道严重限制了帧频，而且也使得相机

无法对任何运动目标成像。如果能充分利用 9 帧/s 的数据传输速度，就有可能实现成像目标的多样性。此外，硬件处理器性能的提升也为直接在平台上进行图像配准和融合提供了可能。实时图像融合技术的发展将对高性能的机载可见光/红外相机的应用起到推波助澜的作用。

软件算法上，未来热像仪的输出不会仅仅是灰度图数据，能更加直观地显示出目标的温度数据亦是大势所趋。另外，用于图像配准和融合的算法也有许多改进方向。比如，可以在图像配准之前先对图像进行分割。这样的话，距离不同却又重叠在一起的目标可以通过视差修正来实现图像配准。又如，红外图像往往是稀疏的，可以对分割图像进行插值，从而形成最终的配准图像。再比如，如若可以充分利用 9 帧/s 的传输速度，YCbCr 方法很可能会因为它计算简单这一得天独厚的优势而在需要对图像进行实时处理的众多领域得到广泛应用。

## 7 小结

本文将低成本的红外相机与可见光相机集成为一个小型的成像系统中，通过图像融合算法成功地将可见光图像的信息融合到红外图像中，起到了抛砖引玉的作用。但由于技术尚不成熟，面对一些局限性的场景，HPF 和 GTF 算法会将错误的温度信息引入到融合图像中去。因此，要想取代高分辨率热像仪，特别是在对高光谱图像精度要求苛刻的领域，图像融合算法依旧任重而道远。

（信息来源：Stanford University/Hines J&Wang E）

□于啸编译