面向苹果品质检测的图像融合方法

罗晓清， 袁衬衬， 柴鹏飞， 李 凯
（江南大学 物联网工程学院，江苏 无锡 214122）

摘要：水果的损伤不但影响外观，还会造成营养流失和病菌感染等问题。作者提出一种面向水果品质检测的图像融合方法，为果农或经销商提供水果损伤信息。首先，对苹果的可见光图像和红外图像分别使用四元数小波变换得到低频子带与高频子带；接着，对低频子带使用基于局部平均梯度的加权平均方法进行融合，高频子带采用基于导向滤波的绝对值取大的融合规则实现融合；最后，将融合后的高频系数与低频系数使用逆四元数小波变换得到融合后图像。实验结果表明，提出的方法很好的保留了可见光图像中表皮的细节纹理和红外图像中检测到的次表面损伤信息。该方法能够提高苹果品质检测的准确性。

关键字：品质检测；图像融合；四元数小波
中图分类号：TN 911.73　**文章编号**：1673-1689(2019)09-0033-08　**DOI**：10.3969/j.issn. 1673-1689.2019.09.005

Image Fusion for Apple Quality Detection

LUO Xiaoqing， *YUAN Chenchen*， *CHAI Pengfei*， *LI Kai*
（School of Internet of Things Engineering，Jiangnan University，Wuxi 214122，China）

Abstract：The damage of fruit not only affects the appearance quality，but also causes nutritional loss and bacterial infection. The purpose of this paper is to research an image fusion method for quality detection of fruit and then provide the damage information of fruit to farmers or distributors，which help them take early means to avoid greater economic losses. Firstly，low-frequency and high-frequency subbands are obtained by implementing the quaternion wavelet transform（QWT）on the visible image and the infrared image of apple. Secondly，the low-frequency coefficients are fused using the weighted average fusion rule based on the local average gradient. The high frequency coefficients are integrated by choose-max fusion rule based on guided filter. Finally，the fused image is obtained by using the inverse QWT after the fusion of the low frequency coefficients and high frequency coefficients. The experimental results show that the proposed method can preserve the detail texture of the epidermis in the visible light image and the secondary surface damage information detected in the infrared image. Therefore，the proposed method is helpful for improving the quality detection accuracy of apples.

Keywords：quality detection，image fusion，quaternion wavelet transform

收稿日期：2017-03-07
基金项目：国家自然科学基金项目（61772237）；江苏省自然科学基金项目（BK20151358，BK20151202）；中央高校自主科研项目（JUSRP51618B）；总装教育部联合预研项目(6141A02033312)；江苏“六大人才高峰”高层次人才项目(XYDXX-030)。
作者简介：罗晓清(1980—)，女，博士，副教授，主要从事模式识别与图像处理研究。E-mail：xqluo@jiangnan.edu.cn
引用本文：罗晓清，袁衬衬，柴鹏飞，等. 面向苹果品质检测的图像融合方法[J]. 食品与生物技术学报，2019，38(09)：33-40.

中国作为水果产业大国,水果产业一直占据着重要的经济地位,从 1993 年开始,无论在种植面积还是总产量,中国的水果产业一直保持在世界第一的水平。但遗憾的是,中国的水果产业与其他国家相比,存在诸多问题,主要有果品质量差、整体价格较低、出口量小以及附加值低等。究其原因,主要是因为水果产后处理技术薄弱,大部分的产品没有进行品质检测和分级,在采摘后直接进入市场,导致水果中质量不一,没有市场竞争力。另一方面,在水果的采摘、运输、存储过程中都容易造成水果损伤,而早期的轻微损伤很难直接检测出来,这些未被检测出损伤的水果会逐渐演变成深程度的病变,被病菌侵入,造成组织腐败,甚至会发生交叉感染,感染未损伤的水果,给果农或者水果厂商带来巨大的损失。无论是对水果进行分级还是防止在水果后期运输保存中出现损伤,都必须采取高效的措施来对水果品质进行检测。

传统的水果品质检测通常是用肉眼直接进行观察,该方法存在有很多缺点,比如辨别率低,速度慢,不能够识别水果内部损伤等问题。可见光图像检测系统被广泛用于农产品品质检测,主要是通过对农产品的亮度,颜色等信息来检测产品品质。相比与用肉眼人工检测,可见光图像检测系统具有速度快,精度高,可以自动化等优点。但是,可见光图像检测系统只能够检测到水果外部损伤,对于表皮轻微的碰蹭损伤以及内部损伤无法检测出来。红外成像系统具备检测水果次表面或内部缺陷的能力,但是红外图像的分辨率比较低,并且检测不出来苹果表皮损伤。通过图像融合技术将可见光图像与红外图像综合,得到的融合图像即包含了红外图像中水果次表面损伤信息,又包含可见光图像中丰富的水果表皮信息,包含的信息更丰富,进行的苹果品质检测结果更加准确。

当前,已有部分学者开展了将图像融合技术用于农产品品质检测的研究。主要成果有:1993 年,Celinski 等研究了多传感器检测水果和蔬菜的品质[1];Wen 在 1998 年将苹果作为研究对象, 使用可见光与红外相机同时采集苹果的图像用于检测水果缺陷[2],并在 2000 年设计了一种近红外与中红外的图像融合系统用于水果表面缺陷检测[3];Cheng 等人也在 2003 年设计出新的基于波长为 700~1 000 nm 的近红外和波长为 3.5~5 μm 或 8~12 μm 的中红外水果缺陷检测系统[4];2005 年,黄星奕等以桃子的品质检测为示例,研究了传感器融合技术在水果品质检测的可行性[5];2009 年,王克俊等使用图像融合技术研究了检测苹果缺陷的问题[6];郭志明将近红外光谱与高光谱图像进行融合用于苹果品质的快速无损检测[7]。2016 年,关济雨将近红外和高光谱散射图像进行融合用于水果损伤评估[8]。

近年来,基于多尺度变换的图像融合方法越来越流行,这主要是因为基于多尺度变换的图像融合方法将原始图像分为低频信息和高频信息,更好的表现了图像的本质信息,从而有利于图像融合中对待融合图像进行信息提取。常用的多尺度变换有离散小波变换,平稳小波变换,双数复小波变换,曲波变换,轮廓波变换,非下采样轮廓波变换等。人们基于上述多尺度分解工具提出了许多基于多尺度变换的图像融合方法。例如:J. Lewis 等使用双数复小波作为多尺度变换工具,使用基于区域的规则进行融合[9],F. Nencini 等根据图像的曲波变换系数对遥感图像进行融合 [10],Q. Zhang 等则是研究了如何将非下采样轮廓波变换用于图像融合[11]。当前,四元数小波变换是一种新颖的有效的多尺度变换工具,由于其可以提供丰富的尺度信息以及幅值相位信息,已经成为非常流行的多尺度变换工具,被广泛应用于图像去噪[12],图像分类[13],图像纹理检索[14]等。考虑到四元数小波变换的优点,作者使用四元数小波变换作为多尺度变换工具。同时,由于导向滤波[15]可以根据指导图去除决策图中的噪声干扰,因此在高频融合时,将高频系数作为导向滤波的输入,待融合图像作为导向滤波的指导图,得到的滤波后的高频系数更好的反映了图像中的特征,使得融合结果更加精细。因此,作者提出了一种基于四元数小波变换与导向滤波的水果图像融合方法。该方法首先将待融合图像使用四元数小波变换得到低频子带与高频子带; 低频子带使用加权平均的规则进行融合, 权值是根据低频系数的局部平均梯度获得;高频子带采用基于选取的规则进行融合,有别于传统的直接高频绝对值取大的方法,作者将高频绝对值作为导向滤波的输入,原始图像作为导向滤波的指导进行滤波,将滤波后的高频系数作为高频融合时的选取准则;最后,将融合后的低频系数与高频系数使用逆四元数小波变换得到融合后图像。

1 图像的四元数小波变换

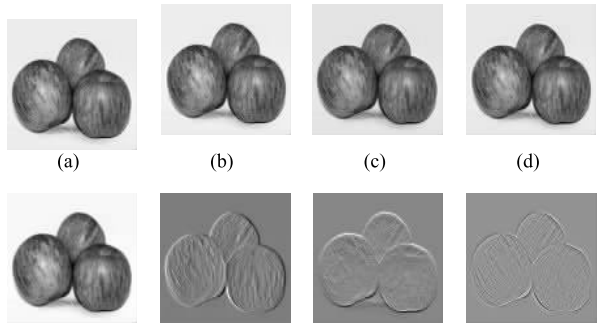
四元数小波变换是复小波变换的一个扩展,可以提供更加丰富的尺度信息来描述二维信号中的几何结构,相比于离散小波变换和双数复小波变换等,四元数小波变换在分解图像时提供了更多的系数。四元数小波变换满足近似的平移不变性,这样使得在融合图像时,如果红外图像与可见光图像没有精确配准,四元数小波变换可以克服这种问题。与传统的多尺度变换相比,四元数小波变换还可以提供图像的局部幅值-相位分析[16-17]。因此,使用四元数小波变换作为多尺度分解工具,可以更加准确的提取到原始待融合图像中的特征。

以苹果图像为例可说明图像的四元数变换结果。将图 1 使用四元数小波变换作 3 层分解,图 2 展示了变换后的低频子带。其中,图 2(a)到图 2(d)是四元数小波变换的 4 个低频子带,图 2(e)到图 2(h)是将上述低频子带用幅值相位的形式来表示。图 2(e)为幅值图,提供了原始图像的概貌信息。图 2(f)到图 2(h)是低频部分的 3 个相位图,包含了图像中的边缘和角的信息。图 3 展示了四元数小波变换后的部分高频子带。由于高频子带共有 3 层,而每层又包含水平、垂直、对角 3 个方向,受篇幅所限,这里只展示第一层垂直方向的高频子带系数。图 3(a)到图 3(d)是第一层垂直方向的 4 个高频子带。图 3(e)到 3(h)是将图 3(a)到图 3(d)的高频子带系数使用幅值相位形式表示的结果,其中图 3(e)是幅值图,图 3(f)到图 3(h)是 3 个相位图,分别反映了原始图像中细节信息的丰富度和纹理信息的丰富度。



图 1 苹果图像

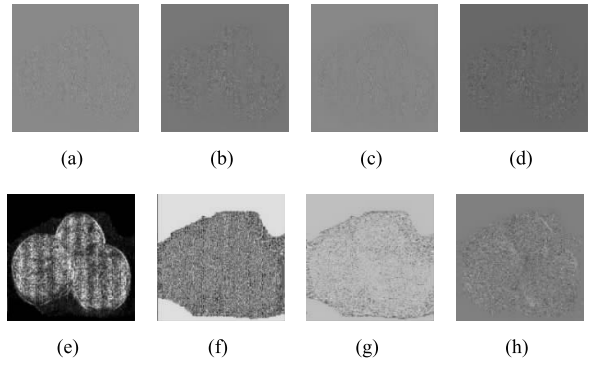
Fig. 1 Apple image



(a)到(d)是 4 个低频子带;(e)到(h)是将低频子带(a)到(d)以幅值相位形式表示;其中(e)为低频子带的幅值,(f)是相位 φ,(g)是相位 θ,(h)是相位 ψ

图 2 使用 3 层四元数小波变换后得到的低频子带

Fig. 2 QWT low frequency part at the 3th level



(a)到(d)是 4 个高频子带;(e)到(h)是将高频子带(a)到(d)以幅值相位形式表示;其中(e)为高频子带的幅值,(f)是相位 φ,(g)是相位 θ,(h)是相位 ψ

图 3 使用 3 层四元数小波变换得到的第一层垂直方向的高频子带系数

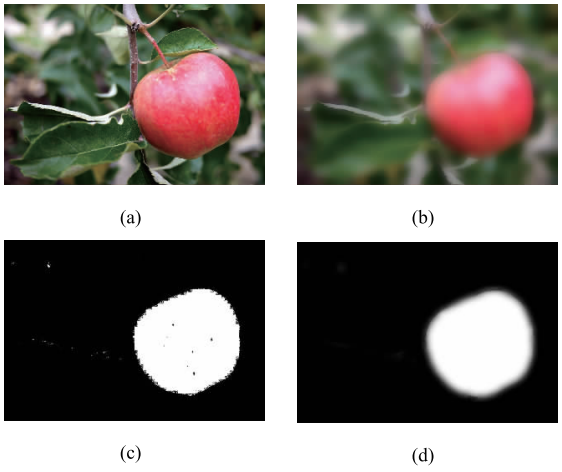
Fig. 3 QWT high frequency part at the first level in the vertical direction

2 导向滤波

在融合过程中,尤其是在高频部分融合时,直接基于高频系数计算得到的决策图会因为噪声的影响出现一些空洞和噪点。传统的解决办法是使用形态学运算来消除这部分干扰,而形态学方法分辨不出决策图中出现的空洞是否是由噪声干扰引起的还是原始图像中的空洞。因此,在本文中引入导向滤波[15]来代替形态学运算。导向滤波是一种边缘抑制平滑滤波器,能够有效的保留原始图像的边缘信息,相比较于传统的双边滤波器和加权最小二乘滤波器,不仅运算速度快,还可以有效抑制图像边

缘的振铃现象。根据输入图像的不同,导向滤波既可以作为一种边缘抑制平滑滤波器,另一方面也可以根据指导图来对输入图像进行精细修改,如移除输入图像中的噪声点,填补输入图像中的空洞等。

图 4 以苹果图像为例展示了导向滤波的两个作用。第一种是将原始苹果图像(图 4(a))同时作为导向滤波的输入和指导图,得到滤波后的图像(图 4(b))。从这个实验结果中可以看出导向滤波可以平滑非边缘区域,保留边缘特性。接着,将图 4(a)作为指导图,包含噪声的苹果目标图 4(c)作为输入,滤波后的结果为图 4(d)。不难看出在这种方式下,导向滤波能够有效的去除图 4(c)中的空洞以及噪声。



图(b)是将图(a)同时作为输入图像与指导图像进行导向滤波后得到的图像(r=15,ε=0.3),图(d)是将图(a)作为输入指导图像,图(c)作为输入图像进行导向滤波后得到的图像(r=10,ε=0.1)

图 4 导向滤波的两个实例,(a)和(c)是导向滤波的两个输入

Fig. 4 Two examples of guided filtering

3 融合方法

3.1 所提融合方法框架及步骤

融合方法的算法框架如图 5 所示。融合过程主要分为 3 个部分,第一部分是对待融合图像使用四元数小波变换,得到低频系数与高频系数,第二部分是分别对低频系数与高频系数使用对应的融合规则进行融合,第三部分是将融合后的低频系数与高频系数使用逆四元数小波变换得到融合后的图像。具体融合过程为:

1)首先假定待融合苹果图像 I_A,I_B 已经配准;

2) 对待融合图像使用四元数小波变换得到低频子带 $L_B^{nA\ ,Ln}$ 和高频子带 $H_A^{l,d,n}$ 、$Hl_B^{,d,n}$ 其中,L_*^n 表示第 n 个低频子带,$H_A^{l,d,n}$ 表示第 L 层 d 方向的第 n 个高频子带;

3) 低频子带采用加权平均规则得到融合后的低频部分 L_F^n。权值是根据低频系数的局部平均梯度得到,具体的计算过程在文章的 3.2 节介绍;

4. 高频子带采用选择规则得到融合后的高频部分 $H_F^{l,d,n}$,选择规则是根据导向滤波后的高频系数设计得到,具体过程在文章的 3.3 节介绍;

5. 将融合后的低频系数与高频系数使用逆四元数小波变换得到融合后的图像 I_F。

3.2 低频子带融合

苹果图像经过四元数变换后得到的低频子带反映了图像的概貌信息,低频子带融合的质量直接关系到最终融合图像的主观效果。考虑到局部平均梯度可以反映苹果图像中表皮纹理信息,因此采用基于加权的融合规则来融合低频部分。计算过程为:首先,计算低频系数的局部平均梯度 LMG_*^n,计算公式为:

$$\mathrm{LMG}_*^n(x,y)=\frac{\sum_{i=-I}^{I}\sum_{j=-J}^{J}\sqrt{\frac{\left(G_{*,x}^n(x+i,y+j)\right)^2+\left(G_{*,y}^n(x+i,y+j)\right)^2}{2}}}{(2\times I+1)\times(2\times J+1)} \quad (1)$$

其中 $G_{*,x}^n$,$G_{*,y}^n$ 和分别为低频系数在 x 和 y 方向上的梯度,上式计算以(x,y)为中心,大小为(2×I+1)×(2×J+1)区域梯度的均值,在本文中 I 与 J 都为 2。根据公式(1),分别计算出待融合图像低频系数的局部平均梯度 LMG_A^n 和 LMG_B^n。因此,低频融合中的权重定义为:

$$M_L^n(x,y)=\frac{\mathrm{LMG}_A^n(x,y)}{\mathrm{LMG}_A^n(x,y)+\mathrm{LMG}_B^n(x,y)} \quad (2)$$

最后,根据权值计算低频融合系数:

$$L_F^n(x,y)=L_A^n(x,y)+M_L^n(x,y)+L_B^n(x,y)\times(1-M_L^n(x,y)) \quad (3)$$

3.3 高频子带融合

高频子带反映了图像中对应位置的信息丰富程度,通常,在苹果图像中,高频系数的绝对值越大,表示包含的纹理信息越鲜明,特别是在表皮条纹边缘部分,高频系数的绝对值会特别大,而但在

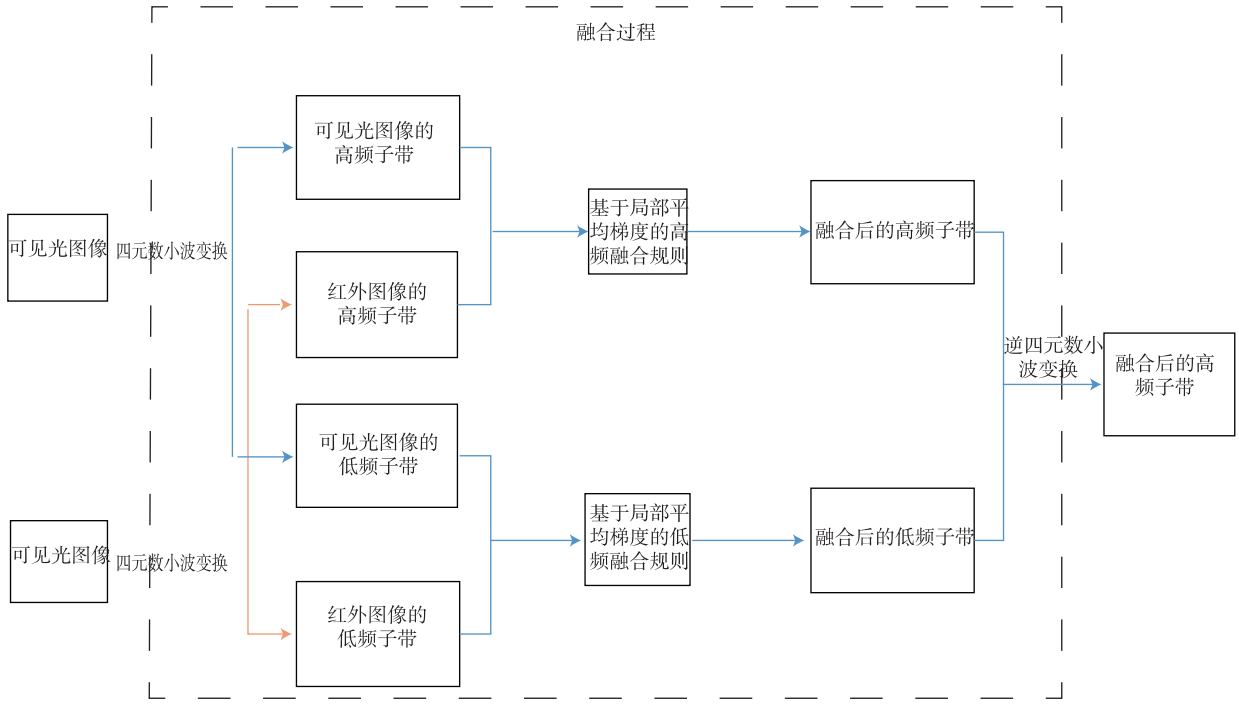


图 5　基于四元数小波变换和导向滤波的苹果可见光与红外图像融合框架

Fig. 5　Framework of QWT and guided filtering based apple visible and infrared image fusion method

条纹内部,高频系数会偏小一些,直接使用高频系数绝对值作为融合时的判断指标时,提取的主要是苹果表皮条纹的边缘信息而不是完整的条纹信息。为了解决这个问题,使用待融合图像作为导向图,将高频系数作为输入进行滤波,使用滤波后的高频系数代替原始的高频系数来判断高频系数的显著性。这一滤波过程表示为:

$$G_{*}^{l,d,n}=GF(I_{*},|H_{*}^{l,d,n}|) \tag{4}$$

其中,GF()表示导向滤波,* 代表 A 或者 B,|·|表示绝对值操作。

根据导向滤波后的高频系数,采用选取规则进行融合,最终融合后的高频系数 $H_{F}^{l,d,n}$

$$H_{F}^{ld,n}(x,y)=\begin{cases}H_{A}^{l,d,n}(x,y) & \text{if } G_{A}^{l,d,n}(x,y)>G_{B}^{l,d,n}(x,y)\\ H_{B}^{l,d,n}(x,y) & \text{otherwise}\end{cases} \tag{5}$$

其中 $G_{A}^{l,d,n}(x,y)$和 $G_{B}^{l,d,n}(x,y)$分别为高频系数 $H_{A}^{l,d,n}(x,y)$和 $H_{B}^{l,d,n}(x,y)$的导向滤波系数。当 $G_{A}^{l,d,n}(x,y)$大于 $G_{B}^{l,d,n}(x,y)$时,最终的高频系数由图 A 导向滤波后的系数决定,反之,由图 B 导向滤波后的系数决定。高频系数经过导向滤波后,可以去除部分噪声,以免将噪声误判为有用信息造成不精确融合结果。

4　结果与讨论

为了验证本文所提图像融合方法在苹果缺陷检测上的有效性,进行两组实验。同时,选取了 5 种经典图像融合方法作为对比实验。它们分别是:基于拉普拉斯金字塔的图像融合(LP)[18],基于双数复小波分解的图像融合(DTCWT)[18],非下采样轮廓波变换的图像融合(NSCT)[18],基于对比度的图像融合(DC)[19],基于脉冲耦合神经网络的图像融合(PCNN)[20]。所有的对比实验中,多尺度分解的层数都为 3,其余融合中用到的参数都采用作者文献中所提供的最佳参数值。所有的实验都是在 Pentium 3.5 GHz CPU、8 GB RAM 的 PC 机上测试运行。

4.1　主观结果及分析

第一组实验结果如图 6 所示,图 6(a)为待融合的可见光苹果图像,图 6(b)为待融合的红外苹果图像。这组实验主要是将红外苹果图像中的 4 个缺陷点融入到可见光苹果图像中,保持可见光图像中苹果的细节纹理信息。图 6(c)和 6(d)是分别用 LP 方法和 DTCWT 方法得到的融合图像。这两幅图像都保留了红外图像中的 4 个缺陷点,但缺少可见光图像中的纹理信息。NSCT 方法和 DC 方法得到的融合

图像(图 6(e)和 6(f))效果更差,不仅丢失红外图像中的缺陷点信息,可见光图像中的纹理信息也没有很好的保留,甚至出现一些原始图像中没有的黑色区域。PCNN 方法得到的结果(图 6(g))很好的保留了可见光图像中的信息,但是丢失了红外图像中的一个缺陷点。图 6(h)是融合方法得到的实验结果,很明显红外图像中的 4 个缺陷点都被呈现于融合图像中,同时可见光图像中的纹理信息也得到了保留。因此,相比于其他融合方法,本文设计的融合方法具有有效性,可用于苹果品质检测。

图 7 是第二组苹果图像融合结果。图 7(a)与 7(b) 分别是待融合的可见光图像和红外图像, 图 7(c)至 7(h)是使用不同融合方法得到的融合图像。这组中,各个融合方法得到的融合图像中出现的问题与第一组实验结果类似。LP 方法得到的融合图像丢失了可见光图像中的纹理细节信息。基于 NSCT 方法和 DC 方法的融合图像不仅丢失了可见光图像中的信息,而且还出现了大量的块状干扰,使得融合图像的主观效果更差。基于 PCNN 方法的融合结果以红外图像信息为主,缺少了大量可见光图像中苹果表皮纹理。

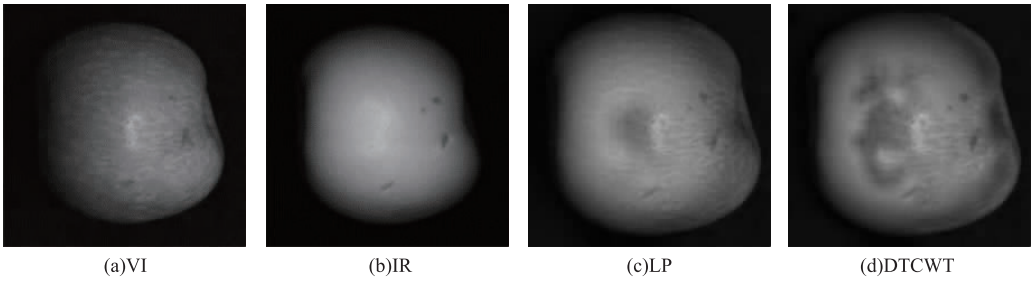


图 6 第一组苹果图像的融合结果

Fig. 6 First group of apple images fusion results

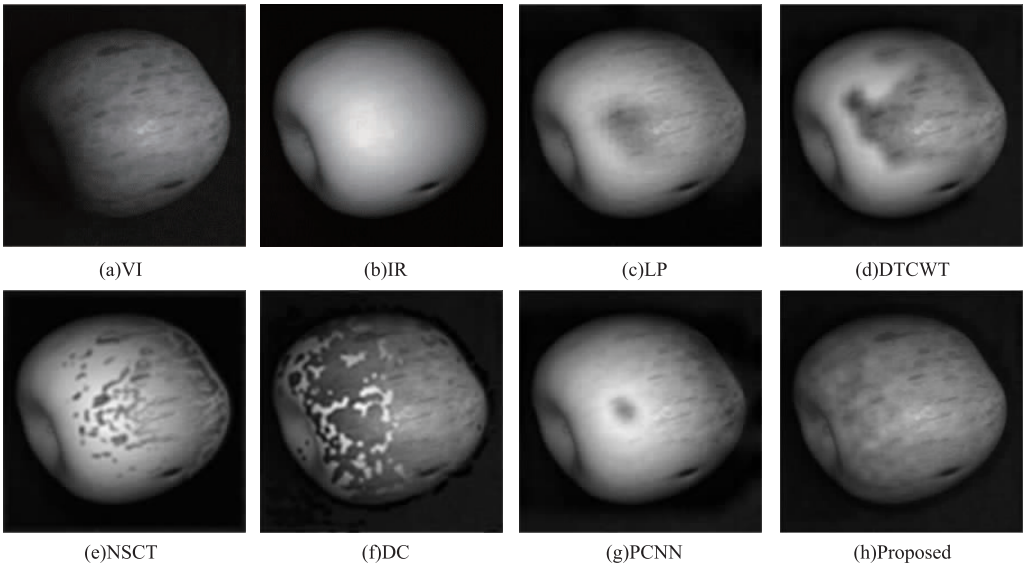


图 7 第二组苹果图像的融合结果

Fig. 7 Second group of apple images fusion results

4.2 实验客观指标及分析

为了更客观的检验作者所提融合方法的有效性，分析比较了融合图像的 5 种客观指标。这 5 种指标分别是：边缘信息(G)[21]，相位一致信息(P)[22]，Piella 度量(S)[23]，结构相似度量(Y)[24]和 Chen-Blum 度量(CB)[25]。其中，边缘信息表示融合图像中包含的边缘信息含量；相位一致信息表示图像的特征丰富度；Piella 度量表示在不引入失真的前提下有多少信息从待融合图像中转移到融合图像中；结构相似度量反映了融合图像与待融合图像结构信息的相似性；Chen-Blum 度量重点考虑了待融合图像与融合图像的局部特征的相似性。所有的这 5 个指标都是值越大表示融合效果越好。

表 1 和表 2 分别是第一组实验和第二组实验的客观评价结果，加粗表示该指标效果最好。由表 1 和表 2 可以看出，作者提出的融合方法的客观指标都好于其他融合方法，主要是因为，本文提出的融合方法采用四元数小波变换作为多尺度变换工具，得到了待融合图像中丰富的尺度信息和相位信息，使得提取待融合图像中的信息更加丰富准确。低频部分根据以系数的局部平均梯度来计算融合权重，该权重较好的度量了待融合低频系数的重要程度。同时在高频融合部分引入导向滤波，使得融合过程中提取信息更加精细准确，并减弱了噪声的干扰。

表 1 第一组实验的客观评价指标

Table 1 Objective evaluation index of the first group of experiments

指标	拉普拉斯金字塔	双树复小波分解	非下采样轮廓波变换	基于对比度	基于脉冲耦合神经网络	本文方法
边缘信息	0.580	0.555	0.385	0.442	0.349	0.598
相位一致信息	0.376	0.246	0.045	0.147	0.037	0.414
Piella 度量	0.928	0.934	0.900	0.869	0.902	0.943
结构相似度量	0.775	0.746	0.599	0.647	0.572	0.823
Chen-Blum 度量	0.503	0.464	0.515	0.487	0.472	0.545

表 2 第二组实验的客观评价指标

Table 2 Objective evaluation index of the second group of experiments

指标	拉普拉斯金字塔	双树复小波分解	非下采样轮廓波变换	基于对比度	基于脉冲耦合神经网络	本文方法
边缘信息	0.565	0.585	0.293	0.390	0.293	0.587
相位一致信息	0.383	0.301	0.040	0.145	0.040	0.411
Piella 度量	0.838	0.912	0.720	0.816	0.817	0.926
结构相似度量	0.683	0.7586	0.443	0.582	0.499	0.793
Chen-Blum 度量	0.477	0.508	0.413	0.489	0.372	0.562

5 结 语

通过图像融合技术结合使得融合后的水果图像既包含可见光图像中水果表皮的纹理信息，也包含红外图像中探测到的水果内部损伤信息。作者以苹果为例，研究了基于四元数小波变换与导向滤波的融合技术对改善水果品质检测的作用。融合过程中，使用四元数小波变换作为多尺度变换工具，得到的子带系数中包含的信息更丰富，有利于提取待融合图像中的信息，引入导向滤波，很好的消除了高频融合部分中出现的孤立点，融合结果更加平滑，细腻。实验表明，该方法能够有效的从苹果的可见光图像和红外图像中提取信息，与其他经典的图像融合方法相比，本文提出的基于可见光和红外图像的融合方法得到的融合后的水果图像质量最佳，更有利于水果品质检测。

参考文献：

[1] CELINSKI T，MCCARRAGHER B. An adaptive sensory perception controller for robotic systems [C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation，2000. Proceedings. ICRA. IEEE，1993：1645-1650 vol.2.

[2] WEN Z Q,TAO Y. Fuzzy-based determination of model and parameters of dual-wavelength vision system for on-line apple sorting[J]. **Optical Engineering**,1998,37(37):293-299.
[3] WEN Zhiqing,TAO Yang. Dual-camera NIR/MIR imaging for stem-end/calyx identification in apple defect sorting [J]. **Transactions of the Asae**,2000,43(2):449-452.(in Chinese)
[4] CHENG X. NIR/MIR dual-sensor machine vision system for online apple stem-end/calyx recognition [J]. **Transactions of the Asae**,2003,46(2):págs. 551-558.
[5] HUANG Xingyi,XIN Junwei,ZHAO Jiewen,et al. Application of visual sensing technology in peach quality evaluation [J]. **Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition)**,2009,30(5):433-436.(in Chinese)
[6] 王克俊. 基于多信息融合的苹果智能分级技术研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2009.
[7] ZHU Qibin,XIAO Pan,HUANG Min,et al. Feature fusion for detection of pork freshness based on hyperspectral imaging technology[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**,2015,34(3):246-252.(in Chinese)
[8] HUANG Ming,WAN Xiangmei,ZHU Qibing,et al. Thickness measurement of green soybean using hyperspectral imaging technology[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**,2012,31(11):1142-1147.(in Chinese)
[9] JOHN J Lewis,ROBERT J. O'Callaghan,STAVRI G N,et al. Pixel- and region-based image fusion with complex wavelets[J]. **Information Fusion**,2007,8(2):119-130.
[10] NENCINI F,GARZELLI A,BARONTI S,et al. Remote sensing image fusion using the curvelet transform [J]. **Information Fusion**,2007,8(2):143-156.
[11] ZHANG Q,GUO B L. Multifocus image fusion using the nonsubsampled contourlet transform [J]. **Signal Processing**,2009,89(7):1334-1346.
[12] YIN M,LIU W,SHUI J,et al. Quaternion wavelet analysis and application in image denoising [J]. **Mathematical Problems in Engineering**,2012,(2012-10-24),2012,2012(1):587-612.
[13] GAI S,YANG G,ZHANG S. Multiscale texture classification using reduced quaternion wavelet transform [J]. **AEU – International Journal of Electronics and Communications**,2013,67(3):233-241.
[14] LI C,LI J,FU B. Magnitude-phase of quaternion wavelet transform for texture representation using multilevel copula [J]. **IEEE Signal Processing Letters**,2013,20(8):799-802.
[15] HE K,SUN J,TANG X. Guided image filtering[J]. **IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence**,2013,35(6):1397-1409.
[16] LIU Y,JIN J,WANG Q,et al. Region level based multi-focus image fusion using quaternion wavelet and normalized cut[J]. **Signal Processing**,2014,97(7):9-30.
[17] ZHOU J,XU Y,YANG X. Quaternion wavelet phase based stereo matching for uncalibrated images [M]. Netherlands:Elsevier Science Inc. 2007,23-89.
[18] LIU Y,LIU S,WANG Z. A general framework for image fusion based on multi-scale transform and sparse representation[J]. **Information Fusion**,2015,24:147-164.
[19] BHATNAGAR G,WU Q M J,Liu Z. Directive contrast based multimodal medical image fusion in NSCT domain [J]. **IEEE Transactions on Multimedia**,2013,15(5):1014-1024.
[20] HAHN S,SNOPEK K. The unified theory of n-dimensional complex and hypercomplex analytic signals [J]. **Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences**,2011,59(2):167-181.
[21] XYDEAS C S,PETROVIC V. Objective image fusion performance measure[J]. **Military Technical Courier**,2008,56(2):181-193.
[22] ZHAO J,LAGANIERE R,LIU Z. Performance assessment of combinative pixel-level image fusion based on an absolute feature measurement[J]. **International Journal of Innovative Computing Information & Control Ijicic**,2006,3(6):1433-1447.
[23] PIELLA G,HEIJMANS H. A new quality metric for image fusion[C]// New York:IEEE,2003.
[24] LI S,HONG R,WU X. A novel similarity based quality metric for image fusion[C]// New York: IEEE,2008.
[25] CVEJIC N,LOZA A,BULL D,et al. A similarity metric for assessment of image fusion algorithms [J]. **International Journal of Signal Processing**,2008(2):160-165.