

文章编号 1004-924X(2006)02-0266-08

基于 DCT 变换的图像融合方法研究

楚 恒, 朱维乐

(电子科技大学 电子工程学院, 四川 成都 610054)

摘要:提出了一种基于离散余弦变换(DCT)以及一种结合小波变换与 DCT 变换的图像融合新方法。前者将源图像进行分块 DCT 变换,依据 DCT 系数的高频能量,对源图像的对应区域进行融合。后者利用 DCT 系数的高频能量对小波分解后得到的低频子图进行融合,同时以此为依据对小波最高分解层的小波高频系数进行选择,其他分解层的小波高频系数依据最大局部方差准则进行融合。依照平均误差、峰值信噪比以及均方根误差等客观评价标准,将新方法与其他常用的基于小波变换或 DCT 变换的融合方法进行了比较。实验结果表明,结合小波变换与 DCT 变换的图像融合新方法获得的融合效果优于其他方法。该方法与常用的基于小波变换的融合方法相比,其平均误差减少了 40.8%~69.5%,峰值信噪比提高了 9.9%~15.6%,均方根误差减少了 34.8%~47.5%,评价结果与目视效果相吻合,表明该方法能有效地提高图像融合的质量。基于 DCT 变换的图像融合新方法的融合效果仅次于结合小波变换与 DCT 变换的图像融合新方法且其计算量相对较少,适用于实时处理。

关键词:图像融合;DCT 变换;图像处理;小波变换;压缩域

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A

Image fusion algorithms using discrete cosine transform

CHU Heng, ZHU Wei-le

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology
of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: An image fusion algorithm based on discrete cosine transform (DCT) and an image fusion scheme using wavelet transform combined with DCT were proposed. The former based on DCT fused the corresponding areas of the original images according to the DCT coefficient high frequency energy and the latter using wavelet transform and DCT fused the low frequency submaps by use of DCT coefficient high frequency energy. The wavelet high frequency coefficients of the highest wavelet decomposition level were decided by the wavelet low frequency coefficients. The wavelet high frequency coefficients of the other wavelet decomposition levels were selected with the greater local deviation. The fused images of the algorithms purposed were evaluated by some parameters such as average error, peak signal noise rate, and root mean square error, compared with other conventional image fusion methods based on wavelet transform or DCT. The experimental results show that the new algorithm based on wavelet transform combined with DCT provides the best performance with 40.8% to 69.5% reduction in average error, 9.9% to 15.6% improvement of peak signal noise rate and 34.8% to

47.5% reduction in root mean square error. It is superior to the conventional methods using wavelet transform. This algorithm improves the quality of the fused image effectively, the evaluation results coincide with the visual effect very well. The algorithm based on DCT needs less computational burden and is more suitable for the real-time processing.

Key words: image fusion; discrete cosine transform; image processing; wavelet transform; compressed domain

1 引 言

图像融合是将多个不同或相同类型的成像传感器在相同时间或不同时间获取的同一场景的多幅图像信息加以综合与提取,从而产生比任何单一图像信息对景物更加精确的描述。融合图像更适合人眼与机器的视觉特性,以及后续的计算机处理任务,如分割、特征提取与目标识别等^[1-4]。图像融合一般可分为像素级、特征级以及决策级图像融合。目前,图像融合技术已广泛地应用于军事、医学影像、制造业、司法、遥感与智能机器人等领域^[1-2]。

目前,图像融合的方法与技术已有很多^[1-5],但这些方法大多是利用塔形分解方法或小波变换等多分辨率方法。现今,大量的数字图像与视频信息都是以压缩数据格式进行存储与传输。若对以压缩格式存储的数字图像进行传统的图像融合,其过程包括三部分,即解码压缩数据,图像融合,再编码为压缩格式,而编解码的计算量较大,同时涉及到空域与压缩域数据,占用大量的存储空间。离散余弦变换(DCT)是目前应用最为广泛的多媒体压缩技术。JPEG、H. 261/263 与 MPEG 等图像、视频压缩的国际标准都采用了二维 DCT 变换。在传统的图像处理场合,DCT 与 IDCT 的计算量约占总计算量的 80%^[6]。为了减少计算量与存储空间占用,在压缩域直接进行图像处理成为目前国内外研究的热点^[6-7]。直接在 DCT 域进行图像融合可以避免大量的编解码相关复杂操作,减少数据处理量与内存空间占用,还可能利用 DCT 变换的性质提高图像融合的质量。目前采用 DCT 变换进行图像融合文献不多,主要有文献[8]。本文依据 DCT 系数的性质,提出了一种完全基于 DCT 变换的图像融合方法,以及一种结合小波变换与 DCT 变换的图像融合方法,依据一些图像融合的评价标准将本

文提出的方法与常用方法进行了比较。实验结果表明,本文提出的基于 DCT 变换的图像融合方法优于常用的基于小波变换或 DCT 变换的图像融合方法,同时有效地减少了计算量。而本文提出的结合小波变换与 DCT 变换的图像融合方法在本文实验中取得了最佳融合效果,表明该方法能有效地提高图像融合的质量。

2 离散余弦变换(DCT)^[6-9]

DCT 变换是一种线性正交变换,变换核各矢量间单位正交。二维 DCT 变换是对称可分离的,即二维 DCT 变换可分解为行列方向的两次一维 DCT 变换。DCT 变换计算量适中,性能优于 DFT 等其他变换。DCT 变换能极大地去除图像元素在变换域中的相关性,其去相关压缩能力接近 KLT 变换。DCT 变换常被认为是对语音和图像信号的准最佳变换。

$N \times N$ 的二维 DCT 变换定义为:

$$X(u, v) = \frac{2}{N} c(u) c(v) \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} x(i, j) \cos \frac{(2i+1)\pi u}{2N} \cos \frac{(2j+1)\pi v}{2N} \\ u, v = 0, 1, \dots, N-1, \quad (1)$$

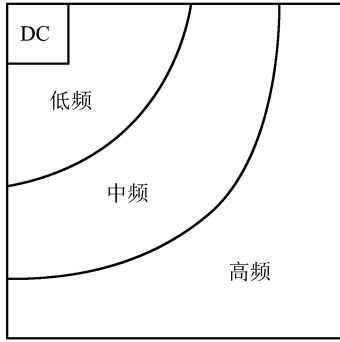
其中,当 $u, v=0$ 时, $c(u), c(v) = \frac{1}{\sqrt{2}}$; 当 $u, v=1, 2, \dots, N-1$ 时, $c(u), c(v) = 1$ 。

$N \times N$ 的二维 IDCT 变换定义为:

$$x(i, j) = \frac{2}{N} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} c(u) c(v) X(u, v) \cos \frac{(2i+1)\pi u}{2N} \cos \frac{(2j+1)\pi v}{2N} \\ i, j = 0, 1, \dots, N-1, \quad (2)$$

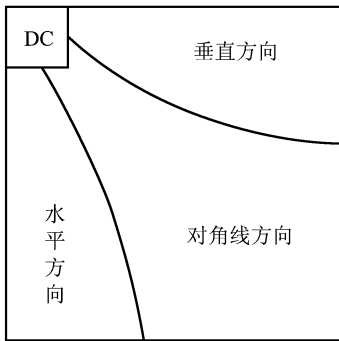
$X(0, 0)$ 常被称为直流系数 DC。DCT 系数矩阵的能量主要集中在其左上角,为图像的直流成分和低频成分。DCT 系数的频带与方向信息在 DCT 系数矩阵中得到体现,如图 1。本文提出的方法正是根据 DCT 系数的频带信息对源图像

进行融合处理。



(a) DCT 系数的频带信息

(a) Frequency band information of DCT coefficients



(b) DCT 系数的方向信息

(b) Orientation information of DCT coefficients

图 1 DCT 系数频带和方向信息

Fig. 1 Frequency bands and orientation information of DCT coefficients

3 基于 DCT 变换的图像融合

3.1 基于 DCT 变换的具体图像融合方法

(1) 目前采用 DCT 变换的图像融合方法主要有文献[8]提出的利用局部对比度对图像进行融合的方法。设 A 、 B 为待融合的源图像, F 为融合图像。

该方法首先将源图像的每个 $N \times N$ 的 DCT 系数矩阵划分为若干不同的频带, 分别为每个频带定义了一个平均幅度, 即

$$E_k = \frac{\sum_{u+v=k} |X(u, v)|}{M}, \quad (3)$$

其中, M 表示该频带所含系数的个数,

$$M = \begin{cases} k+1 & k < N \\ 2N-k-1 & k \geq N \end{cases}, \quad (4)$$

N 为进行 DCT 变换时, 图像块的长度。

对每个 DCT 系数分别定义一个对应的局部对比度, 如下:

$$C(u, v) = \frac{|X(u, v)|}{\sum_{k=0}^{n-1} E_k}, \quad (5)$$

其中, $n = u + v$ 。

在进行 DCT 系数融合时, DC 系数采用平均的办法, 即

$$X_F(0, 0) = 0.5 \times X_A(0, 0) + 0.5 \times X_B(0, 0), \quad (6)$$

对于 AC 系数, 取对比度大的系数值作为融合后的 DCT 系数矩阵的对应值, 即

$$X_F(u, v) = \begin{cases} X_A(u, v) & C_A(u, v) \geq C_B(u, v) \\ X_B(u, v) & \text{其他情况} \end{cases} \quad (u, v) \neq (0, 0), \quad (7)$$

将 DCT 系数矩阵进行融合后, 再分别对每个融合后的 $N \times N$ 的 DCT 系数矩阵进行 DCT 逆变换, 最后可得到完整的融合图像。

(2) 本文设计了一种类似于文献[1]中提到的利用小波变换进行图像融合的方法。在进行 DCT 系数融合时, 对直流系数 DC 采用平均的办法, 而对 AC 系数的融合遵循最大绝对值准则, 即

$$X_F(0, 0) = 0.5 \times X_A(0, 0) + 0.5 \times X_B(0, 0), \quad (8)$$

$$X_F(u, v) = \begin{cases} X_A(u, v) & |X_A(u, v)| \geq |X_B(u, v)| \\ X_B(u, v) & \text{其他情况} \end{cases} \quad (u, v) \neq (0, 0), \quad (9)$$

(3) 文献[10]提出了一种利用 DCT 系数的自动聚焦判据, 其主要思想是将图像划分为若干 $N \times N$ 的图像块, 分别对每个图像块做 DCT 变换, 求取 DCT 变换后的高频分量的能量, 再做全局累加作为清晰度的判据。

本文将这一方法用到多聚焦图像融合中。多聚焦图像是指当相机在拍摄某一场景中的两个或两个以上的目标时, 分别聚焦到各个目标, 通过多次拍摄而成的多幅图像。利用图像融合技术可以将多幅源图像进行融合, 从而得到一幅各个目标都清晰的图像。多聚焦的源图像可分成清晰区域与模糊区域, 清晰区域的高频分量丰富, 而模糊区域以低频分量为主。采用此方法可以先比较源图像的每个对应的图像块的高频能量, 选择高频能量大的图像块作为融合图像的对应部分。

这一图像融合方法的基本原理为: 首先定义每个 DCT 系数矩阵的高频能量, 即

$$E_{AC}^A = \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} X_A(u, v)^2, \quad (10)$$

$$E_{AC}^B = \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} X_B(u, v)^2. \quad (11)$$

其中, $(u, v) \neq (0, 0)$ 。

选择高频能量大的 DCT 系数矩阵所对应的源图像块作为融合图像的对应图像块, 即

$$x_F(i, j) = \begin{cases} x_A(i, j) & E_{AC}^A \geq E_{AC}^B \\ x_B(i, j) & \text{其他情况} \end{cases} \quad 0 \leq i, j \leq N-1, \quad (12)$$

依次对每个 $N \times N$ 的源图像块进行选择, 最后可得到完整的融合图像。

(4) 从图 1(a) 可以发现方法 3 定义的“高频”能量不完全是严格意义上的高频能量, 还包括低频和中频的能量。由于 DCT 系数矩阵的能量主要集中在其左上角, 高频系数的幅值通常要小于低、中频系数的幅值。按方法 3 求取 AC 系数的平方和后, 高频系数的能量易被低、中频系数的能量所淹没, 因而采用方法 3 定义的高频能量实际上主要反映的是 DCT 系数的低、中频能量之和。由图 1(a) 可知, 副对角线以右的系数(含副对角线上的 DCT 系数)基本上反映了 $N \times N$ 的源图像块的高频信息, 将这些系数的平方和定义为高频能量较方法 3 的定义更为准确。因此, 本文提出了一种新的高频系数能量的定义, 即

$$E_A = \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=N-u-1}^{N-1} X_A(u, v)^2, \quad (13)$$

$$E_B = \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=N-u-1}^{N-1} X_B(u, v)^2. \quad (14)$$

在实际的图像融合中, 源图像中可能存在一部分灰度均匀的区域。若仅凭 DCT 系数的高频能量对灰度变化不大的区域进行融合处理易出现误判。因此, 进行图像融合时, 先计算每个源图像块的高频能量, 若两个对应的源图像块的高频能量均小于事先设定的阈值 T 时(本文实验中 T 取为 2), 就将对应的两个源图像块的平均值作为融合图像的对应图像块, 即

若 $(E_A < T)$, $(E_B < T)$, 则

$$x_F(i, j) = 0.5 \times x_A(i, j) + 0.5 \times x_B(i, j), \quad 0 \leq i, j \leq N-1, \quad (15)$$

否则, 选择高频能量大的 DCT 系数矩阵所对应的源图像块作为融合图像的对应图像块, 即

$$x_F(i, j) = \begin{cases} x_A(i, j) & E_A \geq E_B \\ x_B(i, j) & \text{其他情况} \end{cases}$$

$$0 \leq i, j \leq N-1, \quad (16)$$

依次对每个 $N \times N$ 的源图像块融合后, 可最终得到完整的融合图像。实验结果也表明采用本方法定义的高频能量更有利于提高图像融合的质量。

在非 JPEG 等压缩格式情况下进行图像融合时, 方法 3、4 甚至不需要 DCT 逆变换, 它们的计算量较另外两种方法明显减少。因此, 方法 3、4 在实时性要求较高的场合具有更大的适用性。

对于多聚焦图像融合, 方法 4 的融合效果较方法 1、2 有很大提高。其主要原因在于方法 1、2 中融合图像的子图像块的 DCT 系数中的 AC 系数分别依据局部对比度与 AC 系数的幅值进行选择而得到, 这使得融合图像的同子图像块的 DCT 系数可能分别来自不同的源图像, 从而得到的融合图像的子图像块的清晰程度介于源图像的清晰区域与模糊区域之间, 而且容易产生块效应。方法 4 通过比较多个源图像的对应子图像块的高频能量, 选择高频能量大者为融合图像的对应子图像块, 这就尽量保证了融合图像的子图像块来自源图像的清晰区域, 所以, 方法 4 的融合效果通常优于方法 1、2。然而, 利用 DCT 变换进行图像融合时, 容易产生块效应。因此, 为了尽量消除块效应对融合图像的影响, 本文提出了一种结合小波变换与 DCT 变换的图像融合方法如下。

3.2 结合小波变换与 DCT 变换的图像融合方法

在进行图像的小波分解与重构时, 选择合适的小波基, 依照由 Mallat 提出的快速小波变换方法, 可以实现图像的小波变换及其逆变换。对二维图像进行 n 层的小波分解后, 最终可以得到 $3n + 1$ 个不同的频带, 其中有 $3n$ 个高频带和一个低频带^[11-12]。小波变换具有良好的时频局部性和多分辨率的特征, 而且小波变换后所需的存储空间大小与原图像一样, 同时小波变换提供了方向信息, 无块效应以及可以根据需要改变小波基等特点使得基于小波变换的图像融合方法成为目前研究的热点^[2-3]。

为了验证本文提出的方法的有效性, 首先回顾两种常用的基于小波变换的图像融合方法, 为了便于与前面的 4 种方法比较, 本节中的所有方法接着 3.1 节的方法依次编号。

(5) 融合图像的小波低频系数取两幅源图像小波分解后的对应小波低频系数的平均值^[1-3], 即

$$C_L^c(F, p) = 0.5 \times C_L^c(A, p) + 0.5 \times C_L^c(B, p), \quad (17)$$

式中, C 表示小波系数, F 表示融合图像, A 、 B 分别表示待融合的两幅源图像, a 表示小波分解后得到的低频带, L 表示小波分解的最高层, p 表示该系数在其所在系数矩阵中的位置。

融合后的小波高频系数取两幅源图像小波分解后的对应小波高频系数绝对值大者^[1-3], 即

$$C_l^c(F, p) = \begin{cases} C_l^c(A, p), & |C_l^c(A, p)| \geq |C_l^c(B, p)| \\ C_l^c(B, p), & |C_l^c(B, p)| > |C_l^c(A, p)| \end{cases} \quad l=1, 2, \dots, L, \quad (18)$$

其中, b 表示三个不同方向的高频带, l 表示小波分解的层数, L 表示小波分解的最高层。

(6) 文献[13]提出利用最大局部方差准则进行图像融合, 即融合时取两幅源图像小波分解后的对应小波高、低频系数的 3×3 邻域的方差大者, 即

$$C_l^d(F, p) = \begin{cases} C_l^d(A, p), & \sigma_l^d(A, p) \geq \sigma_l^d(B, p) \\ C_l^d(B, p), & \sigma_l^d(B, p) > \sigma_l^d(A, p) \end{cases} \quad l=1, 2, \dots, L, \quad (19)$$

其中, d 表示小波分解后得到的不同高、低频带, l 表示小波分解的层数。

(7) 为了充分利用了小波变换与 DCT 变换各自的特点, 本文提出了一种结合小波变换与 DCT 变换的图像融合方法。由图像小波分解的特点可知, 高层的小波系数是由其前一层低频系数分解而成。低频系数体现了图像的主要能量, 若融合时, 能对低频系数的融合有较好的方法, 则只需要较少的小波分解层数即可实现最优的融合效果。本方法对源图像小波分解得到的低频子图利用 DCT 系数的高频能量得到融合的低频子图, 同时最高分解层的小波高频系数的融合保持与小波低频系数的一致。其他分解层的小波高频系数则采用方法 6 的最大局部方差准则进行系数融合, 使得融合图像保持了源图像的清晰区域的主要细节特征。此外, 其他小波分解层的小波高频系数也可以采用其他有效的融合方法。该方法的基本原理如下:

将源图像进行小波分解得到的低频子图分成若干 $N \times N$ 的图像块, 分别对每个图像块做二维 DCT 变换。计算每个 DCT 系数矩阵的高频能量:

$$E_A^a = \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=N-u-1}^{N-1} X_A^a(u, v)^2, \quad (20)$$

$$E_B^a = \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=N-u-1}^{N-1} X_B^a(u, v)^2. \quad (21)$$

上式中, a 表示小波分解后得到的低频带。分别对源图像的小波最高分解层低频子图对应的 $N \times N$ 的 DCT 系数矩阵的高频能量进行比较, 并以此为依据将小波最高分解层各频带子图相应位置的 $N \times N$ 的子图像块进行融合, 即

$$C_L^d(F, (i, j)) = \begin{cases} C_L^d(A, (i, j)) & E_A^a \geq E_B^a \\ C_L^d(B, (i, j)) & \text{其他情况} \end{cases} \quad 0 \leq i, j \leq N-1, \quad (22)$$

其中, d 表示小波分解后得到的不同高、低频带, L 表示小波分解的最高层。依次对每个 $N \times N$ 的小波最高分解层各频带子图的子图像块进行选择, 最后可得到融合后的小波最高分解层各频带子图。

对其他分解层的小波高频系数进行融合:

$$C_l^c(F, p) = \begin{cases} C_l^c(A, p), & \sigma_l^c(A, p) \geq \sigma_l^c(B, p) \\ C_l^c(B, p), & \sigma_l^c(B, p) > \sigma_l^c(A, p) \end{cases} \quad l=1, 2, \dots, L-1, \quad (23)$$

其中, b 表示小波分解得到的不同高频带, l 表示小波分解的层数。

最后, 将融合后的小波金字塔进行小波逆变换得到重构图像, 即融合图像。该方法对多聚焦图像的融合有较好的效果。因为采用常用小波系数融合方法时, 最高分解层的高、低频系数的选择通常不一致, 例如同一个位置的低频系数与一个高频系数来自源图像 A , 而对应的另外两个高频系数却来自源图像 B , 从而得到的融合图像质量介于源图像相应位置的清晰区域与模糊区域之间。采用本文方法后, 在尽量确保低频系数来自源图像的清晰区域的同时, 保持了最高分解层的高、低频系数的一致性, 同时也避免了融合三个高频带所产生的计算量。该方法在提高图像融合质量的同时, 只需较少的小波分解层数即可实现最佳的融合效果, 同时消除了块效应对图像融合效果的影响。

4 实验及性能评价

本文实验对以上方法的融合效果通过一些图像融合质量的客观评价标准进行了比较, 用到的

评价标准有^[14-15]:平均误差 Δ , 峰值信噪比 PSNR, 以及均方根误差 RMSE。图 2(a) 为近景清晰, 远景模糊的源图像 1; 图 2(b) 为远景清晰, 近景模糊的源图像 2; 图 2(c) 为将两幅源图像的清晰部分经剪贴得到的参考图像, 其近景与远景皆清晰。图 2(d)~(j) 分别依次给出了方法 1~7 的融合图像, 其中方法 1~4, 7 中的融合图像给出了采用 8×8 的二维 DCT 变换时的融合结果。本文实验对每种基于 DCT 变换的方法分别研究了其在使用 4×4 , 8×8 以及 16×16 的二维 DCT 变换时的融合效果。图 2(h)~(j) 为方法 5~7 在其各自的最佳小波分解层获得的融合图像。本文中实验涉及到小波变换时, 均采用“bior4.4”小波基。表 1 给出了方法 1~4, 即完全基于 DCT 变换的图像融合方法获得的评价结果, 表 2 给出了方法 5~7, 即基于小波变换的图像融合方法获得的评价结果。

为了在现有方法的基础上进一步提高图像融合的质量, 在本文实验中, 利用多数滤波器 (Majority Filter) 对上述方法融合后的小波系数与图像块进行了一致性校验^[1-2]。

由于方法 1~4 采用了二维 DCT 变换, 融合图像中容易存在块效应。从图 2(d)~(f) 中可以看到, 人物的头部附近都有较明显的块效应, 而图 2(g) 无明显的块效应。图 2(h)~(j) 为方法 5~7 的融合图像, 图 2(h)、(i) 中人物头部周围存在较明显的伪影, 而图 2(j) 不存在块效应与伪影, 图像融合的效果很自然。综合考虑以上融合图像, 可以看出图 2(j) 的融合效果最好, 图 2(g) 次之, 即方法 4 与 7 的融合效果较理想。

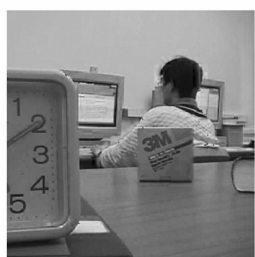
从表 1 可以看出, 方法 4 的各项评价指标普遍优于其他三种方法。比较采用同一大小的源图像块进行 DCT 变换得到的融合效果, 即 N 相同时, 方法 1~4 的性能逐渐提高, 而采用同一方法



(c) 参考图像

(d) 方法 1 的融合图像

(c) Reference image (d) Fused image of method 1



(e) 方法 2 的融合图像

(f) 方法 3 的融合图像

(e) Fused image of method 2 (f) Fused image of method 3



(g) 方法 4 的融合图像

(h) 方法 5 的融合图像

(g) Fused image of method 4 (h) Fused image of method 5



(i) 方法 6 的融合图像

(j) 方法 7 的融合图像

(i) Fused image of method 6 (j) Fused image of method 7

图 2 源图像及其融合结果

Fig. 2 Original images and its fusion results



(a) 源图像 1

(b) 源图像 2

(a) Original image 1

(b) Original image 2

时, 随着 N 的增加, 图像的融合效果也在提高。但并不是 N 越大越好, N 越大时, 变换后的 DCT

系数矩阵反映的就是更大区域的频率信息。对方法 3、4 而言,这就容易使得融合图像的子图像块同时包括源图像的清晰区域与模糊区域。此时虽然融合图像的客观评价结果可能有一定的提高,但其主观评价结果反而有可能下降。此外,当 N 的取值增加时,不利于在 JPEG 等压缩格式下进行实时融合处理。因此, N 的取值不易过大。

由表 2 可知,方法 7 的各项评价指标明显优于方法 5 和 6 这两种常用的基于小波变换的图像融合方法,其中平均误差减少了 40.8%~69.5%,峰值信噪比提高了 9.9%~15.6%,均方根误差减少了 34.8%~47.5%。

表 1 基于 DCT 的图像融合方法评价结果

Tab.1 Evaluation results of the methods based on DCT

Criteria Methods	Sizes of the block	Δ	PSNR	RMSE
1	4×4	4.39090	28.755	9.3068
	8×8	3.90170	30.447	7.6589
	16×16	3.58030	31.848	6.5185
2	4×4	3.00880	32.561	6.0047
	8×8	2.89010	33.133	5.6218
	16×16	2.86140	33.675	5.2818
3	4×4	0.97469	34.454	4.8286
	8×8	0.76115	34.506	4.7998
	16×16	0.35735	39.958	2.5623
4	4×4	0.56022	38.541	3.0165
	8×8	0.39415	40.503	2.4066
	16×16	0.36543	41.194	2.2224

综合表 1 与表 2 的数据可知,方法 7 的融合效果除了平均误差略高于方法 4 以及方法 3 在采用 16×16 二维 DCT 变换时得到的融合效果,其各项评价指标均优于其他方法。总的来说,在本文讨论的所有方法中方法 7 最优,方法 4 仅次于方法 7,这与前面得到的主观评价一致。从表 1 与表 2 的数据还可以看出,用方法 4 得到的融合

图像的各项评价指标均明显优于方法 5、6 等常用的基于小波变换的融合方法。以方法 4 采用 8×8 的二维 DCT 变换得到的融合效果为例,方法 4 的各项评价指标与方法 5、6 相比,其平均误差减少了 64.5%~81.7%,峰值信噪比提高了 7.5%~13.1%,均方根误差减少了 27.6%~41.8%。

表 2 基于小波变换的图像融合方法评价结果

Tab.2 Evaluation results of the methods based on wavelet transform

Criteria Methods	Δ	PSNR	RMSE
5	2.15220	35.808	4.1320
6	1.10990	37.692	3.3263
7	0.65651	41.408	2.1683

5 结 论

本文提出了一种基于 DCT 变换以及一种结合小波变换与 DCT 变换的图像融合新方法。依据主客观评价,本文提出的基于 DCT 变换的图像融合方法的融合效果优于常用的一些基于小波变换或 DCT 变换的图像融合方法。DCT 变换计算相对简单,不需要多分辨率算法的复杂计算,可用专门的硬件实现 DCT 变换的快速算法。对于采用 JPEG 等图像压缩格式的源图像进行融合时,可直接在压缩域进行图像融合。本文提出的基于 DCT 变换的图像融合方法适用于实时性要求较高的场合。本文提出的结合小波变换与 DCT 变换的图像融合方法在本文所讨论的图像融合方法中取得了最佳融合效果,表明该方法能有效提高图像融合的质量。此外,本文提出的 DCT 系数高频能量的定义是否可有效的用于自动聚焦判据有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] ZHANG ZH, BLUM R S. A Categorization of multiscale-decomposition-based image fusion schemes with a performance study for a digital camera application[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1999, 87(8): 1315-1326.
- [2] LI H, MANJUNATH B S, MITRA S K. Multisensor image fusion using the wavelet transform[J]. *Graphical Models and Image Processing*, 1995, 57(3):235-245.
- [3] PAJARES G, CRUZ J M. A wavelet-based image fusion tutorial[J]. *Pattern Recognition*, 2004, 37(9): 1855-

1872.

- [4] 陈洪波,王强,张孝飞,等. 基于小波系数邻域特征的图像融合[J]. 光学精密工程, 2003, 11(5): 516-522.
CHEN H B, WANG Q, ZHANG X F, *et al.* Image fusion based on neighborhood features of wavelet coefficients [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(5): 516-522. (in Chinese)
- [5] 孙辉. 基于小波变换的图像数据融合方法[J]. 光学精密工程, 2000, 8(6): 551-553.
SUN H. Data fusion for image based on wavelet transform[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(6): 551-553. (in Chinese)
- [6] 刘艳,李宏东. DCT 域图象处理和特征提取技术[J]. 中国图象图形学报, 2003, 8(2): 121-128.
LIU Y, LI H D. Image and video processing techniques in the DCT domain[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2003, 8(2): 121-128. (in Chinese)
- [7] JIANG J M, FENG G C. The spatial relationship of DCT coefficients between a block and its sub-blocks[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, 50(5): 1160-1169.
- [8] TANG J SH. A contrast based image fusion technique in the DCT domain[J]. *Digital Signal Processing*, 2004, 14(3): 218-226.
- [9] 吴乐南. 数据压缩[M]. 北京:电子工业出版社, 2000.
WU L N. *Data compression*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000. (in Chinese)
- [10] 谢攀,张利,康宗明,等. 一种基于尺度变化的 DCT 自动聚焦算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 43(1): 55-58.
XIE P, ZHANG L, KANG Z M, *et al.* Window scale-based automatic focus algorithm using DCT transformation [J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2003, 43(1): 55-58. (in Chinese)
- [11] MALLAT S G. A Theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 11(7): 674-693.
- [12] MALLAT S G. Multifrequency channel decompositions of images and wavelet models[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1989, 37(12): 2091-2110.
- [13] 强赞霞,彭嘉雄,王洪群. 基于小波变换局部方差的遥感图像融合[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(6): 89-91.
QIANG Z X, PENG J X, WANG H Q. Remote sensing image fusion based on local deviation of wavelet transform [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2003, 31(6): 89-91. (in Chinese)
- [14] 李树涛,王耀南,龚理专. 多聚焦图像融合中最佳小波分解层数的选取[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(6): 45-48.
LI SH T, WANG Y N, GONG L ZH. Selection of optimal decomposition level of wavelet for multifocus image fusion[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2002, 24(6): 45-48. (in Chinese)
- [15] 陈木生,狄红卫. 多聚焦图像融合的最佳小波分解层研究[J]. 光电工程, 2004, 31(3): 64-67.
CHEN M SH, DI H W. Study on optimal wavelet decomposition level for multi-focus image fusion[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(3): 64-67. (in Chinese)

作者简介:楚 恒(1976—),男,四川渠县人,博士研究生,主要从事图像处理、小波变换的研究。E-mail: chuheng2000@163.com