

基于二次成像与清晰度差异的多聚焦图像融合^{*}

苗启广^{1,2} 王宝树¹

(西安电子科技大学计算机学院 西安710071)¹ (桂林电子工业学院 桂林541004)²

摘要 本文提出了一种基于清晰度差异的不同聚焦点图像的融合方法。该方法首先选择了一种基于梯度向量模方的清晰度定义,然后根据几何光学系统的成像模型,以及点扩散函数的作用效果提出了模拟光学系统的二次成像模型。然后根据二次成像前后各图像清晰度的差异情况,对各幅图像中的目标进行判断,并选择其中的清晰部分生成融合图像。实验结果表明,该方法可以提取出多聚焦图像中的清晰目标,生成的融合图像效果优于 Laplacian 塔型方法和小波变换方法。

关键词 清晰度,点扩散函数,二次成像,图像融合,模糊

Multi-Focus Image Fusion Based on Second Imaging and Difference of Clarity

MIAO Qi-Guang^{1,2} WANG Bao-Shu¹

(School of Computer Science, Xidian University, Xi'an 710071)¹ (Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004)²

Abstract A new multi-focus image fusion algorithm is given in this paper. It is based on the difference of clarity. A definition of clarity based on the sum of square of gray-level gradient vector module is chosen. Through analyzing the model of geometry optical system imaging and the effect of point spread function, a simulated second imaging model of optical system is proposed. After the second imaging, the clear region in the image will be blurred and the blur region will be blurred more. The clear region is decided by comparison of the difference of clarity of each pixel, between the two different focus images and their second imaging images. Through this way, the clear region of each original image is decided automatically, and merged into the fused image. Experiments show that the proposed algorithm works better in preserving edge and texture information than that of the other image fusion methods in multi-focus image fusion.

Keywords Clarity, Point spread function, Second imaging, Image fusion, Blur

1 引言

图像融合是多传感器信息融合的一个重要分支,已经广泛应用于机器视觉、医疗诊断、军事、遥感等领域^[1~3]。图像融合是通过采用一定的算法,将从不同传感器得到的两个或多个具有互补性的源图像进行综合处理得到一幅融合的新图像,从而使融合后的图像具有更高的可信度和清晰度、更好的可理解性^[1]。多聚焦图像融合是图像融合的一个研究方向,所谓多聚焦图像融合指的是将两幅(或多幅)已经配准的、成像条件相同而且关于同一场景的不同焦点图像,融合成一幅比原图像都清晰的图像。

图像融合中具有代表性的方法主要是简单平均法、Laplacian 塔型方法和小波变换方法。简单平均法是将各幅图像相应位置的灰度值进行加权平均,方法简单、处理效率高但处理效果不够理想。Laplacian 塔型方法是在不同的空间频带上进行融合处理,适用场合广,其缺点是分解时有冗余、层间分解量之间具有一定的相关性,影响了融合效果。小波变换法具有良好的空域和频域的局域性,可以较好地保留多聚焦图像的高频信息,但仍一定程度上会丢失原始图像中的一些特征信息(如边缘信息等)。

在多聚焦图像融合中,参与融合的两幅源图像用同一相机获取,其中一幅聚焦前景,另一幅聚焦背景,因此这两幅源

^{*} 本文获得国防科技预研基金项目(51406050301DZ0107)资助。苗启广 教授,博导,主要研究方向:数据融合、智能信息处理等。

讲师,博士生,主要从事智能信息处理与模式识别、图像融合等方面的

入噪音,因此基图像的特征点会受到引入噪音的干扰。作者正在研究将基于 Overcomplete ICA 的特征提取方法与 SVM 分类器进行结合,提出一种新的人脸识别过程。另外,使用 Overcomplete ICA 进行特征提取的过程中如何选取合适的才能使识别的效果达到最佳,也是一个值得深入研究的问题。

参考文献

- Lewicki M S, Sejnowski T J. Learning Overcomplete Representations. Neural Computation, 1998
- Lee T-W, Lewicki M S, Giorlami M. Blind Source Separation of More Sources Than Mixture Using Overcomplete Representations. IEEE Signal Processing Letters, 1999, 6(4): 87~90
- Theis F J. A Geometric Algorithm For Overcomplete Linear ICA

- Waheed K, Salem F M. Algebraic Independent Component Analysis: An Approach for Separation of Overcomplete Speech Mixtures. IEEE (2003), 775~780
- Scott, Chen S B, Donoho D L, Saunders M A. Atomic Decomposition by Basis Pursuit
- Olshausen B A, Field D J. Sparse Coding with an Overcomplete Basis Set: A Strategy Employed by V1?. Elsevier Science, 1997, 37(23): 3311~3325
- Bartlett M S. Face Recognition by Independent Component Analysis. IEEE Trans On Neural Networks, 2002, 13(6)
- Vapnik V. The Nature of Statistical Learning Theory. Springer, New York, 1995
- Davies M, Mitianoudis N. Simple mixture model for sparse overcomplete ICA. IEEE Proc. -Vis Image Signal Process, 2004, 151(1)
- 江宇刚, 黄榕波, 朱思铭. 基于 Overcomplete ICA 的声音压缩模型. 计算机科学, 2005, 32(4)

图像中各对应区域有完全相反的清晰度。如果把每幅图像的清晰区域都提取出来,并融合到同一幅新图像中,那么这幅新图像将是全局清晰的。在一幅源图像中,如果一个物体被聚焦,那么对应的特征都表现为清晰显著的;反之,则是模糊的。因此,检测并判断出清晰的特征,即可找出聚焦的区域,这就是本文融合方法的理论基础。但是,有时候图像某区域中的模糊特征不够明显,如果能够对这些模糊特征进一步模糊,使清晰的部分变模糊,而原本模糊的区域更加模糊,根据区域清晰度变化的差异情况作为融合的判决依据,这样在融合过程中能够更加清楚地确定源图像中的模糊区域和清晰区域,从而获得更为理想的融合图像。实验结果表明,与简单平均方法、Laplacian 塔型融合方法和小波变换的图像融合方法相比较,该方法的融合结果更接近于理想的真实图像。

2 多聚焦图像融合方法

2.1 清晰度的定义

人眼视觉对于边缘细节分明的区域分辨清楚,对于边缘细节不分明区域分辨不出来。图像的这种边缘细节清楚和不清楚的特性可以使用图像的清晰度来表示。对一幅数字图像,通常使用梯度的模来定义图像的清晰度,梯度的模的定义如式(1)所示:

$$|\nabla f(x,y)| = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

用差分代替微分,则梯度的模为:

$$|\nabla f(x,y)| = \left[[f(x,y) - f(x+1,y)]^2 + [f(x,y) - f(x,y+1)]^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

对于整幅图像的清晰度,用梯度的模定义为^[4]:

$$C_1 = \left(\sum_{(x,y) \in W} [f(x,y) - f(x+1,y)]^2 + [f(x,y) - f(x,y+1)]^2 \right)^{1/2} \quad (3)$$

式(3)中, W 表示整个图像窗口, $x=1 \cdots M, y=1 \cdots N, M$ 和 N 分别为图像的高度和宽度。

对于图像中某像素点处的清晰度,定义为以该像素为中心的窗口 w 的清晰度:

$$C_2 = \sum_{(x,y) \in w} \left\{ [f(x,y) - f(x+1,y)]^2 + [f(x,y) - f(x,y+1)]^2 \right\}^{1/2} \quad (4)$$

也可以定义为以该像素为中心的窗口 w 内的图像灰度梯度向量模方和作为该像素点处的清晰度:

$$C_3 = \sum_{(x,y) \in w} \left\{ [f(x,y) - f(x+1,y)]^2 + [f(x,y) - f(x,y+1)]^2 \right\} \quad (5)$$

C_3 反映了图像窗口内的灰度变化率大小。图像窗口越模糊,图像中灰度变化率越小, C_3 的值越小,反之,图像窗口越清晰,图像中灰度变化率越大, C_3 的值越大。文[5]中已经验证,使用 C_3 图像灰度梯度向量模方和作为像素点处清晰度评价函数效果更理想。本文中 C_3 作为图像中某像素点处的清晰度评价标准。

2.2 点扩散函数 PSF 与模拟二次成像系统模型

在几何光学系统中,假设输入目标函数为 $f(x,y)$,成像目标函数为 $g(x,y)$,其二维线性移不变系统可以表示为:

$$g(x,y) = h(x,y) * f(x,y) + n(x,y) \quad (6)$$

式(6)中, $n(x,y)$ 为随机噪声函数, $h(x,y)$ 为成像系统的脉冲响应,又称为点扩散函数 PSF^[6]。点扩散函数表示了一个二维线性移不变光学系统对某个目标的成像效果,或者说,清晰图像的获得依赖于点扩散函数 $h(x,y)$ 。对于成像的某个目标而言, $h(x,y)$ 可以用一个方差为 σ 的高斯函数 $G_\sigma(x,y)$ 来近似,其中,方差 σ 决定了光学系统对于该目标的模糊程度。 σ 越

大,则成像越模糊,当 σ 较大时,PSF 相当于一个平滑函数;反之, σ 越小,成像越清晰,当 σ 较小时,PSF 相当于一个冲激函数 $\delta(x,y)$ ^[7]。基于这个原理,可以通过对一幅图像与一个方差为 σ_0 的高斯函数进行卷积运算来模拟一个光学系统的成像。同样,也可以将已经通过光学系统成像的图像与方差为 σ_1 的高斯函数进行卷积运算来模拟光学系统的再成像,我们称为二次成像。这时,整个成像过程的方差 σ 变大了,变成了 $\sigma = \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_1^2}$,这样,二次成像的图像比第一次成像的图像变得模糊。而且,对于一次成像图像中原本清晰的部分,二次成像图像会变得比原来模糊一些,原本模糊的部分,变得更加模糊。这样,二次成像的整个系统模型可以表示为:

$$g_1(x,y) = h_0(x,y) * h(x,y) * f(x,y) + h_0(x,y) * n(x,y) \\ = h_1(x,y) * f(x,y) + n_1(x,y) \quad (7)$$

其中, $h_1(x,y) = h_0(x,y) * h(x,y), n_1(x,y) = h_0(x,y) * n(x,y)$ 。

2.3 根据清晰度差异判定清晰目标和模糊目标

由前面清晰度的定义和模拟图像二次成像的原理分析,可以根据两次成像后对应像素点处的清晰度的变化情况来看判断该点处目标是清晰的还是模糊的。假设两幅不同焦点的图像分别为 A 和 B ,经过一个方差为 σ_1 的高斯函数平滑后,得到钝化图像 $A1$ 和 $B1$ 。下面分析每一个像素邻域窗口内的清晰度情况,来确定该像素是处于清晰目标还是模糊目标。假设该像素在图 $A, B, A1, B1$ 中的清晰度分别为 $CA, CB, CA1, CB1$,则通常存在三种情况:

- 1) 若目标在 A 中清晰,在 B 中模糊,则在 $B1$ 中更加模糊,此时 $B1$ 和 A 的清晰度差异大于 A 和 B 的清晰度差异;而且 $A1$ 和 B 的清晰度差异小于 A 和 B 的清晰度差异;
- 2) 若目标在 A 中模糊,在 B 中清晰,则在 $A1$ 中更加模糊,此时 $A1$ 和 B 的清晰度差异大于 A 和 B 的清晰度差异;而且 $B1$ 和 A 的清晰度差异小于 A 和 B 的清晰度差异;
- 3) 若目标在 A 和 B 中均清晰或者均模糊,或者清晰度差异不大,此时 $A1$ 和 $B, B1$ 与 A 的清晰度差异与二次成像时的高斯函数所使用的方差 σ_1 有关。

另外,二次成像的过程实际放大了原来图像中目标清晰程度的差异,原本清晰度差异不大的目标,由于此放大作用,清晰度差异变得更加明显而且易于辨别。基于此,上面分析中的第三种情况,可以用二次成像后该目标的清晰度情况来判断清晰目标是在 A 中还是在 B 中。

根据上面的分析,就可以进行目标清晰区域位于 A 中还是在 B 中的判断了:

- 1) 若 $|CB1 - CA| > |CA - CB|$ 且 $|CA1 - CB| < |CA - CB|$,则目标在 A 中;
- 2) 若 $|CA1 - CB| > |CA - CB|$ 且 $|CB1 - CA| < |CA - CB|$,则目标在 B 中;
- 3) 其它情况下,若 $CA1 > CB1$,则目标在 A 中,否则,目标在 B 中。

3 实验效果与分析

为了对本文提出的方法进行不同焦点图像融合来量化测量,选择了常用的 clock 图像,如图 1.a 所示。然后分别选择左边和右边两个聚焦点,对其进行高斯模糊处理,得到两幅不同聚焦点图像,如图 1.b 和 1.d 所示。图 1.b 聚焦在右边的闹钟上,右边大闹钟清晰,左边的小闹钟模糊;图 1.d 聚焦在左边的闹钟上,右边大闹钟模糊,左边的小闹钟清晰。

对图 1.b 和图 1.d 使用方差 σ_1 的高斯平滑函数进行二次成像,得到图 1.c 和图 1.e。使用本文的方法,对这两幅已经对

准了的不同聚焦点图像进行融合,融合结果如图1.i所示。为了进行比较,还选择了简单加权平均法、小波变换方法和Laplacian金字塔方法分别进行融合处理。图1.f是简单平均法得到的融合结果,图1.g是采用Laplacian金字塔方法得到融合结果,图1.h是采用8层haar小波分解,对于高频层采用取极大值方法,低频层采用平均的融合方法得到的融合结果。

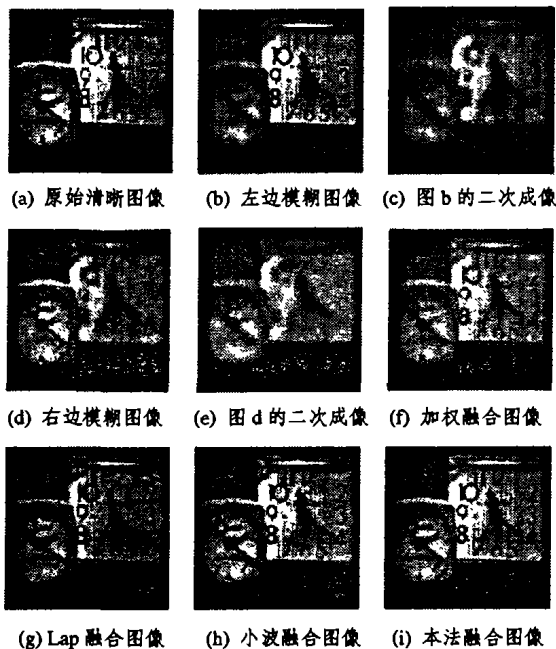


图1 原始图像和二次成像以及融合效果图

从仿真结果可以看出,本文的方法明显比其它三种方法好些,采用简单平均法和Laplacian塔型方法的结果明显不如小波方法和本文方法。

由于有标准原始图像,我们采用均方误差(MSE)作为评价融合效果的标准,融合图像 F 与理想图像 R 的均方误差为:

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [R(i,j) - F(i,j)]^2 \quad (8)$$

式(8)中, M 和 N 分别是图像的宽度和高度, $F(i,j)$ 是融合结

果图像在坐标 (i,j) 处的像素值, $R(i,j)$ 是原始清晰图像在坐标 (i,j) 处的像素值。MSE越小,说明融合效果越好,反之,则融合效果越差。上述四种融合算法的实验结果如表1所示。

表1 四种融合算法的客观评价测度值

	简单平均法	Laplacian塔型	小波变换方法	本文方法
MSE	134.2078	84.3376	25.0868	9.4985

从表中可以看出,本文的方法均方误差最小,小波方法次之,简单平均方法最大,这说明本文方法优于其它几种方法。

结论 本文提出了一种基于图像的模拟二次成像以及二次成像前后对清晰度的差异进行多聚焦图像融合的方法。通过分析光学系统成像的基本模型和清晰度的计算方法,提出了模拟光学系统成像的二次成像的方法,并对二次成像前后清晰度的差异情况进行了分析,分析出了每种情况下如何判定清晰目标的位置。

本文方法是基于空域的处理,不需要进行任何分解,而Laplacian方法和小波方法都是基于频域的处理,必须进行多级分解才能够提取出有效的清晰区域,分解、系数分析处理以及重构都不可避免会损失一些有用信息,或者产生一些相关冗余信息,这些都是本文方法不会存在的问题。实验结果证明,通过本文方法,最大可能地保留了各幅图像中的清晰区域及其各种特征信息,具有比其它几种方法更好的融合效果。

参考文献

- Aggarwal J K. Multisensor fusion for Computer Vision [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1993
- Varshney P K. Multisensor data fusion [J]. Electron. Commun. Eng. J., 1997, 9(12): 224~253
- Hall D L, Linares J. An introduction to multisensor data fusion [J]. Proc. IEEE, 1997, 85(1): 6~23
- 刘贵喜. 多传感器图像融合方法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2001
- 曹茂永, 孙农亮, 郁道银. 高焦模糊图像清晰度评价函数的研究 [J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(3. 增刊): 259~260
- 徐飞, 施晓红. MATLAB应用图像处理 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002
- 杨旭, 杨万海, 裴继红. 基于小波分解的不同聚焦点图像融合方法 [J]. 电子学报, 2001, 29(6): 846~848
1998. 103~112
- Yao X, Lin G, Liu Y. An Analysis of Evolutionary Algorithms Based on Neighborhood and Step Size. In: Proc. of the 6th Annual Conf. on Evolutionary Programming, Lecture Notes in Computer Science Vol. 1213, Springer-Verlag, 1997. 297~307
- Matsumura Y, Ohkura K, Ueda K. Evolutionary Programming with Non-Coding Segments for Real-valued Function Optimization. In: Proc. of IEEE Intl. Conf. on Systems, Man and Cybernetics (SMC'99), 1999, 4: 242~247
- Ohkura K, Matsumura Y, Ueda K. Robust Evolution Strategies. Applied Intelligence, Kluwer Academic Publishers, accepted for publication, 2002
- Matsumura Y, Ohkura K, Ueda K. Evolutionary Dynamics of Evolutionary Programming in Noisy Environment. In: Proc. of Congress on Evolutionary Computation (CEC2001), 2001. 17~24
- Saravanan N, Fogel D B. Multi-Operator Evolutionary Programming: A Preliminary Study on Function Optimization. In: Proc. of the 6th Annual Conf. on Evolutionary Programming, Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, 1997, 1213: 215~221
- Wreenwood G G, Zhu Q J. Convergence in Evolutionary Programs with Self-Adaptation. Evolutionary Computation, MIT Press, 2002, 2(11): 147~157
- Rudolph G. Self-adaptation and Global Convergence: a Counterexample. In: Proc. of Cong. on Evol. Comp. 1999. 646~651
- Rudolph G. Self-Adaptive Mutations May Lead to Premature Convergence. Evolutionary Computation, IEEE Transactions on Publication, 2001, 5: 410~414

参考文献

- Fogel L J, Owens A J, Walsh M J. Artificial Intelligence Through Simulate Evolution. John Wiley, Chichester, UK, 1996
- Yao X, Liu Y, Lin G. Evolutionary Programming Made Faster. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1999, 3(2): 82~102
- Yao X, Liu Y. Scaling up Evolutionary Programming Algorithms. In: Proc. of the 7th Annual Conf. on Evolutionary Programming,