

# 一种新的 X 射线手提行李图像增强方法

贺秀萍 韩萍 吴仁彪 卢晓光

(中国民航大学智能信号与图像处理天津市重点实验室, 天津 300300)

**摘要** 针对 X 射线图像的特点, 提出了一种新的 X 射线手提行李图像增强方法。首先, 应用离散小波变换 (DWT) 对图像进行去噪、融合, 然后, 结合模糊理论在模糊空间实现图像增强。同时将本文方法与基于灰度分组 (GLG) 的增强方法、基于直方图均衡 (HE) 的增强方法做了比较, 实验结果表明, 本文方法可以有效地提高图像的清晰度, 具有较好的推广能力。

**关键词** X 射线图像 图像融合 小波变换 模糊增强

**中图法分类号:** TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2009)05-866-05

## A New Enhancement Technique of X-ray Hand Luggage Images

HE Xiu-ping, HAN Ping, WU Ren-biao, LU Xiao-guang

(Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300)

**Abstract** A new combinational scheme based on fusing and enhancing dual-energy X-ray hand luggage images is proposed in terms of X-ray image features. First, images are de-noised and fused with DWT (discrete wavelet transform), and then enhanced in fuzzy space with fuzzy theory. The proposed method in this paper is compared with that based on GLG (gray level grouping) and HE (histogram equalization). Experimental results show that the new method can improve the image definition efficiently and have better generalization.

**Keywords** X-ray images, image fusion, wavelet transform, fuzzy enhancement

## 1 引言

机场行李检测系统在保证机场和旅客乘机安全方面至关重要。安检员通过安检设备监视器上的行李图像, 确认旅客行李中是否藏有危险品, 如刀具、枪支等。目前大多数机场行李检查设备都利用双重能量 X 射线成像原理。它使用了两种不同能量的 X 射线, 其中, 高能量 X 射线由超过 100 kV 的正电压生成, 穿透物体时, 材料的密度越高 (如金属刀具等), 成像越暗。低能量 X 射线由 80 kV 左右的正电压生成, 能检测物质的有效原子数和物体的厚度, 例如炸药中的炭、氮、氧等。

通常情况下, 安检人员在监视行李图像时, 主要是观察高低能量图像的融合图像, 以便提高检查速度, 当图像不清晰或发现可疑物品时, 再分别观察高低能图像。若采用图像增强方法将融合图像质量进一步提高, 可以更好地提高安检人员的检查效率, 减轻其疲劳程度。传统的图像增强方法对所有灰度层次都进行同样的运算, 得到的图像灰度层次不够清晰, 边缘较模糊。而且 X 射线行李图像的灰度分布过于集中, 对比度低, 细节不易观察, 用一般的方法难以取得好的效果。Tennessee 大学采用了基于灰度分组 (GLG) 的增强方法<sup>[1]</sup>, 该方法首先基于小波进行图像融合, 接着减去背景噪声, 然后将图像中像素数最少的灰度级合并为一组, 循环数次后, 建立增

**基金项目:** 国家杰出青年基金项目 (60325102); 海外杰出青年学者合作研究基金项目 (60428101)

**收稿日期:** 2007-10-10; **改回日期:** 2007-12-12

**第一作者简介:** 贺秀萍 (1984 ~ ), 女。中国民航大学信号与信息处理专业在读硕士研究生。从事图像处理方向研究。

E-mail: hxpeauc@163.com

强函数,将图像中每一像素的灰度值逐一转换。增强后图像的质量有了很大改善,但对对比度偏低,细节仍不够清楚。

小波变换具有时频局部化能力和多分辨率分析能力,对图像进行多尺度分解后,细节可以看得更清楚,用于图像融合时,能更好地保持原始图像的细节。而模糊理论能表示不确定性,且在图像增强时,对图像中不同层次的灰度值进行不同的运算处理,使得在图像增强的同时,能很好地保持细节信息,图像灰度层次也比较清晰。

针对 X 射线图像的特点,提出了一种新的双重能量 X 射线手提行李图像增强方法。首先利用小波变换把高低能量图像融合为一幅图像,然后利用模糊理论进行增强处理。实验结果表明,该方法可以有效地提高图像的清晰度,具有较好的推广能力。

## 2 离散小波变换

设 2 维离散小波变换的尺度函数为

$$\phi(x, y) = \phi(x)\phi(y) \quad (1)$$

式中,  $\phi(\cdot)$  为 1 维多分辨率分析的尺度函数。

2 维离散小波变换的 3 个小波函数如下:

$$\begin{cases} \psi_1(x, y) = \phi(x)\psi(y) \\ \psi_2(x, y) = \psi(x)\phi(y) \\ \psi_3(x, y) = \psi(x)\psi(y) \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\psi(\cdot)$  为 1 维小波函数。

对于 2 维能量有限信号  $f(x, y) \in L^2(\mathbf{R}^2)$ , 其离散小波分解为

$$A_{2^j}^d f = (\langle f(x, y), \phi(2^j x - 2^{-j} y) \phi(2^j y - 2^{-j} m) \rangle)_{(m, n) \in \mathbf{Z}^2} \quad (3)$$

$$D_{2^j}^1 f = (\langle f(x, y), \phi(2^j x - 2^{-j} n) \psi(2^j y - 2^{-j} m) \rangle)_{(m, n) \in \mathbf{Z}^2} \quad (4)$$

$$D_{2^j}^2 f = (\langle f(x, y), \psi(2^j x - 2^{-j} n) \phi(2^j y - 2^{-j} m) \rangle)_{(m, n) \in \mathbf{Z}^2} \quad (5)$$

$$D_{2^j}^3 f = (\langle f(x, y), \psi(2^j x - 2^{-j} n) \psi(2^j y - 2^{-j} m) \rangle)_{(m, n) \in \mathbf{Z}^2} \quad (6)$$

式中,  $A_{2^j}^d f$  代表分辨力  $2^j$  下的低频系数,  $D_{2^j}^1 f, D_{2^j}^2 f$  和  $D_{2^j}^3 f$  分别代表分辨力  $2^j$  下水平、垂直和对角线方向的高频系数。

## 3 模糊图像增强

定义论域  $U$  上广义模糊集合为

$$A = \int_{x \in U} \mu_A(x)/x \text{ 或 } A = \{(\mu_A(x), x \in U)\} \quad (7)$$

式中,  $\mu_A(x) \in [-1, 1]$  称为  $U$  上  $A$  的广义隶属度函数。

若  $U$  是由有限个元素构成的有限域, 则广义模糊集合  $A$  也是有限的,

$$\begin{aligned} A &= \frac{\mu_A(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_A(x_2)}{x_2} + \dots + \frac{\mu_A(x_n)}{x_n} \\ &= \bigcup_{i=1}^n \frac{\mu_A(x_i)}{x_i} \end{aligned} \quad (8)$$

式中,  $\mu_A(x_i)$  称为元素  $x_i$  对于  $A$  的广义隶属度<sup>[2]</sup>。广义模糊集合将普通模糊集合的隶属度值域由  $[0, 1]$  扩充到  $[-1, 1]$ , 有更大的拉伸和变换范围。

像普通集合一样, 模糊集运算满足自反律、反对称律、传递律、交换律、结合律、吸收律、分配律等。

图像可以看作是一个广义模糊集

$$X = \bigcup_{i=1}^M \bigcup_{j=1}^N u_{ij}/x_{ij} \quad (9)$$

式中,  $u_{ij}$  为广义隶属度函数,  $x_{ij}$  为像素  $x(i, j)$  的灰度,  $M$  和  $N$  分别为图像的长度和宽度。

利用隶属度函数  $u_{ij}$  把图像由空间域映射到广义模糊域, 然后在广义模糊空间中根据模糊增强函数  $u'_{ij}$  进行非线性变换, 即针对不同的区域利用不同的函数增强, 实现对不同层次灰度值的不同运算处理, 最后将其转换回灰度空间, 就可以得到增强后的图像<sup>[3]</sup>。

## 4 算法描述

假设  $L$  代表行李的低能量 X 射线图像,  $H$  代表相应的高能量 X 射线图像,  $F$  代表融合后的图像。算法流程图如图 1 所示。

首先进行融合, 按信息抽象的程度, 图像融合分为像素级融合、特征级融合、决策级融合 3 个结构层次。由 X 光机得到的高低能量图像是完全匹配的, 采用像素级融合方法, 对  $L$  和  $H$  中一一对应的像素分别做对应处理, 处理步骤<sup>[4]</sup>如下:

(1) 小波分解 分别对  $L$  和  $H$  进行多尺度离散小波变换 (DWT), 得到低频系数和低频系数。

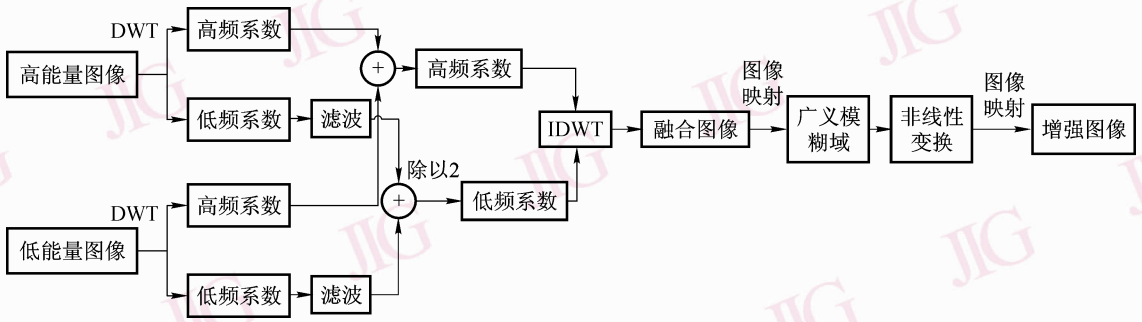


图 1 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of the algorithm

(2) 分别对  $L$  和  $H$  的低频系数应用低通滤波器, 滤除图像中的一些高频噪声, 以便使图像中的主要特征更容易观察, 接着对  $L$  和  $H$  相应的低频系数取平均, 得到新的低频系数。分别把  $L$  和  $H$  相应的高频系数相加, 得到新的高频系数, 以便把  $L$  或  $H$  中特有的细节都合并到融合图像里, 而且使两幅图像中共有的细节在融合图像中更显著。

(3) 小波重构 对步骤 2 中得到的新的低频系数和高频系数应用 IDWT, 得到融合后的图像  $F$ 。

然后利用模糊理论进行图像增强, 步骤如下所示:

(4) 利用文献 [3] 中正弦隶属度函数的改进函数  $u_{ij}$ , 把图像转换到广义模糊域

$$u_{ij} = T(x_{ij}) = \left[ \sin\left(\frac{x_{ij} - d}{x_{\max} - d} \times \frac{\pi}{2}\right) \right]^r \quad (10)$$

该函数比 Pal. King 算法 [5] 中的幂函数更能提高计算速度, 并且可以减少灰度阶数信息的丢失。其中,  $r$  为迭代次数, 参数  $d$  满足  $x_{\min} \leq d \leq \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}$ ,  $x_{\max}$ ,  $x_{\min}$  分别是图像灰度的最大值和最小值;

(5) 结合文献 [2] 中的模糊增强函数和 Pal. King 算法中的非线性变换式,

$$P'_{ij} = Tr(P_{ij}) = \begin{cases} \sqrt{1 - (1 + P_{ij})^2} & -1 \leq P_{ij} \leq 0 \\ (P_{ij})^2 & 0 \leq P_{ij} < r \\ \sqrt{1 - 2(1 - P_{ij})^2} & r \leq P_{ij} \leq 1 \end{cases} \quad (11)$$

$$T_1(u_{mn}) = \begin{cases} 2(u_{mn})^2 & 0 < u_{mn} < 0.5 \\ 1 - 2(1 - u_{mn})^2 & 0.5 \leq u_{mn} \leq 1 \end{cases} \quad (12)$$

提出新的非线性变换公式,

$$u'_{ij} = Tr(u_{ij}) = \begin{cases} 1 - (1 + u_{ij})^2 & -1 \leq u_{ij} < 0 \\ 2(u_{ij})^2 & 0 \leq u_{ij} < 0.5 \\ 1 - 2(1 - u_{ij})^2 & 0.5 \leq u_{ij} \leq 1 \end{cases} \quad (13)$$

以更好地对图像中不同层次的灰度值进行不同的运算处理;

(6) 据下式将其转换回灰度空间。

$$x'_{ij} = T^{-1}(u'_{ij}) = (x_{\max} - d) \times \arcsin\left(\sqrt{u'_{ij}}\right) \times \frac{2}{\pi} + d \quad (14)$$

## 5 实验结果及分析

小波变换和模糊理论可以分别用于对普通图像的处理, 但目前还没有作为一种联合方法应用到 X 射线图像处理中。将其用于对 X 射线手提行李图像的增强, 实验数据使用 Tennessee 大学提供的图像 [4], 如图 2(a)、图 2(b) 以及图 3(a)、图 3(b) 所示。

图 2(a)、图 2(b) 融合后的结果如图 2(c) 所示, 图 3(a)、图 3(b) 融合后的结果如图 3(c) 所示。在上述过程中, 选择满足正交性且变换后带有图像边缘信息的小波基 bior1.3, 为了保留足够的细节信息, 并防止层数太多导致图像粗糙且计算量增大, 分解层数选为 4。

对融合图像做增强处理时,  $r$  取为 1,  $d$  取为 15, 结果如图 2(f)、图 3(f) 所示。为了说明本文方法的有效性, 我们将直方图均衡化算法 (HE) [6] 和基于灰度分组的方法 (GLG) 也应用于融合后的图像, 结果分别显示于图 2(d)、图 2(e) 和图 3(d)、图 3(e) 中。

可以看出, HE 增强方法中像素值的动态范围得到了扩展, 但图像较模糊, 噪声和有用信息同时增强了。GLG 增强法所得图像比 HE 法图像可视性好, 但边缘不够清晰, 对比度弱。本文方法所得图像能揭示更多细节, 对比度强, 突出了有用信息, 且轮

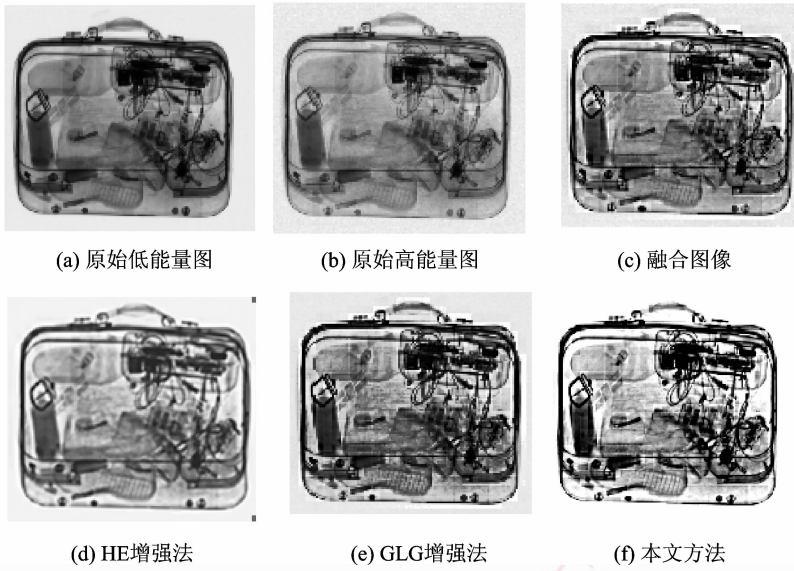


图 2 对 X 射线手提行李 1 图像的增强结果

Fig. 2 Enhancement results of X-ray images of luggage 1

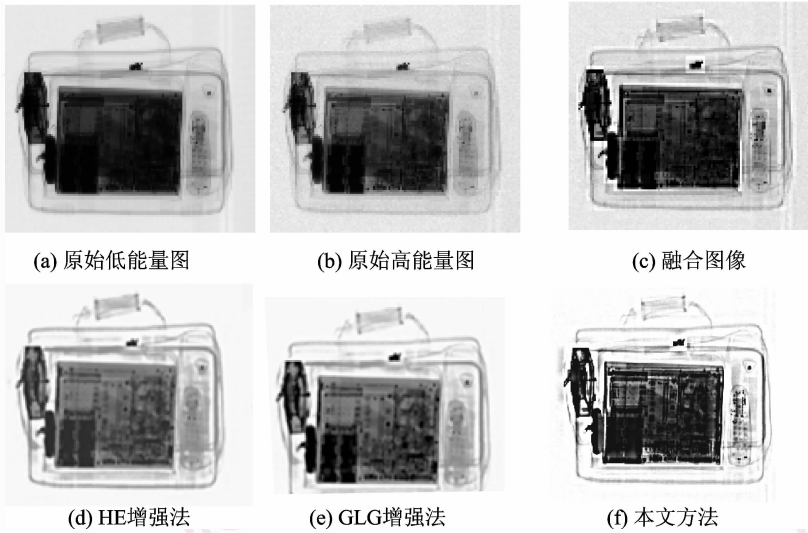


图 3 对 X 射线手提行李 2 图像的增强结果

Fig. 3 Enhancement results of X-ray images of luggage 2

廓更加清晰,弱边缘处增强效果好,更易于安检人员识别,而且本文算法比较简单,计算量较小,优于 GLG 增强法及 HE 增强法。

另外,用对比度增量<sup>[7]</sup>将本文方法与其他两种方法进行了比较。其中,对比度增量为增强后图像的对比度和原始图像对比度的比值。图像的对比度是对图像应用 3×3 大小的滑动窗口后,按照  $(x_{max} - x_{min}) / (x_{max} + x_{min})$  计算每个窗口的局部对比度,然后取其平均值。实际计算结果如表 1 所示。

表 1 增强方法效果评价表

Tab.1 Scale for effect evaluation of different enhancement methods

	融合图像	HE 增强法	GLG 增强法	本文方法
行李 1	1	1.12	1.08	1.29
行李 2	1	1.11	1.09	1.14

从表中可以看出,3 种方法的对比度增量都有提高,但直方图增强是以放大噪声为代价的。提高

对比度,可以使增强图像比原始图像更清晰、更适合安检人员观察。

## 6 结 论

本文给出了一种对 X 射线图像进行基于小波的融合、基于广义模糊理论的增强的联合方法。将其应用于双重能量 X 射线行李检测系统中,并将该方法与基于 HE 的增强方法、基于 GLG 的增强方法做了比较。实验结果表明,本文方法在增强图像的同时较好地抑制了噪声,保持了原始图像的细节信息,是一种有效的图像增强方法。我们还采用定量的参数指标来评估图像质量,结果表明本文方法优于 HE 增强法和 GLG 增强法。

### 参考文献 (References)

- 1 Chen Z Y, Abidi B R, Page D L. Gray-level grouping (GLG): An automatic method for optimized image contrast enhancement—Part I: The basic method [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(8): 2290-2302.
- 2 Dong H Y, Shen Z K, Li J C. Automatic parameter selection for fuzzy enhancement of weak contrast details [J]. Electronic Optics and Control, 2006, 13(5): 23-26. [董鸿燕,沈振康,李吉成. 弱对比度细节模糊增强的自动参数选择[J]. 电光与控制,2006,13(5): 23-26.]
- 3 Zhang W. An improved method of image fuzzy enhancement [J]. Life Science Instruments, 2006, 4(3): 29-31. [张炜. 一种改进的图像模糊增强法[J]. 生命科学仪器,2006,4(3):29-31.]
- 4 Chen Z Y, Zheng Y, Abidi B R. A combinational approach to the fusion, de-noising and enhancement of dual-energy X-ray luggage images[A]. In:Proceedings. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2005 [C], San Diego, California, USA, 2005:198-206.
- 5 Pal S K, King R A. Image enhancement using smoothing with fuzzy sets [J]. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, 1981, 11(7): 494-501.
- 6 Li P, Qian L L. SML leads to improving accuracy of histogram equilibrium of image [J]. Journal of Beijing Union University (Natural Sciences), 2006, 20(3): 58-60. [李平,钱琳琳. 利用单映射法改善图像直方图均衡化的精度[J]. 北京联合大学学报(自然科学版),2006,20(3):58-60.]
- 7 Donoho D L, Johnstone I M. Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage [J]. Biometrika, 1994, 81(3): 425-455.