

文章编号 1004-924X(2009)12-3089-07

三维有限线积分变换及其在工业 CT 体数据线特征提取中的应用

李宗剑^{1,2}, 曾 理^{1,3}

(1. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室 ICT 研究中心, 重庆 400044;
2. 重庆大学 光电工程学院, 重庆 400044; 3. 重庆大学 数理学院, 重庆 400044)

摘要:研究了基于有限线积分变换(FLIT)实现工业 CT 体数据线特征提取的方法。介绍了有限线积分变换原理,在 2D-FLIT 理论上,将其推广到 3D 的情形,并结合图像融合和数学形态学的方法提出了两种基于 FLIT 提取工业 CT 体数据中线特征的方法。一种是直接对工业 CT 体数据整体进行 3D 线特征的提取;另一种是先对工业 CT 体数据按某个方向进行切片划分,再对每张切片进行 2D 线特征的提取。数字实验表明,与小波特征提取方法相比,上述两种方法能有效地从原体数据中提取更全、更精细的线特征。

关键词:三维有限线积分变换;线特征;体数据;图像融合;形态学

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A

3D-FLIT and its application to linear feature extraction of ICT cubic data

LI Zong-jian^{1,2}, ZENG Li^{1,3}

(1. *ICT Research Center, Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System of the Education Ministry of China, Chongqing University, Chongqing 400044, China;*
2. *College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;*
3. *College of Mathematics and Physics, Chongqing University, Chongqing 400044, China*)

Abstract: A linear feature extraction method for ICT cubic data was presented based on the Finite Line Integral Transform (FLIT), and the concept of the FLIT was introduced. Based on the concept, the 2D-FLIT was generalize into the 3D-FLIT to obtain the formulas of 3D-FLIT and inverse 3D-FLIT. By combining image fusion and morphological methods, two methods to extract the linear feature from cubic data based on FLIT (2D-FLIT or 3D-FLIT) were proposed. One of them is the idea of 3D-FLIT applying to the ICT cubic data directly for detecting 3D linear features. The other is the idea of 2D-FLIT applying to each slice in some directions of the ICT cubic data for detecting 2D linear features, and then the slices in different directions are fused for obtaining the linear features. Finally morphology image processing is used for extracting useful components of the linear features. Numerical experimental results prove that the proposed methods can extract more detail and precise line features as compared with the wavelet extraction method.

Key words: Finite Line Integral Transform (3D-FLIT); linear feature; cubic data; image fusion; morphology

收稿日期:2008-12-19;修订日期:2009-03-09.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60672098)

1 引言

特征检测是图像处理和模式识别中需要解决的首要问题。对于图像(2D)而言,其主要特征由点、线、面来刻画^[1];而对于体数据(3D,如工业CT体数据)而言,其主要特征除了点、线、面以外,还增加了丝状物(filaments)和管状物(tubes)^[2]。

对于点特征而言,小波^[3]体现出极大的优势,因为小波在表示具有点奇异性的目标函数时是最优的基。而对于线特征而言,小波不再是最优基。Radon 变换^[4]和 Hough 变换^[5]是常用的线特征检测方法,但这两种方法只适用于直线特征比较明显的图像。脊波^[6]适合于对高维奇异性的分析,因为它由 Radon 变换和小波变换结合构成,Radon 变换能将高维奇异性转化为点奇异性,再利用小波对点奇异性进行分析,适合直线特征的提取,但对于图像曲线边缘的描述,其逼近性能只相当于小波变换,因此不适合曲线特征的提取。由脊波理论衍生出的曲波^[7]变换是通过一种特殊的滤波过程和多尺度脊波变换来实现的,它相对于小波变换的最大特点是具有高度的各向异性,因此具有更强的表达图像中沿边缘信息的能力,但其计算复杂度偏高。

为了有效表示和处理 2D 或 3D 数据中的高维奇异性(线、面等),多尺度几何分析(Multiscale Geometric Analysis, MGA)得到了迅速的发展,前面所述的脊波、曲波就是其中的成员。有限线积分变换(Finite Line Integral Transform, FLIT)^[8]是近年来推出的一种基于多尺度几何分析的新方法,其利用一系列不同尺度的固定模板对图像数据进行分析,以每个像素点为中心,对其周围局部邻域进行线投影,能自动适应线特征的形状变化,因此尤其适合分析图像数据中的线特征。

本文在 2D-FLIT 理论的基础上,将其推广到 3D 的情形,并以 FLIT 为基础,结合图像融合和数学形态学的方法对工业 CT 体数据中的线特征

进行了提取。数字实验结果验证了本文方法的有效性。

2 3D 有限线积分变换原理

在 Yang Mingqing 等人于 2005 年提出 2D-FLIT 定义直线方式的基础上^[8],将其推广到 3D 的情形。

对于尺寸为 $p \times p \times p$ 的模块, (p 为一奇数)直线定义的满足条件如下:每条直线都通过模块中心的体素点;所有的直线都只在模块中心体素点处相交;除模块中心体素点外,其余的每个体素点只属于一条直线;关于模块中心体素点对称的体素点位于同一条直线上。满足上述 4 条规则定义出的直线共有 $3p^2 - 6p + 4$ 条,且当模块尺寸 $p \geq 7$ 时,模块中直线的定义方式不唯一。图 1 给出了 $3 \times 3 \times 3$ 模块中直线定义的结果。(X 代表中心体素,标号相同的体素属于同一条直线。)

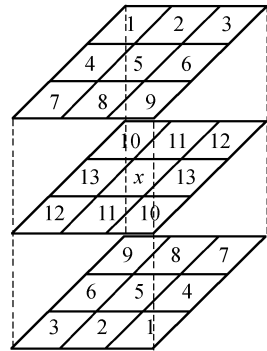


图 1 $3 \times 3 \times 3$ 模块中的直线定义

Fig. 1 Line definition in $3 \times 3 \times 3$ module

设体素点 (h, i, j) 的体素值为 $g(h, i, j)$, 模块中心体素点 (x, y, z) 的 3D-FLIT 定义如下:

$$g_k(x, y, z) = FLIT(h, i, j, k) = \sum_{(h, i, j) \in L_k} g(h, i, j), \quad (1)$$

其中, L_k 是标记为 k (如图 1) 的体素点的集合, $1 \leq k \leq 3p^2 - 6p + 4, k \in \mathbf{Z}$ 。

记 $p \times p \times p$ 模块内所有体素点的坐标集合为 \mathbf{Z}_p^3 , 当模块内的体素值具有零均值时,即

$$\sum_{(h, i, j) \in \mathbf{Z}_p^3} g(h, i, j) = 0, \text{ 则模块中心体素点 } (x, y,$$

z)的逆 3D-FLIT 定义如下:

$$g(x, y, z) = \frac{1}{3(p-1)^2} \sum_{k=1}^{3p^2-6p+4} FLIT(h, i, j, k). \quad (2)$$

可以看出,3D-FLIT 模块中定义出的直线具有很强的对称性,如 $3 \times 3 \times 3$ 的模块中,以模块中心为原点建立三维坐标系,如图 2 所示,共有 3 类直线。

对称、 $z=x$ 平面对称、 $z=y$ 平面对称中的一种或者几种的组合相互得到。因此,对于 $3 \times 3 \times 3$ 的模块而言,其基本直线只有 3 种。

随着模块尺寸 p 的增加,直线的分类数也将增加,但每类直线依然具有上述的强对称性,且有两类直线的数量固定不变。一类是位于 $x、y、z$ 坐标轴上的直线(共 3 条),另一类是位于模块对角线上的直线(共 4 条)。由定义直线的对称性可知,其它每类直线的条数均为 6 的倍数。若知道一类直线中的任意一条直线的表达式,记为 $l(x, y, z)$,则该类直线的其它直线可以通过下述变换中的一种或几种的组合得到。

关于 xoy 平面对称: $l_1(x, y, z) = l(x, y, -z)$;

关于 xoz 平面对称: $l_2(x, y, z) = l(x, -y, z)$;

关于 yoz 平面对称: $l_3(x, y, z) = l(-x, y, z)$;

关于 $y=x$ 平面对称: $l_4(x, y, z) = l(y, x, z)$;

关于 $z=x$ 平面对称: $l_5(x, y, z) = l(z, y, x)$;

关于 $z=y$ 平面对称: $l_6(x, y, z) = l(x, z, y)$ 。

3D-FLIT 的局部中心线积分思想,能够适应曲线形状的变化,且由于考虑了空间关系上的相邻域,因而比 2D-FLIT 更能表现出空间中的线特征。直线的分类有助于经 FLIT 提取所得线特征的后续处理。

3 基于 FLIT 的工业 CT 体数据线特征提取方法

针对工业 CT 体数据线特征的结构,既可以采用直接对工业 CT 体数据整体进行提取的 3D 方法,也可以采用先对工业 CT 体数据按某个方向进行切片划分,再对每张切片进行提取的 2D 方法。两种方法的思想如图 3 所示,其中,图 3 (a)为 3D 的方法,图 3(b)为 2D 的方法。首先利用 FLIT 得到各方向的备选线特征;接着利用图像融合将各方向的备选线特征进行综合,得到体数据的线特征;最后利用数学形态学中的开启运

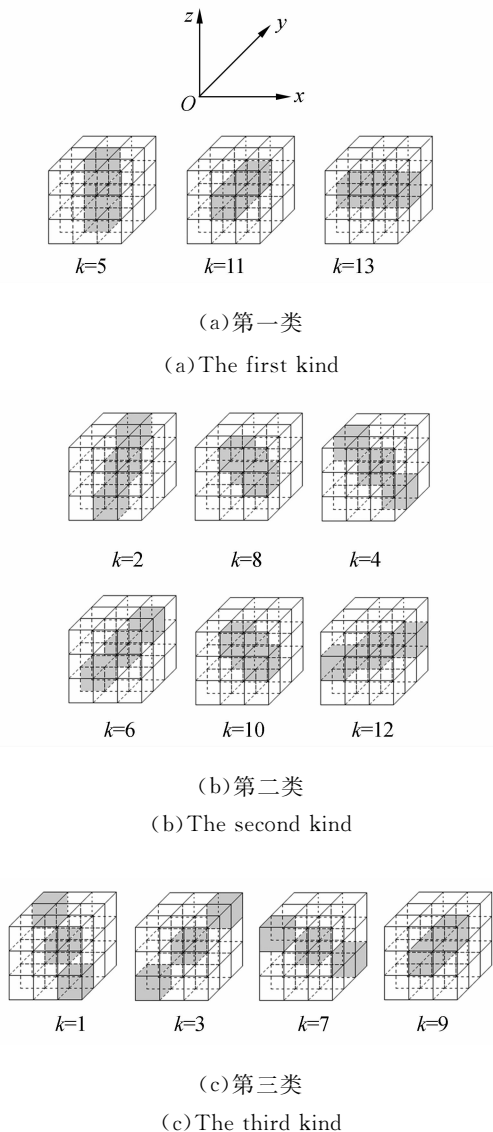


图 2 $3 \times 3 \times 3$ 模块中的直线分类

Fig. 2 Line classification in $3 \times 3 \times 3$ module

每类中的任意两条直线,均可以通过 xoy 平面对称、 xoz 平面对称、 yoz 平面对称、 $y=x$ 平面

算和闭合运算,对线特征进行平滑。

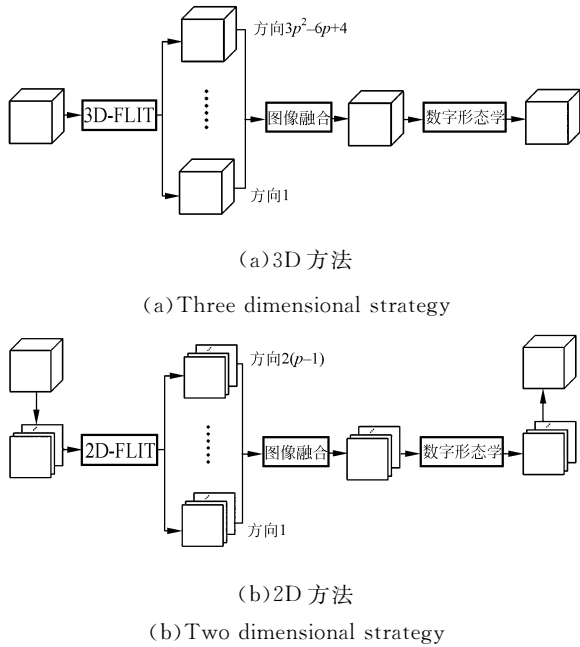


图 3 基于 FLIT 的工业 CT 体数据线性特征提取方法

Fig. 3 Methods of extracting linear feature for ICT cubic data based on FLIT

3.1 体数据的 3D-FLIT

本文对工业 CT 体数据中线特征的提取包括基于切片数据的 2D-FLIT 和基于体数据的 3D-FLIT。切片数据相当于一幅二维图像,在文献[8]中给出了针对图像数据的 2D-FLIT 的具体步骤,这里不再赘述。下面重点讨论针对体数据的 3D-FLIT。

设体数据的尺寸大小为 $l \times m \times n$,体素点 (h, i, j) 的体素值为 $g(h, i, j)$, $0 \leq h \leq l-1, 0 \leq i \leq m-1, 0 \leq j \leq n-1, h, i, j \in \mathbf{Z}$;

(1) 确定模块尺寸 $p \times p \times p$, p 为一奇数。

(2) 对体数据进行对称延拓,上下、左右、前后分别加 $(p-1)/2$ 层,延拓后的体数据尺寸为 $(l+p-1) \times (m+p-1) \times (n+p-1)$,体素点 (h', i', j') 的体素值记为 $g'(h', i', j')$;

(3) 对满足

$$\begin{cases} (p-1)/2 \leq h' \leq l-1+(p-1)/2 \\ (p-1)/2 \leq i' \leq m-1+(p-1)/2 \\ (p-1)/2 \leq j' \leq n-1+(p-1)/2 \end{cases}, \quad (3)$$

的任一像素点 (h', i', j') , 记以 (h', i', j') 为中心的 $p \times p \times p$ 的区域为 $D(h', i', j')$, 将 $D(h', i', j')$ 的数据变换为零均值的数据;

(4) 计算区域 $D(h', i', j')$ 中心点, 共 $3p^2 - 6p + 4$ 个方向的 3D-FLIT;

(5) 对满足不等式组(3)的所有体素点, 依次重复第 3 步和第 4 步, 最终得到 $(3p^2 - 6p + 4) \times l \times m \times n$ 的 4 维 3D-FLIT 矩阵。

3.2 线特征的提取

经 3D-FLIT 运算后的系数矩阵记为 $I_k(x, y, z)$, 其中, $1 \leq k \leq 3p^2 - 6p + 4$ 代表方向, $0 \leq x \leq l-1, 0 \leq y \leq m-1, 0 \leq z \leq n-1$, 代表坐标。 $I_k(x, y, z)$ 的均值和方差分别记作 m_k 和 σ_k , 相应的计算表达式如下:

$$m_k = \frac{1}{lmn} \sum_{x=0}^{l-1} \sum_{y=0}^{m-1} \sum_{z=0}^{n-1} I_k(x, y, z), \quad (4)$$

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{1}{lmn} \sum_{x=0}^{l-1} \sum_{y=0}^{m-1} \sum_{z=0}^{n-1} [I_k(x, y, z) - m_k]^2}. \quad (5)$$

对各方向的 3D-FLIT 系数进行二值化, 二值化矩阵记为 $B_k(x, y, z)$, 其规则如下:

$$B_k(x, y, z) = \begin{cases} 1, & I_k(x, y, z) > m_k + \sigma_k \text{ or } I_k(x, y, z) < m_k - \sigma_k \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (6)$$

$B_k(x, y, z) = 1$ 代表在 k 方向有线特征经过 (x, y, z) 点, $B_k(x, y, z) = 0$ 代表在 k 方向没有线特征经过 (x, y, z) 点。 s 的取值由直线所属的分类确定, 相同类的直线具有相同的值, 不同类的直线可以取相同的值也可以取不同的值。 s 的选择将突出或削弱某(几)类直线, 具体取值视需要而定。

为了综合各方向的线特征信息, 进而得到体数据的线特征, 我们考虑图像融合的方法。图像融合是指综合和提取多个图像信息, 获得对同一场景或者目标更为准确、全面和可靠的图像, 使之更加适合于人眼感知或计算机后续处理^[9]。图像融合根据融合处理所处的阶段不同, 通常在 3 个不同层次上进行, 即像素级融合、特征级融合和决策级融合^[10]。这里采用属于像素级融合的像素

加权平均法。

融合图像记为 $B(x, y, z)$, 其表达式如下:

$$B(x, y, z) = \frac{\sum_{k=1}^{3p^2-6p+4} w_k B_k(x, y, z)}{\sum_{k=1}^{3p^2-6p+4} w_k}, \quad (7)$$

其中, w_k 为权值, $1 \leq k \leq 3p^2 - 6p + 4$, $0 \leq x \leq l - 1$, $0 \leq y \leq m - 1$, $0 \leq z \leq n - 1$, $k, x, y, z \in \mathbf{Z}$ 。由式(7)得到的 $B(x, y, z) \in [0, 1]$, 在进行后续处理前, 还需将 $B(x, y, z)$ 二值化。一般情况下采用双阈值二值化的方法, 因为 $B(x, y, z)$ 越接近“0”, 说明有线特征经过该点的可能性就越小, 该点不属于线特征的可能性就越大; $B(x, y, z)$ 越接近“1”, 说明几乎各个方向的线特征都经过该点, 同理该点不属于线特征的可能性就越大。双阈值二值化方法的计算表达式如下:

$$B(x, y, z) = \begin{cases} 1, & T_1 < B(x, y, z) < T_2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (8)$$

其中, T_1 、 T_2 分别表示低阈值和高阈值。

特殊情况, 需突出某个方向的线特征, 即某个 w_k 相对于其余的 w_k 较大的情形, 则采用单阈值二值化的方法, 相应的计算表达式如下:

$$B(x, y, z) = \begin{cases} 1 & B(x, y, z) \geq T \\ 0 & B(x, y, z) < T \end{cases}, \quad (9)$$

其中, T 表示阈值。

3.3 线特征的平滑

到此为止, 我们得到了体数据的线特征, 但是在这些线特征中, 存在着突刺、缺口等干扰因素, 因此还需要对线特征进行平滑操作。这里我们采用数学形态学中的开启运算和闭合运算来处理上述干扰因素。开启运算通过先腐蚀后膨胀来实现, 闭合运算通过先膨胀后腐蚀来实现。记 A 为二值化后的体数据集合, B 为一结构元素。

A 用 B 来膨胀写作 $A \oplus B$, 其定义为^[11]:

$$A \oplus B = \{x | [(B)_x \cap A] \neq \emptyset\}. \quad (10)$$

上式表明用 B 膨胀 A 的过程是, 先对 B 做关于原点的映射, 再将其映像平移 x , 这里 A 与 B 映像的交集不为空集。

A 用 B 来腐蚀写作 $A \ominus B$, 其定义为^[11]:

$$A \ominus B = \{x | (B)_x \subseteq A\}. \quad (11)$$

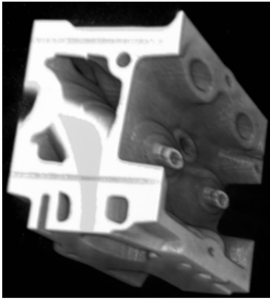
上式表明 A 用 B 腐蚀的结果是所有 x 的集合, 其中 B 平移 x 后仍在 A 中。

4 实验结果与分析

实验采用 Internet 上公布的发动机工业 CT 体数据^[12], 体数据的尺寸为 $256 \times 256 \times 128$ 。实验环境: AMD3100+, 1 G 内存, VC++6.0, Windows XP。实验中, 2D-FLIT 采用的模板大小为 5×5 , 3D-FLIT 采用的模块大小为 $3 \times 3 \times 3$, 线特征提取结果的 3D 显示, 如图 4 所示。其中(a)为原始数据; (b)、(c)、(d)分别为对第 8 张切片选取其中一个方向提取得到的备选线特征进行展示; (e)为第 8 张切片各方向备选线特征融合后的线特征展示; (f)为第 8 张切片右上角部分, 经线特征平滑前后的结果放大展示; (g)为对发动机工业 CT 体数据整体进行 3D 提取的结果, 耗时 24.656 s; (h)为先对发动机工业 CT 体数据按某个方向进行切片划分, 再对每张切片进行 2D 提取的结果, 耗时 9.297 s; (i)为用三维小波的方法(滤波器长度为 $5 \times 5 \times 5$)对发动机工业 CT 体数据进行提取的结果, 耗时 32.673 s。

比较而言, 整体提取的方法能得到原体数据中更多的线特征。这是因为, 若按某个方向进行切片划分, 则会相应地降低该方向上体素点间的连续性, 从而使体数据中该方向上的线特征受到抑制, 从而弱化掉这部分线特征。若在实际应用中, 有意弱化某方向的线特征, 则适合采用这种方法。整体提取则不会出现上述问题, 但是其计算开销会相应增加。与三维小波方法相比, 本文的方法能得到原体数据中更全、更精细的线特征。

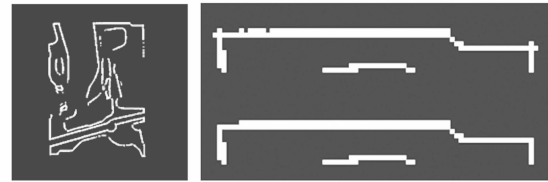
另外, 线特征中既包括直线特征又包括曲线特征, 而本文方法的实质是用直线段去逼近曲线, 因此从提取的结果中可以看出, 直线特征的提取比较清晰, 曲线特征的提取则出现了少许的不连续。整体而言, 本文的方法对线特征的提取是有效的。



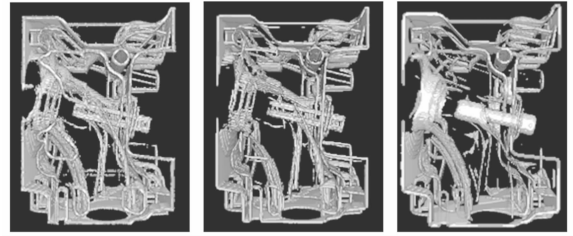
(a) Engine 体数据
(a) Engine cubic data



(b)方向 1 (c)方向 2 (d)方向 3
(b)Orientation 1 (c)Orientation 2 (d)Orientation 3



(e)各方向融合 (f)局部图
(e)Fusion of different orientations (f)Local image



(g)3D方法 (h)2D方法 (i)3D小波
(g)Three dimensional strategy (h)Two dimensional strategy (i)Three dimensional wavelet

图 4 线特征提取结果

Fig. 4 Results of linear feature extraction

5 总 结

FLIT 作为近年来一种基于多尺度几何分析的新方法,非常适合图像数据中线特征的分析。本文将 FLIT 的理论推广到 3D 情形,并以 FLIT 为基础结合图像融合和数学形态学处理提出了用于检测工业 CT 体数据中线特征的方法,包括两种思路:一种是对工业 CT 体数据整体进行直接 3D 提取;一种是先对工业 CT 体数据按某个方向进行切片划分,再对每张切片进行 2D 提取。比较而言,3D 提取方法会得到更全面的线特征。与小波方法的实验结果对比,验证了本文方法的有效性。如何改善对曲线特征的提取还有待进一步地研究。

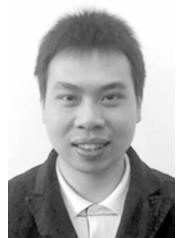
参考文献:

- [1] 张俊雄, 荀一, 李伟. 基于形态特征的玉米种子表面裂纹检测方法[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(6): 159-659.
ZHANG J X, XUN Y, LI W. Detection of surface cracks of corn kernel based on morphology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6): 159-659. (in Chinese)
- [2] 焦李成, 谭山. 图像的多尺度几何分析: 回顾和展望[J]. 电子学报, 2003, 31(12A): 1975-1981.
JIAO L CH, TAN SH. Development and prospect

- of image multiscale geometric analysis [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(12A): 1975-1981. (in Chinese)
- [3] ZENG L, JANSEN C P, MARSCH S, *et al.*. Wavelet compression of four-dimensional arbitrarily size echocardiographic data[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2002, 21(9): 1179-1187.
- [4] BOULGOURIS N V, CHI Z X. Gait recognition using Radon transform and linear discriminant analysis[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(3): 731-740.
- [5] 陈洪波, 王强, 徐晓蓉, 等. 基于改进 Hough 变换

- 的符号线段特征提取[J]. 光学精密工程, 2003, 11(6):632-636.
- CHEN H B, WANG Q, XU X R, *et al.*. Extraction of symbol line-features based on improved Hough transformation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(6):632-636. (in Chinese)
- [6] 侯彪, 刘芳, 焦李成. 基于脊波变换的直线特征检测[J]. 中国科学 E, 2003, 33(1):65-73.
- HOU B, LIU F, JIAO L CH. Linear feature detection based on ridgelet[J]. *Science in China (Series E)*, 2003, 33(1):65-73. (in Chinese)
- [7] FARHAD M K, JALALEDDIN I, REIHANE M, *et al.*. Numeral recognition using curvelet transform[C]. *IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications*, 2008: 606-612.
- [8] YANG M Q, PENG Y H, LIU Y X. The algorithm and application of finite line integral transform [C]. *IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications Proceedings*, 2005:411-414.
- [9] 高印寒, 周晓华, 梁杰, 等. 数据融合技术在声全息测量中的应用[J]. 光学精密工程, 2007, 15(7): 4011-1111.
- GAO Y H, ZHOU X H, LIANG J, *et al.*. Application of data fusion to acoustic holography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7):4011-1111. (in Chinese)
- [10] HALL D L, LLINAS J. *Handbook of Multisensor Data Fusion*[M]. Florida: CRC Press LLC, 2001: 69-74.
- [11] GONZALEZ R C, WOODS R E, EDDINS S T. 数字图像处理[M]. 北京:电子工业出版社, 2005: 519-527.
- GONZALEZ R C, WOODS R E, EDDINS S T. *Digital Image Processing*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 519-527. (in Chinese)
- [12] <http://www.gris.uni-tuebingen.de/areas/scivis/volren/datasets/data/engine.raw.gz>[OL].

作者简介:



李宗剑(1981—),男,重庆人,博士研究生,2004年,2007年于重庆大学分别获得学士和硕士学位,主要从事数字图像处理的研究。E-mail: joyli11@sohu.com



曾理(1959—),男,四川郫县人,博士,教授,博士生导师,1986年于四川师范大学获学士学位,1989年于大连理工大学获硕士学位,1997年于重庆大学获博士学位,2000年至2001年在瑞士巴塞尔大学作博士后研究,主要从事工业CT和数字图像处理的研究。E-mail: drlizeng@hotmail.com