

doi: 10.3788/gzxb20174601.0112002

# 基于动态时间弯曲的 X 射线变电流投影融合方法

张翔<sup>1,2</sup>, 闫宾<sup>1</sup>, 李磊<sup>1</sup>, 连敬东<sup>2</sup>, 席晓琦<sup>1</sup>, 陈思宇<sup>1</sup>, 张峰<sup>1</sup>, 李建新<sup>1</sup>

(1 国家数字交换系统工程技术研究中心, 郑州 450002)

(2 中国人民解放军 95807 部队)

**摘要:**针对变电流投影融合中的阈值选择问题,提出了一种基于动态时间弯曲的变电流投影融合方法.该方法首先计算不同电流下投影的灰度值-有效边缘梯度序列,然后利用动态时间弯曲距离对预处理后的序列进行相似匹配,自动判断最佳融合阈值,最后根据阈值确定不同电流投影的子区域并对其进行融合,实现了探测器动态范围的扩展.本文方法计算的各角度下融合阈值的平均误差仅为 2.26%,能够避免人工选择融合阈值的主观性,基于融合后重建图像的信噪比与几何尺寸测量准确度均优于固定融合阈值的方法.

**关键词:**计算机断层成像;几何尺寸测量;变电流投影融合;有效边缘梯度;动态时间弯曲

中图分类号:O434.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)01-0112002-8

## Multi-current X-ray Projection Fusion Method Based on Dynamic Time Warping

ZHANG Xiang<sup>1,2</sup>, YAN Bin<sup>1</sup>, LI Lei<sup>1</sup>, LIAN Jing-dong<sup>2</sup>, XI Xiao-qi<sup>1</sup>,  
CHEN Si-yu<sup>1</sup>, ZHANG Feng<sup>1</sup>, LI Jian-xin<sup>1</sup>

(1 National Digital Switching System Engineering and Technological Research Center, Zhengzhou 450002, China)

(2 95807 Troops of the PLA, China)

**Abstract:** Aiming at this threshold selection problem for multi-current projection fusion, a method based on dynamic time warping was proposed. Firstly, the sequences of gray value-effective edge gradient is calculated from the projections with different currents. Secondly the dynamic time warping distance is used to match the similarity of the above sequences, and the optimal fusion threshold is automatically determined. Finally the sub regions are extracted for fusion based on the threshold, achieving a higher dynamic range of the detector. The average error of fusion threshold at each angle is only 2.26% calculated by the proposed method, which could avoid subjectivity in the fusion threshold selection. Simulation and experimental results show that both the SNR and the measurement accuracy of geometric dimensions based on the fused computed tomography image are better than those with a fixed threshold.

**Key words:** Computed tomography; Geometric dimensions measurement; Multi-current projection fusion; Effective edge gradient; Dynamic time warping

**OCIS Codes:** 120.0120; 040.0040; 110.0110; 340.0340

## 0 引言

在逆向工程<sup>[1]</sup>中,选择合适的测量设备,准确获取被逆向物体不同类型结构的几何尺寸参量非常关键.

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61372172, 61601518)资助

第一作者:张翔(1990—),男,助理工程师,硕士,主要研究方向为智能信息处理与三维成像技术. Email: nutshell720@126.com

通讯作者:闫宾(1976—),男,教授,博士,主要研究方向为智能信息处理与三维成像技术. Email: ybspace@hotmail.com

收稿日期:2016-07-11;录用日期:2016-10-25

<http://www.photon.ac.cn>

基于计算机断层成像(Computed Tomography, CT)的几何尺寸测量方法<sup>[2-3]</sup>通过采集不同角度下的 X 射线投影重建物体 CT 图像,并基于 CT 图像完成几何尺寸测量.其优势是在无接触、非损坏的条件下,同时测量物体的外部和内部结构几何尺寸<sup>[4-6]</sup>.为了获得优质的成像效果,CT 数据采集需要根据物体设置合适的扫描参量.然而,对于一些多材料物体,传统单一扫描参量的成像模式容易造成探测器曝光不足或曝光过度的现象<sup>[7-9]</sup>,由此带来的 CT 图像伪影或信息缺失极大地影响了几何尺寸测量准确度.

近年来,变扫描参量成像方法获得了广泛关注,按参量设置的不同,可以将它分为变电压和变电流两类方法.成像电压决定了 X 射线对物体的穿透能力,在变电压成像方法的研究中,杨莹等<sup>[10]</sup>提出了一种基于小波变换的投影融合方法,Chen 等<sup>[11]</sup>为避免伪边缘造成的灰阶混乱问题,提出了一种灰度加权模型,Liu 等<sup>[12]</sup>在此基础上通过增加射束硬化校正步骤,保证了投影值和射线穿透物体厚度之间服从线性关系.由于 X 射线能谱随成像电压的改变而变化,求解变电压成像中多材料物体投影融合的加权系数有待进一步研究.相比较而言,改变成像电流不会影响 X 射线能谱特性,研究变电流成像方法对扩展探测器动态范围具有较高的实用价值<sup>[13]</sup>.Krämer 等<sup>[14]</sup>首先基于某个角度下不同电流的投影人工设置了融合阈值,然后利用探测器未曝光过度的投影区域计算缩放因子完成融合,在对铝和有机玻璃组成的楔形多材料工件几何尺寸测量中获得了更加准确的结果,但是人工选择投影融合阈值存在主观性.

为了自动获取不同角度下变电流投影的最佳融合阈值,本文提出了一种基于动态时间弯曲(Dynamic Time Warping, DTW)的变电流投影融合方法.该方法首先提取不同电流投影中的有效边缘并计算其梯度,然后使用 DTW 距离匹配不同电流投影的有效边缘梯度序列,自动确定最佳投影融合阈值,实现了不同角度下的投影融合.使用本文方法融合投影的 CT 图像具有更高的信噪比和几何尺寸测量准确度.

## 1 基于 DTW 的变电流投影融合

变电流投影融合通常选择小电流投影为基底,并将大电流投影中未曝光过度的区域经过比例缩放后加以替换,获得高动态范围的融合投影.为了保证融合区域边缘过渡平滑,本文提出了如图1所示的变电流投

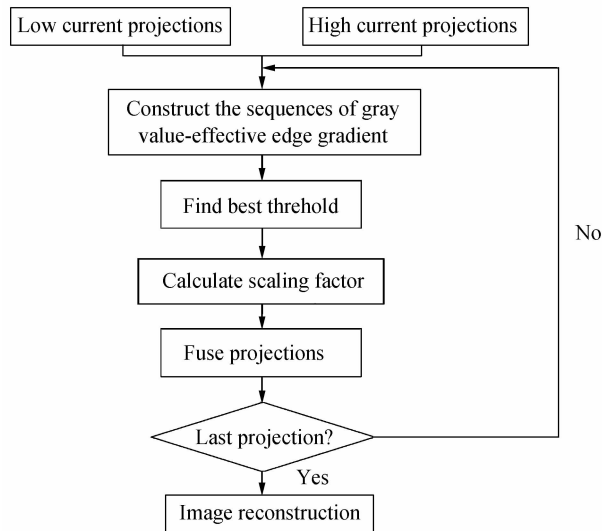


图1 变电流投影融合流程

Fig.1 Flow chart of the multi-current projection fusion

影融合流程.假设  $p_1$  和  $p_2$  分别表示同一角度下不同电流的两幅投影,首先构造两幅投影的灰度值-有效边缘梯度序列,然后利用 DTW 距离对预处理后的序列进行相似匹配,求出最佳融合阈值  $Th$ ,融合后投影中第  $u$  行  $v$  列的像素值  $p_{\text{fusion}}(u, v)$  可以表示为

$$p_{\text{fusion}}(u, v) = \begin{cases} p_1(u, v)/s & p_1(u, v) < Th \\ p_2(u, v) & p_1(u, v) \geq Th \end{cases} \quad (1)$$

其中,缩放因子  $s$  可通过一定条件下不同电流投影中相同区域的灰度值求解

$$s = \frac{\sum_{u,v} p_1(u,v)}{\sum_{u,v} p_2(u,v)} \quad \forall p_1(u,v) < \text{Th} \quad (2)$$

依次融合变电流投影集合中相同角度下的两幅投影,并将融合后的投影用于 CT 图像重建,从而得到高质量的 CT 图像.在整个流程中,准确定位融合区域是投影融合的关键环节,本节将详细阐述投影融合中构造灰度值-有效边缘梯度序列和求解最佳融合阈值两个步骤.

### 1.1 构造灰度值-有效边缘梯度序列

为了刻画融合区域在边缘过渡的平滑程度,提出投影有效边缘梯度的概念.如果探测器上相邻两个像素的灰度值分别大于和小于  $\text{Val} \in [\text{Val}_{\min}, \text{Val}_{\max}]$ ,  $\text{Val}_{\min}$  和  $\text{Val}_{\max}$  分别表示采集投影的最小和最大灰度值,那么就将这组点对记为灰度值  $\text{Val}$  下的有效边缘.假设投影中坐标  $(u, v)$  的灰度值为  $p(u, v)$ ,其梯度向量  $\mathbf{g}_{\text{edge}}(u, v)$  可表示为  $\mathbf{g}_{\text{edge}}(u, v) = [g_{\text{up}}(u, v), g_{\text{down}}(u, v), g_{\text{left}}(u, v), g_{\text{right}}(u, v)]^T$ ,式(3)~(6)用于计算上下左右 4 个方向的梯度值.

$$g_{\text{up}}(u, v) = \begin{cases} |p(u, v) - p(u-1, v)| & p(u, v) < \text{Val} \& p(u-1, v) > \text{Val} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

$$g_{\text{down}}(u, v) = \begin{cases} |p(u, v) - p(u+1, v)| & p(u, v) < \text{Val} \& p(u+1, v) > \text{Val} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

$$g_{\text{left}}(u, v) = \begin{cases} |p(u, v) - p(u, v-1)| & p(u, v) < \text{Val} \& p(u, v-1) > \text{Val} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

$$g_{\text{right}}(u, v) = \begin{cases} |p(u, v) - p(u, v+1)| & p(u, v) < \text{Val} \& p(u, v+1) > \text{Val} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

全部像素点的梯度矩阵记为  $\mathbf{G} = [g_{\text{edge}}(1, 1), g_{\text{edge}}(1, 2), \dots, g_{\text{edge}}(U, V)]$ ,  $U$  和  $V$  分别表示投影的高度和宽度,整幅投影的有效边缘梯度  $g_{\text{eff}}$  定义为

$$g_{\text{eff}} = \frac{\|\mathbf{G}\|_1}{\|\mathbf{G}\|_0} \quad (7)$$

对某个角度下两幅不同电流的投影,采样不同灰度值  $\text{Val}$  都有一个有效边缘梯度  $g_{\text{eff}}$  与之对应,由此可以得到不同电流投影的灰度值-有效边缘梯度序列.

### 1.2 求解最佳融合阈值

探测器在未曝光过度的情况下,不同电流投影在相同位置的灰度值近似服从线性关系,这种线性关系保证了不同电流投影的灰度值-有效边缘梯度序列具有相似的形状.并且,这种序列形状上的相似性正好因为探测器曝光过度而被破坏,故可以据此判断不同电流投影的最佳融合阈值.

本文将 1.1 节中不同电流投影的两个原始序列进行预处理.首先根据序列第一个峰值的位置,在小电流序列中确定与大电流序列相似的子序列,并对该子序列重新采样;然后对重新采样的大电流子序列和原始小电流序列做归一化处理.记大、小电流下长度分别为  $n$  和  $m$  的灰度值-有效边缘梯度序列为  $\mathbf{X}$  和  $\mathbf{Y}$ .针对这种形状相似的序列相似匹配问题,本文使用 DTW 距离比较其相似性.序列中任意两点  $x_i$  和  $y_j$  表示预处理后某灰度值对应的有效边缘梯度  $g_{\text{eff}}$ ,它们之间的对应关系矩阵为  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{M}_{ij}$  表示  $x_i$  和  $y_j$  的距离,即

$$d(x_i, y_j) = |x_i - y_j| \quad (8)$$

两个序列之间的相似匹配关系用路径  $\mathbf{Q} = (q_1, q_2, \dots, q_K)$  表示,路径的最后一个点  $K \in [\max(m, n), m+n-1]$ ,第  $k$  个元素  $q_k = (i, j)$  表示序列  $\mathbf{X}$  中第  $i$  个元素和序列  $\mathbf{Y}$  中第  $j$  个元素互相匹配,最佳路径  $\mathbf{Q}^*$  具有最小弯曲代价,即

$$\text{DTW}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \min_{\mathbf{Q}^*} \sum_{k=1}^K d_k \quad (9)$$

路径  $\mathbf{Q}^*$  可以利用基于累积增量矩阵的动态规划方法<sup>[15]</sup>计算,累积增量矩阵  $\mathbf{D}$  定义为

$$\begin{cases} \mathbf{D}(1, j) = \sum_{k=1}^j d(x_1, y_k) & j \in [1, m] \\ \mathbf{D}(i, 1) = \sum_{k=1}^i d(x_k, y_1) & i \in [1, n] \\ \mathbf{D}(i, j) = \min\{\mathbf{D}(i-1, j-1), \mathbf{D}(i-1, j), \mathbf{D}(i, j-1)\} + d(x_i, y_j) & i \in [1, n], j \in [1, m] \end{cases} \quad (10)$$

在获得累积增量矩阵  $\mathbf{D}$  后,确定最优弯曲路径的具体方法,从弯曲路径的终点开始依次回溯到起点.对于累积增量矩阵  $\mathbf{D}$  中的某个元素  $\mathbf{D}(i,j)$ ,分别比较三个相邻点  $\mathbf{D}(i-1,j)$ 、 $\mathbf{D}(i,j-1)$  和  $\mathbf{D}(i-1,j-1)$ ,选择其中的最小点作为下一步回溯点.

为了提高序列 DTW 相似匹配的准确性,本文在有效边缘梯度序列  $\mathbf{X}$  和  $\mathbf{Y}$  上加入了梯度方向信息.大电流下的新序列  $\mathbf{X}' = (x_{\text{Th}1}, x_{\text{Th}2}, \dots, x_{\text{Th}n})$  利用式(11)计算,即

$$x_{\text{Th}i} = \begin{cases} x_i \cdot \text{sgn}(x_i - x_{i-1}) & i > 1 \\ x_i & i = 1 \end{cases} \quad (11)$$

同理可以得到小电流下的新序列  $\mathbf{Y}' = (y_{\text{Th}1}, y_{\text{Th}2}, \dots, y_{\text{Th}m})$ .

实际不同电流序列受到噪声水平差异的影响,可能在相似匹配点中存在多点对应一点或一点对应多点的情况,这些点都是探测器曝光过度后发生异常的疑似点.本文将序列  $\mathbf{X}'$  和  $\mathbf{Y}'$  每个疑似点附近长度为  $L_{\text{new}}$  的子序列记为  $\mathbf{X}_{\text{sub}}$  和  $\mathbf{Y}_{\text{sub}}$ ,通过计算子序列  $\mathbf{X}_{\text{sub}}$  和  $\mathbf{Y}_{\text{sub}}$  的相关系数寻找真实的融合阈值.子序列长度  $L_{\text{new}}$  由疑似点的对应情况决定,相关系数最小的疑似点即为投影最佳融合阈值  $\text{Th}$  所在点,可以根据最佳融合阈值确定投影融合区域.

## 2 实验结果

### 2.1 仿真数据

为了仿真探测器曝光过度的情况,本文设计了一种衰减系数差异明显的工件,该工件由编号为 1~7 的七个圆柱形物体组成,仿真体模半径为 10 mm,以 1 号圆柱的中心建立直角坐标系,吸收系数  $\mu$ 、归一化半径  $r$  和圆心坐标  $(O_1, O_2)$  见表 1.在表 2 的扫描参量下,使用解析法<sup>[16]</sup>在  $360^\circ$  范围内均匀采集 720 张投影.重建的中心切片如图 2,体模中心 1 号圆柱为高衰减材料,周围 6 个圆柱为低衰减材料.

表 1 仿真体模参量

Table 1 Parameters for the simulated phantom

Number	$\mu$	$r$	$O_1$	$O_2$
1	0.48	0.3	0	0
2	0.08	0.3	-0.556 5	0.2413
3	0.08	0.3	-0.060 8	0.602 3
4	0.08	0.3	0.493 3	0.358 9
5	0.08	0.3	0.556 5	-0.247 7
6	0.08	0.3	0.0608	-0.604 2
7	0.08	0.3	-0.491 4	-0.362 9

表 2 仿真实验扫描参量

Table 2 Scanning parameters for simulation

Parameter	Value
Source to object distance/mm	177.66
Source to detector distance/mm	1033.68
Number of projections	720
Detector pixel number	2 000 (width) $\times$ 500 (height)
Detector pixel size/mm <sup>2</sup>	0.127 $\times$ 0.127
Volume voxel size/mm <sup>3</sup>	0.022 $\times$ 0.022 $\times$ 0.022

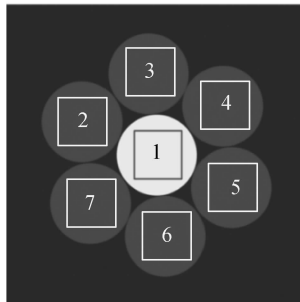


图 2 理想工业零件仿真体模

Fig. 2 Ideal industrial simulated phantom

为了使仿真数据和实际数据具有相同的噪声水平,使用文献[17]的方法为投影添加泊松噪声.投影加噪声的公式为

$$p_{\text{noisy}}(u, v) = -\ln\left(\frac{\text{Poisson}(N_0 \exp(-p(u, v)))}{N_0}\right) \quad (12)$$

式(12)中仅有一个代表探测器输出的未知数  $N_0$ ,该参量用于控制投影噪声的水平,运用文献[18]的方法计算感兴趣区域  $\Omega_{\text{ROI}}$  的信噪比(Signal to Noise, SNR),即

$$\text{SNR} = 20 \cdot \log_{10} \frac{\text{mean}(p_{\text{noisy}}(u, v))}{\text{std}(p_{\text{noisy}}(u, v))} \quad (u, v) \in \Omega_{\text{ROI}} \quad (13)$$

针对大电流的仿真投影,本文假设探测器输出超过 8 500 后发生异常,大于 8 500 的像素添加一定比例的高斯白噪声.从图 3 仿真和实际重建结果的对比中可以看到,本文的仿真方法与实际结果具有较好的一致性,探测器曝光过度后外侧低衰减材料信息部分缺失.

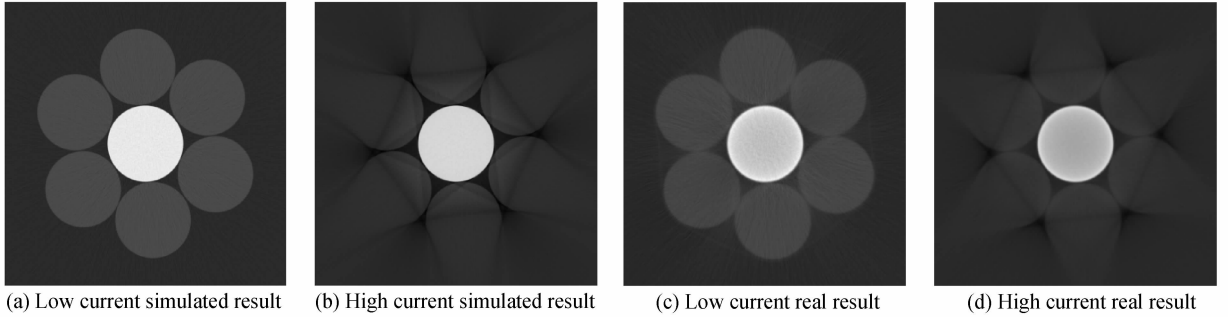


图 3 仿真与实际工业零件重建结果对比

Fig. 3 Comparison of industrial parts in simulated and real experiment

运用本文方法判断不同角度下变电流投影的最佳融合阈值,虽然受到噪声等因素的影响,但是表 3 中各角度的融合阈值求解正确率较高.在已知真实融合阈值为 8500 的情况下,各角度下融合阈值的平均误差为 2.26%,误差的标准差为 1.63%.

表 3 不同角度下仿真投影融合阈值参量求解准确度

Table 3 The accuracy of fusion threshold parameter for simulated projections at different angles

Parameter	Value	Relative error
Maximun threshold	8 550	0.59%
Minimun threshold	7 837.50	7.79%
Mean threshold	8 307.95	2.26%

选择图 2 中 7 个正方形感兴趣区域,使用式(13)计算其 SNR,结果见图 4.图 4 中,本文提出的变电流投影融合方法能有效提高 CT 图像中各感兴趣区域的 SNR,融合后 CT 图像的 SNR 与最佳融合阈值的效果相似.

针对融合后的 CT 图像,使用文献[19]的方法得到圆柱直径的几何尺寸测量结果,结果见图 5.图 5 中,本文方法所得 CT 图像几何尺寸测量准确度优于融合前小电流的结果,并且接近最佳融合阈值下的结果.

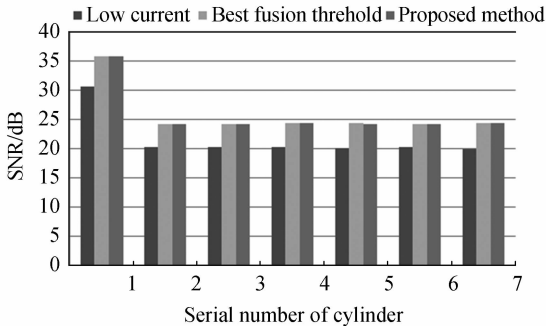


图 4 仿真变电流投影融合 CT 图像 SNR 比较

Fig. 4 Comparison of the CT image SNR from simulated multi-current fused projections

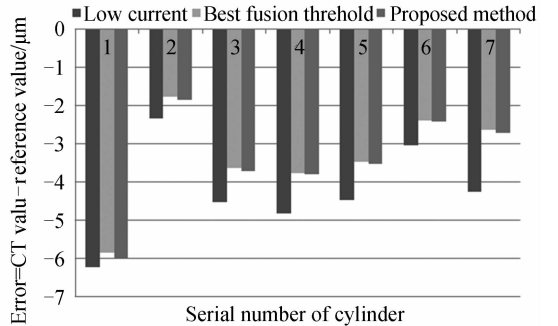


图 5 仿真变电流投影融合 CT 图像几何尺寸测量误差比较

Fig. 5 Comparison of the CT image measurement error from simulated multi-current fused projections

## 2.2 实际数据

为了进一步验证所提投影融合方法的有效性,本文针对实际工业零件开展了实验,使用的 CT 系统由 YXLon FXE 225.48 射线源和 Varian 4030E 探测器组成,实验中扫描参量如表 4,其他参量与仿真实验相同.

表 4 实际数据实验扫描参量

Parameter	Value
Acceleration voltage/kV	180
Tube current/ $\mu\text{A}$	100/300
Frame rate of detector/fps	2
Pixels of detector	3 200 (width) $\times$ 2 304 (height)

按照 Krämer 等<sup>[14]</sup>选取融合阈值的方法,本文将所提方法的融合效果与不同角度下融合阈值的最小值和均值做比较.两组对比实验各角度均采用固定不变的融合阈值,不同情况下得到的 CT 图像如图 6 所示.实际数据受到探测器本底噪声、响应不一致、散射等因素的影响,不同角度投影使用相同融合阈值带来的影响更加明显.在图 6 中通过调节对比度可以看到,当使用固定不变的融合阈值时,部分角度下投影融合的缩放因子  $s$  计算不准确,融合后的 CT 图像中在融合边缘处会出现跳跃.使用本文提出的投影融合方法,能够保证各角度下的投影具有较好融合效果,从而获得优质的 CT 图像.

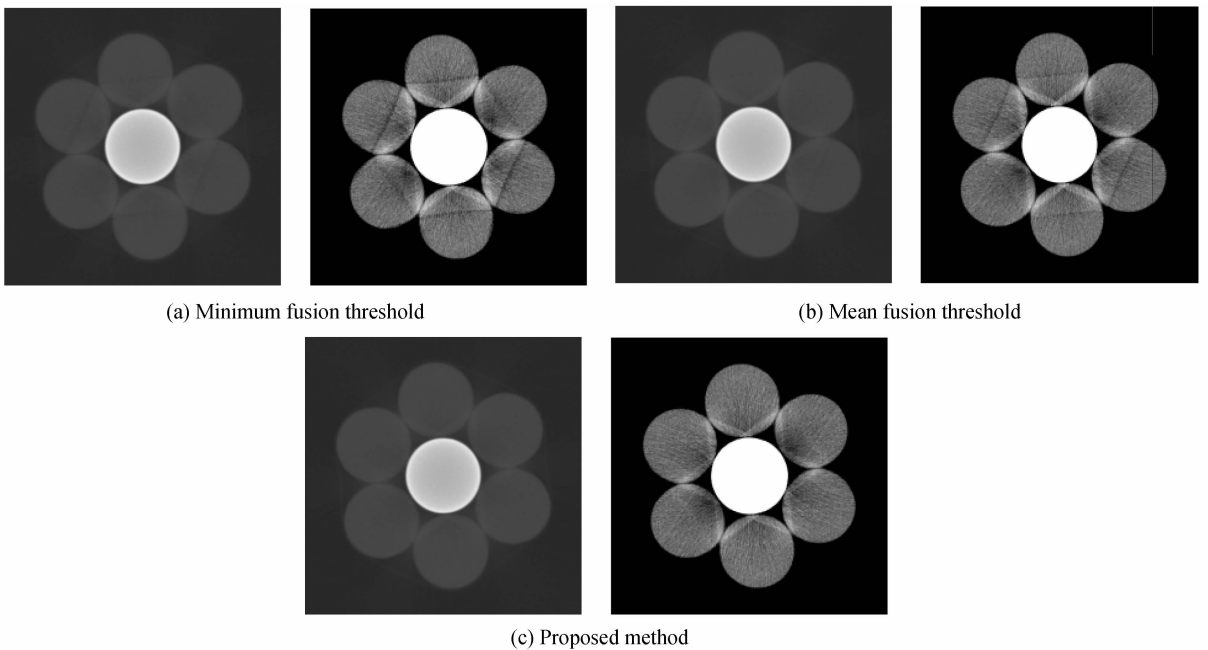


图 6 不同阈值下融合投影实际 CT 图像比较

Fig. 6 Comparison of experimental fused CT image with various thresholds

本文在比较 CT 图像 SNR 和几何尺寸测量准确度时,针对小电流、最小融合阈值和平均融合阈值三种情况展开.选择如图 2 和仿真实验完全相同的区域计算 SNR,结果见图 7.图 7 中,融合后的 CT 图像 SNR 明显优于融合前的小电流 CT 图像,并且本文方法优于两种固定融合阈值 CT 图像的 SNR.

使用和仿真实验相同的方法测量圆柱直径,结果见图 8.图 8 中,无论是外层低衰减材料还是内层高衰减材料,本文方法都能提高几何尺寸的测量准确度.外层低衰减材料在成像时更容易受到噪声等因素的影响,本文方法可有效改善该区域内侧边缘的清晰程度,因此对低衰减材料的优势更加明显.相较于传统人工选择固定融合阈值的方法,在低衰减材料区域使用本文方法投影融合的 CT 图像 SNR 可提高约 1 dB,几何尺寸测量准确度可提高约  $2 \mu\text{m}$ .

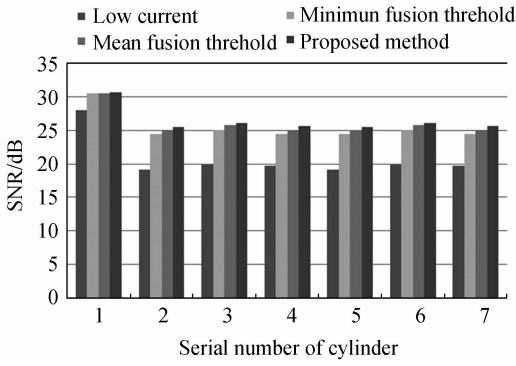


图 7 实际变电流投影融合 CT 图像 SNR 比较

Fig. 7 Comparison of SNR for the CT image from experimental multi-current fused projections

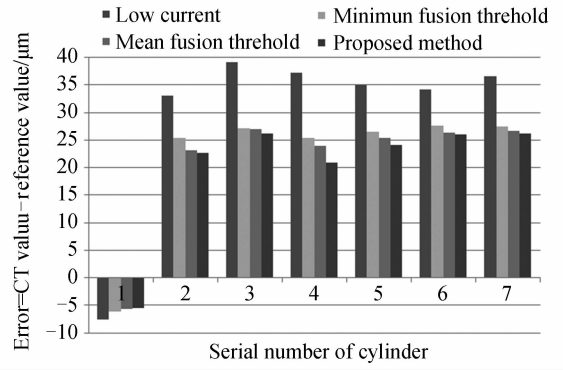


图 8 实际变电流投影融合 CT 图像几何尺寸测量准确度比较

Fig. 8 Comparison of measurement error for the CT image from experimental multi-current fused projections

### 3 结论

本文针对变电流投影融合中的阈值选择问题,提出了一种基于 DTW 的变电流投影融合方法.该方法首先提取不同电流下投影的有效边缘,计算其梯度序列,然后利用 DTW 距离对预处理后的灰度值-有效边缘梯度序列进行相似匹配,并通过计算匹配中疑似点的相关系数判断最佳融合阈值,根据阈值确定不同电流投影融合的子区域.本文方法能够扩展探测器动态范围,降低多材料物体对探测器的成像需求,从而节约硬件成本.相较于人工选择固定阈值的变电流融合投影方法,本文方法的优势主要体现在能够自动判断不同角度下的最佳融合阈值,避免了人工阈值选择不当带来的融合边界跳跃问题.仿真与实际数据实验结果进一步表明,使用本文方法融合后的 CT 图像具有更好的 SNR,基于融合后 CT 图像的几何尺寸测量准确度也获得了改善.

#### 参考文献

- [1] FANG Li-yong, LI Bai-lin, LI Hui, *et al.* Application of industrial CT in reverse engineering technology[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(7): 1620-1624.  
方黎勇, 李柏林, 李辉, 等. 工业 CT 在反求工程上的应用[J]. *强激光与粒子束*, 2013, **25**(7): 1620-1624.
- [2] KRUTH J P, BARTSCHER M, CARMIGNATO S, *et al.* Computed tomography for dimensional metrology[J]. *CIRP Annals- Manufacturing Technology*, 2011, **60**(2): 821-842.
- [3] DE CHIFFRE L, CARMIGNATO S, KRUTH J P, *et al.* Industrial applications of computed tomography[J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2014, **63**(2): 655-677.
- [4] WANG Jue, WU Li-fen, ZOU Yong-ning, *et al.* 3D measurement algorithm of CT images based on Zernike moment edge detection and polynomial fitting[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, **33**(2): 442-449.  
王珏, 伍立芬, 邹永宁, 等. ZERNIKE 矩边缘检测与多项式拟合的 CT 图像三维测量算法[J]. *仪器仪表学报*, 2012, **33**(2): 442-449.
- [5] CHEN Si, CHEN Hao, LI Jing, *et al.* Evaluation method of measurement accuracy for industrial computed tomography [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(8): 2096-2100.  
陈思, 陈浩, 李敬, 等. 一种工业 CT 测量准确度评估方法[J]. *强激光与粒子束*, 2013, **25**(8): 2096-2100.
- [6] LI Lin-sheng, LOU Chen-chen, LIN Guo-xiang, *et al.* Geometric measurement method intergrating C-V model and industrial CT[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2012, **24**(5): 649-655.  
李林升, 娄臣臣, 林国湘, 等. CV 模型与工业 CT 相结合的几何测量方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2012, **24**(5): 649-655.
- [7] LIU Bin, WANG Li-ming, SU Xin-yan. X-ray radiographic imaging technique with high dynamic range[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, **34**(4): 1104-1108.  
刘宾, 王黎明, 苏新彦. 高动态范围 X 射线成像检测方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, **34**(4): 1104-1108.
- [8] CHEN Pin, HAN Yan, PAN Jin-xiao. CT imaging method with varying energy based on logarithm demodulation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(13):138701.  
陈平, 韩炎, 潘晋孝. 基于对数解调的递变能量 CT 成像方法[J]. *物理学报*, 2015, **64**(13):138701.
- [9] CHEN Si-yu, LI Lei, YAN Bin, *et al.* Ring artifacts correction method based on dynamic current for cone beam CT[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(6): 0634001.

- 陈思宇, 李磊, 闫镜, 等. 基于动态电流的锥束 CT 环状伪影校正方法[J]. 光学学报, 2016, **36**(6): 0634001.
- [10] YANG Ying, MOU Xuan-qin, LUO Tao, *et al.* Reconstruction of X-ray image with super dynamic range by wavelet transform[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(9): 2435-2438.  
杨莹, 牟轩沁, 罗涛, 等. 基于小波变换的 X 射线图像超动态范围重建[J]. 光子学报, 2009, **38**(9): 2435-2438.
- [11] CHEN P, HAN Y, PAN J. Multi-voltage image stack reconstruction in X-ray digital imaging[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, **124**(18): 3265-3268.
- [12] LIU B, HAN Y, PAN J, *et al.* Multi-energy image sequence fusion based on variable energy X-ray imaging[J]. *Journal of X-ray Science and Technology*, 2014, **22**(2): 241-251.
- [13] SISNIEGA A, ABELLA M, DESCO M, *et al.* Dual-exposure technique for extending the dynamic range of X-ray flat panel detectors[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2014, **59**(2): 421-439.
- [14] KRÄMER P, WECKENMANN A. Multi-energy image stack fusion in computed tomography[J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, **21**(4): 045105.
- [15] ESLING P, AGON C. Time-series data mining[J]. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 2012, **45**(1): 12.
- [16] WEI Xin, YAN Bin, ZHANG Feng, *et al.* Reduction of metal artifacts caused by multiple metallic objects in computed tomography[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **63**(5): 58702.  
魏星, 闫镜, 张峰, 等. 多金属物体 CT 图像的金属伪影校正[J]. 物理学报, 2014, **63**(5): 58702.
- [17] ZHANG X, LI L, ZHANG F, *et al.* Improving the accuracy of CT dimensional metrology by a novel beam hardening correction method[J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, **26**(1): 015007.
- [18] FAHIMIYAN B P, ZHAO Y, HUANG Z, *et al.* Radiation dose reduction in medical X-ray CT via Fourier-based iterative reconstruction[J]. *Medical Physics*, 2013, **40**(3): 031914.
- [19] YAGÜE-FABRA J A, ONTIVEROS S, JIMENEZ R, *et al.* A 3D edge detection technique for surface extraction in computed tomography for dimensional metrology applications[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2013, **62**(1): 531-534.