

基于微扫描的 X 射线实时成像方法

高美静 许伟* 吴伟龙 王静媛

燕山大学信息科学与工程学院河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

摘要 为提高 X 射线实时成像系统的空间分辨力,提出了将光学微扫描技术引入原有成像系统,搭建了带有微扫描的 X 射线实时成像系统,介绍了光学微扫描 X 射线成像系统的工作原理。该光学微扫描系统得以成功应用的关键技术之一是亚像素级精度的图像配准技术。给出了频域加窗图像配准方法的原理、流程及具体步骤。利用不同配准算法对 X 射线图像进行了仿真研究,仿真结果表明该图像配准算法对于 X 射线图像的有效性,该方法将实际 X 射线图像配准的精度提高到亚像素级,具有较强的实用价值。

关键词 成像系统; X 射线成像; 微扫描; 高分辨力; 亚像素级图像配准

中图分类号 P234.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.051102

Optical Micro-Scanning X-Ray Real-Time Imaging Method

Gao Meijing Xu Wei Wu Weilong Wang Jingyuan

Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract To improve the spatial resolution of X-ray real-time imaging systems, the optical micro-scanning technology is introduced into the existing imaging system and the optical micro-scanning X-ray real-time imaging system is built. The working principle of optical micro-scanning X-ray real-time imaging systems is introduced. The sub-pixel precision image registration technique is one of the key technology of successful application of the optical micro-scanning system. The principles, processes and concrete steps of frequency-domain windowing image registration method are introduced. Simulations with different registration algorithms for X-ray image are studied. Simulation results indicate that the effectiveness of the image registration algorithm for X-ray image. The technique improves the accuracy of the actual X-ray image registration to a sub-pixel level and has a strong practical value.

Key words imaging systems; X-ray imaging; micro-scanning; high resolution; sub-pixel image registration

OCIS codes 110.7440 ; 110.2970 ; 110.4153

1 引言

射线检测广泛应用于航空、航天、核电、国防以及其他工业领域,在工业生产和国民经济中发挥了重要的作用,也是无损检测的重要方法之一^[1]。随着印制电路板集成度的提高,电路的特征尺寸越来越小,对电路板进行缺陷检测的 X 射线成像系统的空间分辨力要求也越来越高。然而现有系统的空间分辨力难以满足需要高分辨力成像的场合,传统 X 射线成像系统图像处理模块只停留在对图像进行预处理步骤^[2]。文献[3]中 X 射线成像系统的图像处理主要是灰度变换、帧叠加降噪、灰度增强、边缘锐化、图像反转等方法,从而达到优化图像质量的目的;文献[4]中 X 射线成像系统对 X 射线图像进行的预处理主要是灰度变换、图像

收稿日期: 2015-11-29; 收到修改稿日期: 2015-12-25; 网络出版日期: 2016-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(61501396)、河北省自然科学基金(F2014203220, F201403245)、河北省高等学校科学技术研究项目(QN2015021, Q2012129, QN2014034)

作者简介: 高美静(1977-),女,博士,副教授,主要从事光电成像系统与图像处理方面的研究。

E-mail: gaomeijing@126.com

* 通信联系人。E-mail: 384545759@qq.com

去噪等图像增强方法;文献[5]对图像灰度等级进行算术运算和处理以提高图像的清晰度;文献[3-5]都只是对 X 射线图像进行了图像增强处理,提高了成像的清晰度,却不能提高图像的分辨力,而提高图像分辨力最直接的办法就是提高采集设备的传感器密度。然而高密度的图像传感器价格相对昂贵,如电荷耦合器件(CCD),在一般应用中难以承受;另一方面,由于成像系统受其传感器阵列密度的限制,成像规模难以进一步减小。光学微扫描技术可在不增加探测器规模并减小探测器尺寸的情况下降低混频效应,提高系统空间分辨力^[6]。因此,本文将光学微扫描技术引入到 X 射线实时成像系统中,通过微扫描装置得到低分辨力图像序列。一组图像通常会存在一定的相关性,例如相邻图像帧场景变化较小,目标位置也接近相同,就可以认为这组序列图像包含着近似但不一致的信息。序列图像的超分辨力重建就是通过这些近似且不完全一致的信息量,实现低分辨力的图像重建出高分辨力的图像^[7]。而图像超分辨力重建技术需要精度高的图像配准技术作为基础。因此,所提出的光学微扫描系统得以成功应用的关键技术之一就是亚像素级精度的图像配准技术^[8-9]。频域图像配准拥有着精度高、速度快等优点,将频域图像配准方法应用于该系统中对 X 射线图像进行图像配准。

2 系统搭建及微扫描技术

带有微扫描的 X 射线成像系统主要由 X 射线源、平板探测器、微扫描及控制系统、计算机数字信号采集与处理及显示器等部分组成,整个系统组成框图如图 1 所示。X 射线源发出 X 射线,透照需要检测的试件,此过程 X 射线会衰减,衰减后的 X 射线携带所检测工件的内部信息到达平板探测器,平板探测器固定在微位移平台上,微位移平台控制平板探测器在水平和垂直方向上移动从而带动平板探测器实现标准 2×2 微扫描模式的微位移,可以得到多幅具有微位移的图像,利用过采样重建算法完成高分辨力重建,从而提高成像系统的空间分辨力。

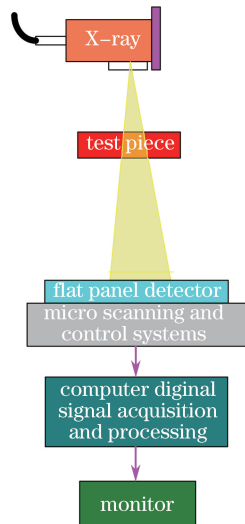


图 1 微扫描 X 射线实时成像系统组成框图

Fig. 1 Block diagram of micro-scanning X-ray real time imaging system

微扫描技术是从多幅相互之间有微小位移的时间序列低分辨力图像中重构出一幅高分辨力图像。通过微位移装置得到多幅相互错位半个像元的低分辨力图像,按照相互位移关系,进行插值、融合,得到重建高分辨力图像^[10]。根据位移产生的途径不同,微扫描技术分为可控制的微扫描和非控制的微扫描^[11]。可控制的微扫描可采用分束棱镜或控制光学元件相对成像器件微位移实现相邻图像在成像器件上的亚像素(小于 1 pixel)移动。

图 2 给出了一幅飞机图像被 2×2 微扫描低分辨力采样后的重构过程。图 2(a)~(d)表示 3×4 凝视成像探测器阵列,物体经光学系统成像到阵列上,微扫描器将图像在水平和垂直方向上做 $1/2$ 像素间距的位移。第一帧图像在图 2(a)位置处,当微扫描装置固定时,由焦平面阵列采集图像。经过时间 T ,微扫描装置将抽样位置向右移动探测器间距的一半到达图 2(b)位置,采集第二帧图像,该帧图像包含了一些第一帧场

像里没有采集到的探测器单元之间的非敏感区的信息。图像被移动到抽样位置图 2(c)时,进行第 3 帧图像的采集。这个过程重复到第 4 帧图像,并返回图 2(a)位置,开始下一帧图像的采集。最后得到一幅 6×8 的像素帧。从上述过程可以看出:在整个成像过程中,微扫描是对同一场景进行多次采样,而且视场保持不变,焦平面阵列每次位移的尺寸是相同的,都是探测器间距的 $1/2$;得到的微扫描图像的像素数目是原来的 4 倍,获取了场景的更多信息,从而大大提高了系统对场景细节的分辨能力,即空间分辨力。

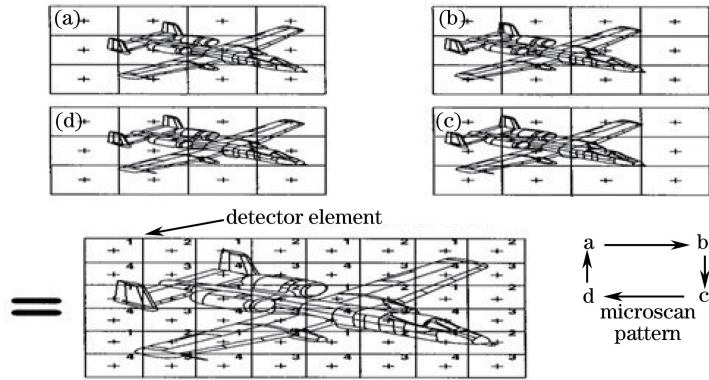


图 2 微扫描与亚像元重构过程(2×2 模式)

Fig. 2 Micro-scanning and sub-pixel reconstruction process (2×2 mode)

利用载体相对于目标的运动或随机震动产生相邻图像间的位移方式称为非控制的微扫描^[12]。实现微扫描的方法很多,国内外对各种扫描机构进行了研究,例如采用压电装置驱动透镜实现微扫描,或采用旋转平板法实现微扫描^[13]。本文方法是移动平板探测器,具体为探测器被固定在微位移平台上,控制器控制微位移平台水平、垂直方向的移动从而带动平板探测器完成微位移。微扫描器采用普爱纳米位移技术有限公司的 PI-517.2CL 系列压电扫描台作为微位移平台来实现微扫描。平板探测器则采用 Varian 公司的 PaxScan 2520D 平板探测器,其非晶硅面阵尺寸为 $25 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$,像元尺寸为 $127 \mu\text{m}$,图像灰度深度为 14 bit^[14]。

如图 3 所示,图中黑框表示探测器实际位置,虚框表示探测器原有位置。图 3(a)代表第一帧时探测器工作位置,微位移平台不移动,黑框和虚框重合;图 3(b)代表采集第二帧图像时探测器工作位置,在图 3(a)的基础上,由控制器控制微位移平台水平向右移动从而带动探测器右移;图 3(c)代表第 3 帧时探测器工作位置,在图 3(b)的基础上,微位移平台垂直向下移动带动探测器下移;图 3(d)代表第 4 帧时探测器工作位置,在图 3(c)的基础上,微位移平台向左移动带动探测器左移。通过精确控制微位移平台在水平和垂直方向的位移量,也就可以控制探测器的位移量。

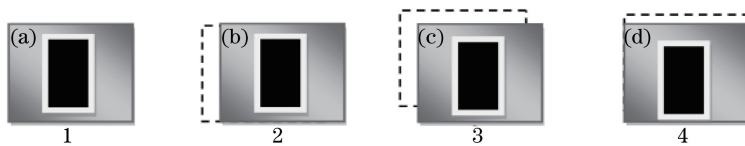


图 3 X 射线成像系统微扫描工作示意图

Fig. 3 Micro-scanning schematic of X-ray imaging system

微扫描系统为标准 2×2 微扫描模式的光学微扫描系统,即以上移动的距离均为探测器像素间距的 $1/2$ 。从而能对同一场景进行 4 次采样,得到 4 帧低分辨力图像,而且视场保持不变,通过后续的超分辨力图像重建,得到的微扫描图像的像素数目是原来的 4 倍,获取了场景的更多信息,提高了系统对场景细节的分辨能力^[15-16]。

3 亚像素级图像配准技术

理论分析表明,配准精度越高,对应的图像处理质量就越好,系统的性能就会越好。而系统实际采集的图像存在混频效应,配准精度低。为此提出一种计算量小、计算速度快、抗噪声能力强的频率图像配准方法。被配准图像的频谱包含确定偏移量的充分信息,通过精确测定傅里叶变换函数的相位变化,就能精确测定帧

间平移参数^[17]。

基于傅里叶变换的配准方法是一种在频域中确定图像帧间平移参数的基本方法,利用图像傅里叶变换相位关系等理论对图像进行配准。当图像帧间存在平移运动时,其频谱将发生相位变化,当求出相位差后,就可以得到低分辨率图像的帧间平移参数。

3.1 频域图像配准原理

根据傅里叶变换的位移性质,频域中的相位变化对应于空域中的平移变化,通过研究被配准图像的频谱,能够得到确定偏移量的充分信息。因此,要精确测定帧间平移只需要能精确测定变换函数的相位变化即可,设参考图像为 $f_1(\mathbf{x})$,经平移后为 $f_2(\mathbf{x})$, Δx_1 和 Δx_2 是水平和垂直方向位移, θ 是旋转角,则有 $f_2(\mathbf{x}) = f_1[\mathbf{R}(\mathbf{x} + \Delta\mathbf{x})]$,

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \Delta\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{bmatrix}, \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}。$$

对 $f_2(\mathbf{x})$ 求傅里叶变换得

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_2(\mathbf{u}) &= \iint_{\mathbf{x}} f_2(\mathbf{x}) \exp(-j2\pi\mathbf{u}^T\mathbf{x}) d\mathbf{x} = \iint_{\mathbf{x}} f_1[\mathbf{R}(\mathbf{x} + \Delta\mathbf{x})] \exp(-j2\pi\mathbf{u}^T\mathbf{x}) d\mathbf{x} = \\ & \exp(j2\pi\mathbf{u}^T\Delta\mathbf{x}) \iint_{\mathbf{x}} f_1(\mathbf{R}\mathbf{x}') \exp(-j2\pi\mathbf{u}^T\mathbf{x}') d\mathbf{x}', \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $\mathcal{F}_2(\mathbf{u})$ 为 $f_2(\mathbf{x})$ 的傅里叶变换, $\mathbf{x}' = \mathbf{x} + \Delta\mathbf{x}$ 令 $\mathbf{x}'' = \mathbf{R}\mathbf{x}'$, 则有如下关系

$$\begin{aligned} |\mathcal{F}_2(\mathbf{u})| &= \exp(j2\pi\mathbf{u}^T\Delta\mathbf{x}) \iint_{\mathbf{x}} f_1(\mathbf{R}\mathbf{x}') \exp(-j2\pi\mathbf{u}^T\mathbf{x}') d\mathbf{x}' = \\ & \iint_{\mathbf{x}'} f_1(\mathbf{R}\mathbf{x}') \exp(-j2\pi\mathbf{u}^T\mathbf{x}') d\mathbf{x}' = \iint_{\mathbf{x}''} f_1(\mathbf{x}'') \exp(-j2\pi\mathbf{u}^T\mathbf{R}\mathbf{x}'') d\mathbf{x}'' = \\ & \iint_{\mathbf{x}''} f_1(\mathbf{x}'') \exp[-j2\pi(\mathbf{R}\mathbf{u}^T)\mathbf{x}''] d\mathbf{x}'' = |\mathcal{F}_1(\mathbf{R}\mathbf{u})|, \end{aligned} \quad (2)$$

可见, $|\mathcal{F}_1(\mathbf{u})|$ 、 $|\mathcal{F}_2(\mathbf{u})|$ 与平移量无关,这是因为空间的平移只会影响傅里叶变换的相位值。由于每个频率不总是对应相同的角度,所以采用最小二乘法来计算平移量。

$$f_2(\mathbf{x}) = f_1(\mathbf{x} + \Delta\mathbf{x}), \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_2(\mathbf{u}) &= \iint_{\mathbf{x}} f_2(\mathbf{x}) \exp(-j2\pi\mathbf{u}^T\mathbf{x}) d\mathbf{x} = \iint_{\mathbf{x}} f_1(\mathbf{x} + \Delta\mathbf{x}) \exp(-j2\pi\mathbf{u}^T\mathbf{x}) d\mathbf{x} = \\ & \exp(j2\pi\mathbf{u}^T\Delta\mathbf{x}) \iint_{\mathbf{x}} f_1(\mathbf{x}') \exp(-j2\pi\mathbf{u}^T\mathbf{x}') d\mathbf{x}', \end{aligned} \quad (4)$$

$$\mathbf{u}\Delta\mathbf{x} = \frac{f_{\text{angle}}[(\mathcal{F}_2(\mathbf{u}^T)/(\mathcal{F}_1(\mathbf{u}^T))]}{2\pi}, \quad (5)$$

利用(5)式可求出平移量。

为了抑制成像模型对图像边缘造成的影响,对图像加 Tukey 窗,

$$W(n) = \begin{cases} 1.0, & 0 \leq |n| \leq \alpha \frac{N}{2} \\ 0.5 \left\{ 1 + \cos \left[\pi \frac{n - \alpha \frac{N}{2}}{2(1 - \alpha) \frac{N}{2}} \right] \right\}, & \alpha \frac{N}{2} \leq |n| \leq \frac{N}{2} \end{cases}, \quad (6)$$

式中 α 取值为 0.25、0.5、0.75。 N 为图像的行或列的像素数, n 取值 $0 \sim N$ 中任意数,代表第 n 个像素。

3.2 频域图像配准步骤

- 1) 对原始 X 射线图像进行图像预处理:去噪,对比度增强等;
- 2) 对模拟生成的原始低分辨率图像加 Tukey 窗,用于减少因退化造成的图像边界变形;
- 3) 对加窗后的图像进行傅里叶变换;
- 4) 选取频谱低频一定范围内的像素进行配准;原因是图像低频部分包含的能量大,混叠现象小;

5) 根据相位差利用最小二乘法求出平移量。流程图如图 4 所示。

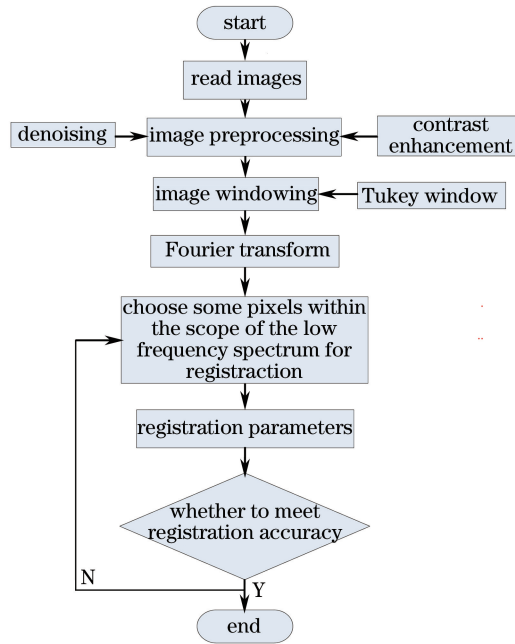


图 4 频率域图像配准方法步骤流程图

Fig. 4 Flowchart of frequency domain image registration steps

4 仿真及实验研究

选用电路板 X 射线图像进行仿真。由原始的 $450 \text{ pixel} \times 450 \text{ pixel}$ 图像得到 $225 \text{ pixel} \times 225 \text{ pixel}$ 的图像, 将该图像作为基准图。模拟实际系统的位移量, 由该基准图按模拟的位移量进行位移, 得到其他 3 幅具有给定位移量的 $225 \text{ pixel} \times 225 \text{ pixel}$ 低分辨率图像, 如图 5 所示。

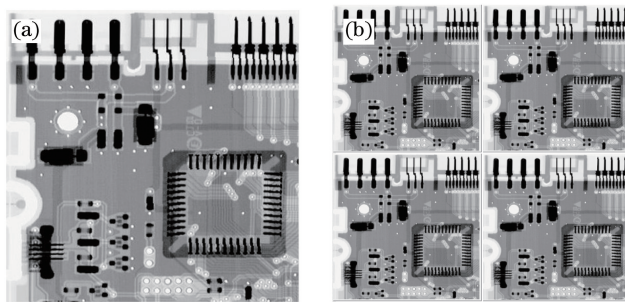


图 5 X 射线图像及其微扫描图像。(a) 原始 X 射线图像; (b) 4 帧具有微位移的 X 射线图像

Fig. 5 X-ray image and micro-scan image. (a) Original X-ray image;

(b) four frames X-ray images of micro displacement

对基于本文方法、空域算法中耗时最短精度最高的图像配准算法及普通的频域图像配准算法进行了仿真研究。配准精度与耗时的仿真结果如表 1 所示, 其中位移单位为 1 pixel , 时间单位为 1 s 。完成了 3 组不同位移的仿真研究, 每组仿真中 C_0 为基准图, 其位移量设为 $(0, 0)$, 表 1 中第一列的 $C_1 - C_0$ 表示图 C_1 相对于 C_0 , $C_2 - C_0$ 表示图 C_2 相对于 C_0 , $C_3 - C_0$ 表示图 C_3 相对于 C_0 。表 1 中第二列的 x 和 y 为其余 3 幅图 C_1, C_2, C_3 相对于基准图 C_0 的位移量, 它是模拟实际微扫描系统给定的, 其他列的 x 和 y 是利用不同配准算法计算得到的位移量, $\Delta x, \Delta y$ 为配准误差, t 为配准所用时间。

由表 1 的 3 组实验数据可知, 从空域法到频域法, 配准时间从近似 1.7 s 减少到了最低 0.04 s , 精度由 0.1 pixel 提高到 0.01 pixel , 所以频域法在速度和精度方面都比空域法有很大地提高。而加窗频域法在配准误差上从最大 0.01 pixel 减小到 0.0004 pixel , 精度也有较大提高。对于 X 射线图像, 频域图像配准算法较

空域图像配准算法不仅精度高而且速度快。而频域加窗法,进一步提高了图像的配准精度。

表1 配准精度及耗时比较

Table 1 Comparison of registration accuracy and time consuming

Images	Displacement	Spatial algorithm		Frequency domain algorithm		Proposed algorithm	
Experiment 1	x, y	x, y	t	x, y	t	x, y	t
		$\Delta x, \Delta y$		$\Delta x, \Delta y$		$\Delta x, \Delta y$	
$C_2 - C_0$	$x=0.3548$ $y=0.2486$	$x=0.4063$ $y=0.2188$ $\Delta x=0.0515$ $\Delta y=-0.0298$		$x=0.3608$ $y=0.2500$ $\Delta x=0.0060$ $\Delta y=0.0014$		$x=0.3526$ $y=0.2501$ $\Delta x=-0.0022$ $\Delta y=0.0015$	
$C_2 - C_0$	$x=0.4172$ $y=0.9547$	$x=0.5000$ $y=0.9688$ $\Delta x=0.0828$ $\Delta y=0.0141$	1.5505	$x=0.4198$ $y=0.9735$ $\Delta x=0.0026$ $\Delta y=0.0188$	0.0437	$x=0.4149$ $y=0.9616$ $\Delta x=-0.0023$ $\Delta y=0.0069$	0.0437
$C_3 - C_0$	$x=-0.2816$ $y=0.5418$	$x=-0.1875$ $y=0.5625$ $\Delta x=0.0941$ $\Delta y=0.0207$		$x=-0.2764$ $y=0.5484$ $\Delta x=0.0052$ $\Delta y=0.0066$		$x=-0.2810$ $y=0.5434$ $\Delta x=0.0006$ $\Delta y=0.0016$	
Experiment 2	x, y	x, y	t	x, y	t	x, y	t
		$\Delta x, \Delta y$		$\Delta x, \Delta y$		$\Delta x, \Delta y$	
$C_1 - C_0$	$x=0.5131$ $y=0.2245$	$x=0.6250$ $y=0.1875$ $\Delta x=0.1119$ $\Delta y=-0.0370$		$x=0.5204$ $y=0.2254$ $\Delta x=0.0073$ $\Delta y=0.0009$		$x=0.5104$ $y=0.2266$ $\Delta x=-0.0027$ $\Delta y=0.0021$	
$C_2 - C_0$	$x=0.4857$ $y=0.5241$	$x=0.5938$ $y=0.5313$ $\Delta x=0.1080$ $\Delta y=0.0071$	1.7428	$x=0.4952$ $y=0.5294$ $\Delta x=0.0095$ $\Delta y=0.0053$	0.0460	$x=0.4825$ $y=0.5264$ $\Delta x=-0.0032$ $\Delta y=0.0023$	0.0460
$C_3 - C_0$	$x=0.1154$ $y=0.4462$	$x=0.1250$ $y=0.4688$ $\Delta x=0.0096$ $\Delta y=0.0226$		$x=0.1199$ $y=0.4505$ $\Delta x=0.0045$ $\Delta y=0.0043$		$x=0.1141$ $y=0.4468$ $\Delta x=-0.0013$ $\Delta y=0.0006$	
Experiment 3	x, y	x, y	t	x, y	t	x, y	t
		$\Delta x, \Delta y$		$\Delta x, \Delta y$		$\Delta x, \Delta y$	
$C_1 - C_0$	$x=0.2015$ $y=0.6621$	$x=0.1875$ $y=0.7188$ $\Delta x=-0.0140$ $\Delta y=0.0566$		$x=0.2054$ $y=0.6719$ $\Delta x=0.0039$ $\Delta y=0.0098$		$x=0.1999$ $y=0.6647$ $\Delta x=-0.0016$ $\Delta y=0.0026$	
$C_2 - C_0$	$x=-0.4257$ $y=0.7514$	$x=-0.3125$ $y=0.8125$ $\Delta x=0.1132$ $\Delta y=0.0611$	1.6554	$x=-0.4207$ $y=0.7639$ $\Delta x=0.0050$ $\Delta y=0.0125$	0.0538	$x=-0.4273$ $y=0.7559$ $\Delta x=-0.0016$ $\Delta y=0.0045$	0.0538
$C_3 - C_0$	$x=-0.3177$ $y=0.1511$	$x=-0.2188$ $y=0.1250$ $\Delta x=0.0989$ $\Delta y=-0.0261$		$x=-0.3144$ $y=0.1516$ $\Delta x=0.0033$ $\Delta y=0.0005$		$x=-0.3173$ $y=0.1524$ $\Delta x=0.0004$ $\Delta y=0.0013$	

5 结 论

为了提高 X 射线成像系统的空间分辨力,在已有 X 射线成像系统的基础上加入 2×2 微扫描模式的光学微扫描系统,构建了带有微扫描的 X 射线实时成像系统的模型。而该系统能够成功应用的关键问题就是需要找到一种抗噪声能力强、计算量小、计算速度快的图像配准技术,该技术可以对带有光学微扫描器的 X 射线成像系统采集的 4 幅低分辨力图像进行位移判断,从而为后续高分辨力重建奠定基础。提出了一种适合 X 射线图像的精度高、实时性好的频域图像配准技术,给出了该方法的原理及流程步骤,完成了实验及仿真研究。实验结果表明频域图像配准算法满足 X 射线实时成像系统所要求的速度和精度,为今后 X 射线图像的超分辨力重建奠定了基础。

参 考 文 献

- 1 S E Voribeichikov, V A Vdod, V Aklimenov, *et al.*. An algorithm for the automatic detection of inclusions in an inspected object with a scanning digital X-ray imaging system (one-dimensional variant) [J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2014, 50(6): 359-368.
- 2 Qiao Naosheng, Zhang Fen, Li Xiaoqin. Defect image preprocessing of printed circuit board[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(2): 021003.
乔闹生, 张奋, 黎小琴. 印刷电路板光板缺陷图像预处理研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(2): 021003.
- 3 Jing Feng. X-ray imaging system used in non-destructive testing [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2004, 2: 21-23.
荆 峰. X 射线实时成像系统在不损检测中的应用[J]. 航天制造技术, 2004, 2: 21-23.
- 4 Liu Niancong, Fang Fang. Research X-ray imaging system NDT[J]. Lifting the Transport Machinery, 2009, 4: 67-70.
刘念聪, 方 方. 无损检测中 X 射线实时成像系统的研究[J]. 起重运输机械, 2009, 4: 67-70.
- 5 Ji Guiqin, Wang Yan, Liu Bosen. Application of X-ray real time imaging system to industrial nondestructive testing[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Teacnology, 2014, 28(4): 47-50.
吉桂琴, 王 岩, 刘柏森. X 射线实时成像系统在工业无损检测中的应用[J]. 黑龙江工程学院学报, 2014, 28(4): 47-50.
- 6 S S Young, R G Driggers. Super-resolution image reconstruction from aliased FLIR imagery[J]. Army Research Lab Adelphi MD, 2004: A431600.
- 7 Chen Jian, Gao Huibin, WangWeiguo, *et al.*. Methods and applications of image super-resolution restoration[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(2): 020004.
陈 健, 高慧斌, 王伟国, 等. 图像超分辨率复原方法及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(2): 020004.
- 8 S Hwang, Y Choi, S Koo. Shape reconstruction and inspection using multi-planar X-ray images[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014, 15(8): 1545-1551.
- 9 Li Jun, Peng Yuemin, Fan Zhihua. A survey of sub-pixel image registration methods [J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(11): 2070-2075.
黎 俊, 彭跃民, 范值华. 亚像素级图像配准算法研究[J]. 中国图像图形学报, 2008, 13(11): 2070-2075.
- 10 Li Yapeng, He Bin. Improving image quality by using CCD subpixel imaging[J]. Acta Optical Sinica, 2015, 35(2): 0211001.
李亚鹏, 何 斌. 采用 CCD 错位成像技术提高图像质量[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0211001.
- 11 J M Wiltse, J L Miller. Imagery improvements in staring infrared imagers by employing subpixel microscan[J]. Optical Engineering, 2005, 44(5): 056401.
- 12 Wu Xinshe, Cai Yi. The optical micro scan technology in the infrared staring imaging system[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2007, 26(1): 10-14.
吴新社, 蔡 毅. 红外凝视成像系统中的光学微扫描技术[J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(1): 10-14.
- 13 Chen Weili, Xu Chao, Jin Weiqi, *et al.*. Finite element analysis and optical micro-scanner based on ferroelectric ceramics [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2008, 28(11): 1003-1007.
陈伟力, 徐超, 金伟其, 等. 基于压电陶瓷的微扫描器及其有限元分析[J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(11): 1003-1007.
- 14 M Gao, W Xu, W Wu, *et al.*. Optical microscanning X-ray real-time imaging system[C]. International Conference on

- Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering, 2014: 1134-1138.
- 15 Zhang Haitao, Zhao Dazun. Mathematics theory and realization of aliasing reduction in opto-electric imaging system using micro-scanning[J]. Acta Optica Sinica, 1999, 19(9): 1263-1268.
张海涛, 赵达尊. 微扫描减少光电成像系统频谱混淆的数学原理及实现[J]. 光学学报, 1999, 19(9): 1263-1268.
- 16 Gao Meijing, Gu Haihua, Guan Congrong, *et al.*. Adaptive position calibration for thermal microscope imaging system [J]. Acta Optical Sinica, 2013, 33(1): 0111002.
高美静, 顾海华, 关丛荣, 等. 显微热成像系统自适应位置标定方法[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0111002.
- 17 Gao Meijing. Investigation of high resolution optical micro-scanning thermal microscope imaging system [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2008: 11-21.
高美静. 高分辨力光学微扫描显微热成像系统的研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2008: 11-21.