

# OpenMP 与环形缓冲技术在 TFT-LCD 缺陷检测中的应用

胡海兵<sup>1</sup> 徐挺<sup>1</sup> 张波<sup>1</sup> 徐东建<sup>1</sup> 金施群<sup>1</sup> 卢荣胜<sup>2</sup>

(合肥工业大学特种显示技术国家工程实验室现代显示技术省部共建国家重点

实验室光电技术研究院 合肥 230009)<sup>1</sup>

(合肥工业大学仪器科学与光电工程学院 合肥 230009)<sup>2</sup>

**摘要** 针对 TFT-LCD 玻璃基板缺陷检测过程中数据流量大、数据处理流程复杂、数据输入输出时序性要求高等问题,文中提出了一种使用环形缓冲和 Open MP 的多线程并行处理方法。该方法利用 Open MP 技术来实现复杂的多核并行处理,以达到充分利用多核处理器资源来提高数据处理能力的目的。同时,该方法在缺陷数据输入、数据处理、数据输出等流程中,利用环形缓冲技术进行数据分流,从而实现多线程并行处理与实时稳定输出。将该方法应用到实时缺陷检测系统中,使检测系统的处理速度提高了约 2~3 倍,数据输出时间误差降低了 70%~80%,这充分表明了该方法的实用性和有效性。

**关键词** 并行处理,缺陷检测,Open MP,环形缓冲

**中图分类号** TP311.11 **文献标识码** A

## Application of Open MP and Ring Buffer Technology in Defects Detection of Glass Substrate

HU Hai-bing<sup>1</sup> XU Ting<sup>1</sup> ZHANG Bo<sup>1</sup> XU Dong-jian<sup>1</sup> JIN Shi-qun<sup>1</sup> LU Rong-sheng<sup>2</sup>

(National Engineering Laboratory of Special Display Technology, National Key Laboratory of Advanced Display Technology, Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)<sup>1</sup>

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)<sup>2</sup>

**Abstract** In the process of defect detection of TFT-LCD glass substrates, in order to solve the problems of large data flow, complex data processing flow and high requirement of timing of data input and output, a multi-threaded parallel processing method by using ring buffer and Open MP was proposed. This method uses Open MP technology to realize multi-core parallel processing of complex processing, so as to make full use of the resources of multi-core processors and improve the ability of data processing. At the same time, in the process of defect data input, data processing and data output, multi-threaded parallel processing and real-time stable output can be realized by ring buffer technology. This method was applied to the real-time defect detection system, and the processing speed of the system is increased by 2 to 3 times, the time error of data output is reduced by 70% to 80%, which fully demonstrates the practicability and effectiveness of this method.

**Keywords** Parallel processing, Defect detection, Open MP, Circular buffer

近年来,由于薄膜晶体管-液晶显示屏(TFT-LCD)的全彩色显示能力、功耗低和重量轻等特点,使得 TFT-LCD 被广泛应用于各种电子设备中,如电视机、数码相机、笔记本电脑等<sup>[1]</sup>。但在产品制造过程中,由于生产环境不理想、制造工艺不规范等各种技术原因,产品表面不可避免的会产生多种缺陷,如液晶面板的基板玻璃和滤光片表面含有针孔、划痕、颗粒、MURA 等<sup>[2]</sup>。由于缺陷的种类繁多且复杂,为了保证显示质量并提高产量,TFT-LCD 玻璃基板表面缺陷检测已经成为了其制造过程中的一项重要工作。TFT-LCD 表面缺陷的检测方法包括人工视觉检测法、自动光学检测法、电学参数检测法 3 种,其中自动光学检测法是一种自动化、高性能的检测方法,不需要或需要较少的人工干预,是当前发展最快的表面缺陷检测方法之一<sup>[3]</sup>。

在科技的推动下,TFT-LCD 平板显示器的产品尺寸不断扩大、产量不断增加,推动 TFT-LCD 玻璃基板生产线的优化升级,对检测系统的检测效率和实时性提出了更高的要求。同时,玻璃基板尺寸从应用于 9 寸以下移动产品的二代生产线生产的 370 mm \* 470 mm,发展到能产出 8 片 70 寸液晶面板的十一代生产线生产的 3 m \* 3.3 m,这对于检测系统而言意味着更大的检测范围和更大的数据量。以常见的 6 代生产线生产的 1500 mm \* 1800 mm 玻璃基板产品为例,10 s 内数据量即可达到 100 GB 以上,采用 FPGA 图像采集与预处理卡+10 台多核 CPU 分布式机群的二级主从式并行处理技术方案<sup>[4]</sup>的情况下,每台工控子机的数据流量也达到了 1 GB/s。传统的串行处理方式一方面无法达到处理速度的要求,容易造成数据拥堵、冲突和丢失;另一方面其稳定性差,各处理环

节中容易产生时间误差积累,也无法达到系统输出的时序性要求。因此,需要引入并行处理的相关技术以进一步提升数据的处理效率,保证系统的实时性。环形缓冲区技术通过调整事件源的发生周期,满足了多事件并行处理的要求,使系统中各处理环节达到负载均衡<sup>[5-6]</sup>。多核并行处理技术也极大地提升了处理速度<sup>[7]</sup>,其中 Open MP 作为共享内存并行计算机的可移植编程接口,提供了一套扩展标准 C/C++ 和 FORTRAN 的指令<sup>[8]</sup>,使开发者可以不用关心线程创建、同步、分配和回收的细节,使多核并行处理技术的应用更加简易、方便<sup>[9]</sup>。该技术已被广泛应用于各类复杂处理算法<sup>[10-11]</sup>、实时数据处理<sup>[12]</sup>、大规模数据分析等领域<sup>[13]</sup>。因此,本文重点研究了 TFT-LCD 玻璃基板缺陷检测系统中,多核 CPU 分布式机群工控机上的数据处理系统的结构模型<sup>[14]</sup>,提出了一种在多核环境下利用环形缓冲和 Open MP 对图像处理流程进行并行优化的处理方法,并在 Windows 平台下,应用 VS2013+MFC,在 64 位编译环境下进行了设计和实现,并通过 TFT-LCD 玻璃基板的实时检测系统,进行了性能检测。

### 1 缺陷检测系统原理

在中小型尺寸玻璃基板产品中,以 5 代线产品最为普及。本节主要介绍了 TFT-LCD 玻璃基板实时缺陷检测系统,检测对象为 5 代生产线生产的尺寸为 1000 mm × 1200 mm 的玻璃基板。系统使用 4 台线阵 CCD 相机采集图像数据,相机单行扫描为 15424 个像素点,取 1024 行组成一帧图像进行传输,即输入图像大小为 15424 × 1024。系统采集频率为 20000 行/s,帧率约为 20 帧/s,即每秒处理 1.2 GB 的数据。其系统结构图如图 1、图 2 所示。

TFT-LCD 液晶玻璃基板放到传送平台上由传送装置拖动至相机处,此过程中会前后经过两个光电传感器:光电传感器 1 和光电传感器 2。光电传感器 1 检测到玻璃经过时会触发背景光源开关,背光照明主要用于相机曝光和检测不透明物体的外围轮廓特征,以及透明物体内部气泡、杂质异物等<sup>[15]</sup>;光电传感器 2 检测到玻璃经过时会触发相机开始采集图像,4 台相机采集的图像会分别传输到 4 台工控机,采用并行处理系统进行相应的算法处理,缺陷检测和缺陷分类的结果通过无线网络上传到服务器进行保存。另外,用户可以通过分屏器对每一台相机进行操作,以达到实时监测和修改检测系统的目标。

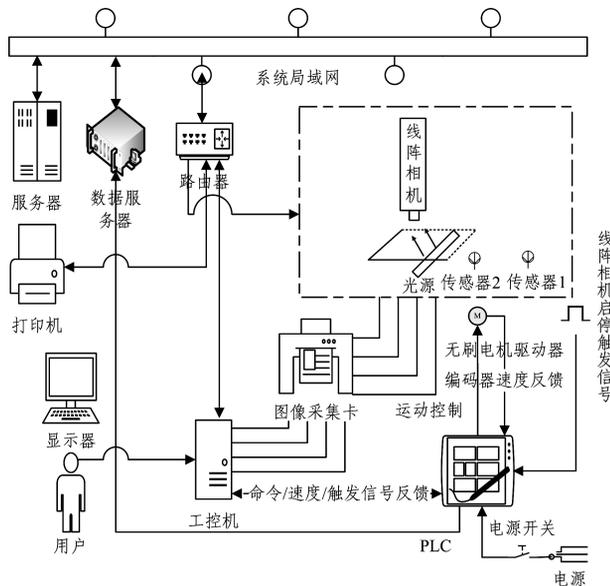


图 1 TFT-LCD 玻璃基板缺陷检测系统结构图

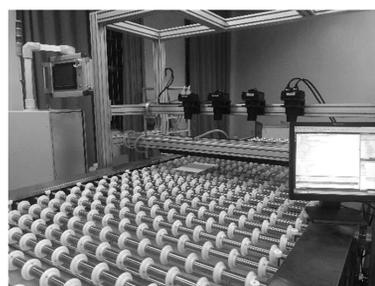


图 2 TFT-LCD 玻璃基板缺陷检测系统

### 2 图像数据处理流程及并行设计

#### 2.1 系统处理流程

基于 TFT-LCD 玻璃基板缺陷检测系统的原理,可以将缺陷检测系统分为运动控制、光源、相机采集、上位机处理以及数据存储 5 个部分。运动控制部份控制玻璃基板的拖动速度及相机触发;光源部分给相机曝光以保证图像采集的完整性;4 台相机用来以 15 K × 1 K × 20 × 4(Byte)/s 采集玻璃图像;上位机处理部分主要对相机采集的原始图像进行算法处理,检测出缺陷并分类;数据存储部份把检测结果上传至服务器存储供用户使用。整个实验系统的硬件框图和工作流程图如图 3 所示。

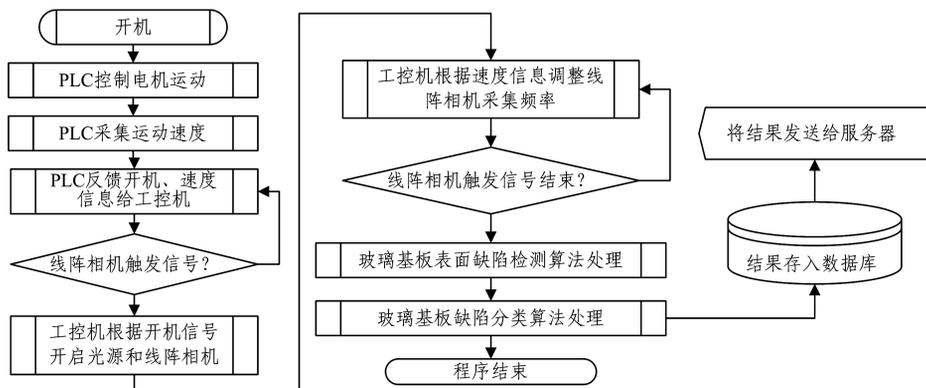


图 3 TFT-LCD 玻璃基板缺陷检测系统工作流程图

为了得到检测目标的缺陷信息,需要对由 CCD 相机采集到的玻璃基板原始图像进行多种算法处理,其处理算法及流

程因检测目标的不同而具有极大差异,但基本包含5个阶段,即缺陷图像获取、图像预处理、缺陷检测、缺陷特征提取和Blob分析、缺陷分类等。以 TFT-LCD 液晶平板检测为例,玻璃基板缺陷检测和分类算法的处理过程如图 4 所示。

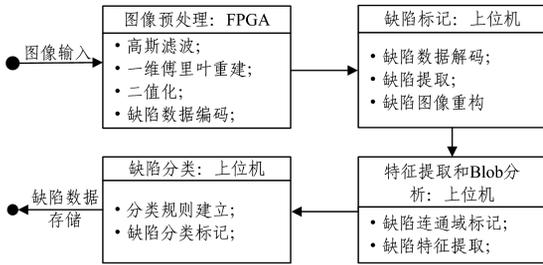


图 4 TFT-LCD 液晶平板检测数据流程图

由于相机图像输入、FPGA 预处理两部分的时序性强,一旦调试并编译通过,就可以作为稳定、可靠的数据模块,因此本文主要研究上位机部分的数据处理流程。其中,缺陷标记可以抽象为数据输入处理环节;特征提取和 Blob 分析可以抽象为缺陷数据处理环节;缺陷分类和缺陷数据存储可以抽象为缺陷数据输出处理环节。由此,上位机数据处理可简化为输入、处理和输出 3 个环节。

## 2.2 数据负载均衡

对于自动光学检测系统,其基本特征是输入、输出具有严格的时序性要求。系统的数据输入周期受到了相机分辨率、镜头放大倍率、检测物的尺寸、运动状态的影响,一般表现为一个恒定的时间间隔。而数据输出受到后续工序的影响,也具有固定的时序性要求。但由于检测图像的差异性,图像数据的各个环节所需的处理时间表现为在一定范围内波动,而最终的处理时间在各环节的误差积累下,容易产生较大波动。因此,为了达到系统输入、输出的时序性要求,在输入、处理与输出间设计环形缓冲<sup>[16]</sup>以调整处理事件的发生周期,从而将系统处理工作分摊到 3 个相对独立的处理模块中并行处理,均衡程序负载。其逻辑结构如图 5 所示。

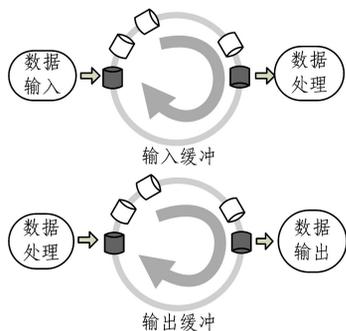


图 5 系统负载均衡化数据结构

引入环形缓冲区可以提升检测系统的时间稳定性,达到系统负载均衡的要求,其主要表现为:对于单一环节,当其处理时间低于正常用时,其输出可以暂存于缓冲区中,并继续处理下一帧图像的数据,不用等待数据的后续处理;反之,当该环节耗时较长时,后续环节将处理缓冲区中存入的其他元素。此外,环形缓冲区的存在使得缺陷数据输入、处理和输出环节可以并发进行,单帧图像的输出时间误差将不再为 3 个环节的误差累积,而取决于各环节时间误差的最大值。由此可以在一定程度上减小图像处理的时间波动。

## 2.3 并行处理与数据分流设计

在原始系统中,对于相机采集的每一帧图像,上述流程中的各处理环节依次发生,单帧图像的处理时间为:  $T = \sum t_i$ , 即处理总时间为上位机数据输入、处理、输出 3 个过程的时间总和。则串行处理检测系统的实时性要求为:  $\sum t_i \leq t_{input}$ 。

在并行处理系统中,并行主要表现为两个方面:处理流程的并行和图像的并行<sup>[17-18]</sup>。其中,处理流程的并行指通过创建多个独立线程,使同一时间图像的不同处理流程能同时进行;图像的并行指通过将连续输入的图像错位处理,使不同先后顺序的图像在系统中处于不同处理环节,在保证图像先入先出的同时,使系统内部同时处理多帧图像。在并行系统中,只要满足:  $\max_{0 \leq i \leq n} \{t_i\} \leq t_{input}$ , 即各环节的处理时间均不大于图像的输入间隔时间,则不会产生数据堆积而影响实时性。以 TFT-LCD 液晶平板检测为例,其并行系统结构如图 6 所示。

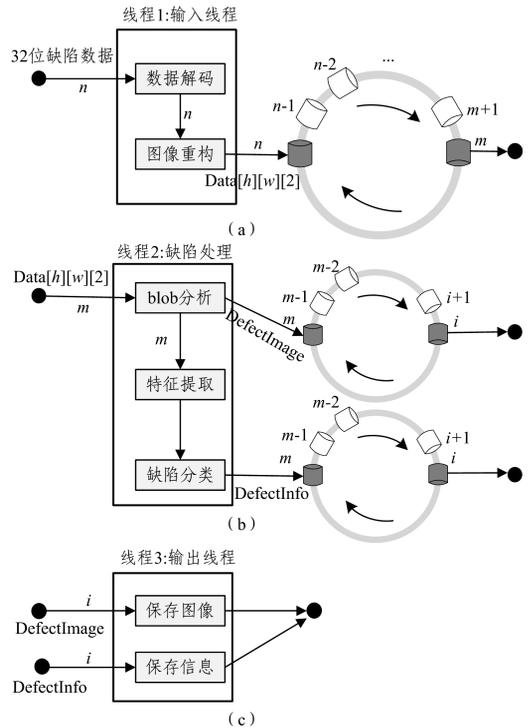


图 6 TFT-LCD 并行系统结构图

其中,图 6(a)表示上位机处理的输入处理环节。从下位机获得帧号为  $n$  的图像的缺陷编码数据,进行数据解码与图像重构后得到  $Data[h][w][2]$  并存入缓冲。 $h$  和  $w$  表示图像长宽尺寸,  $Data[i][j][0]$  记录像素点  $(i, j)$  的原始图像灰度信息,  $Data[i][j][1]$  记录缺陷信息<sup>[19]</sup>。图 6(b)表示上位机处理的缺陷处理环节。取出输入缓冲的首端数据,其帧号为  $m$ 。对第  $m$  帧图像进行缺陷 Blob 分析可以分离缺陷,将分离后的缺陷图像信息存入输出缓冲 1 中,通过特征提取和缺陷分类将获得第  $m$  帧图像的缺陷信息,并将其存入输出缓冲 2 中。图 6(c)表示上位机处理的输出处理环节。系统将定时从输出缓存 1、2 中取出帧号为  $i$  的图像的缺陷分割图和缺陷信息,并将其保存成图片和文档的形式。显然,在此并行系统中,第  $n$  帧图像的输入处理、第  $m$  帧图像的缺陷处理、第  $i$  帧图像的输出处理是同时进行的。

## 2.4 Open MP 多核并行设计

为了充分利用多核处理器资源,进一步加快处理效率以减少各并行环节的处理时间,将各并行处理环节中的复杂处

理模块通过 Open MP 优化,使之在处理器计算时达到多核并行的效果。以 TFT-LCD 液晶平板并行检测系统为例,各线程的主要耗时在于尺寸为  $15424 \times 1024$  图像的遍历以及其他数据量大的循环。以缺陷数据解码和图像重构为例,使用 Open MP 优化其循环结构关键代码如下:

```
iPtr1=Fg_getImagePtrEx(fg,frameNo1,1,mem);
//从下位机对象 fg,传输端口 1,缓冲容器 mem 中获得帧号为 frame-
No1 的图像地址指针;
UINT * imageMemory1=<UINT*>(iPtr1);
//获得下位机传输端口数据指针 * imageMemory1
Fg_getParameter(fg,FG_TRANSFER_LEN,&DMAlength,1);
//编码数据长 DMAlength=缺陷点数 * 4BYTE
BYTE * data=new BYTE[1024 * 15424 * 2];
omp_set_num_threads(4);
//设置多核线程数
#pragma omp parallel for
//多核初始化 data;
for (int i=0;i<1024;i++){
    for (int j=0;j<15424;j++){
        *(data+(i * 15424+j) * 2)=128;
        *(data+(i * 15424+j) * 2+1)=0;}}
#pragma omp parallel for
//多核遍历编码数据
for (int i=0;i < DMAlength / 4- 1;i++){
    UINT rleData1 = * (imageMemory1+i);
    Decode(rleData1,data);}
//解码 rleData1,于 data 中记入缺陷,重构图像
```

### 3 性能测试及分析

在同样的环境下分别对传统处理方法和本文所提出的并行处理方法进行测试,其测试的环境如表 1 所列。

表 1 测试环境

相关配置项	指标
CPU	i7-4790,4 核 8 线程
内存/G	16
硬盘/TB	1
操作系统	Windows7,64 位
软件环境	VS2013+Open MP

测试实验基于 TFT-LCD 玻璃基板表面缺陷检测系统的实际性能要求,主要针对输出时序性、检测效率。测试检测效率的实验中,软件系统的数据处理时间与样品中的缺陷数量有关,即与采集到的单帧图像上的缺陷点数量有关。因此,通过建立模拟样品缺陷图像,人为控制缺陷数量,形成不同缺陷等级的样品图像作为软件系统输入,从而获得两种方法在检测不同缺陷样品时的检测效率。实验结果如表 2 所列。

表 2 检测效率实验结果

缺陷数(pt)	输入(s)	处理(s)	输出(s)	总计(s)	串行(s)
$4 \times 10^4$	0.033	0.045	0.02	0.045	0.114
$8 \times 10^4$	0.041	0.045	0.023	0.045	0.131
$12 \times 10^4$	0.046	0.051	0.021	0.051	0.143
$16 \times 10^4$	0.048	0.054	0.023	0.054	0.157

对比软件系统的性能参数,可以看到改进后系统的处理时间远少于传统方法,相差约为 2~3 倍。效果比较如图 7 所示。

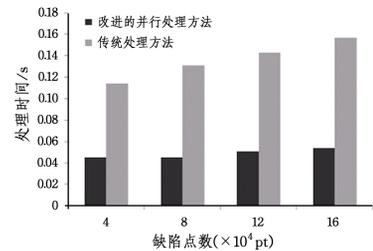


图 7 检测效率对比图

测试系统输出时序性的实验中,使用 TFT-LCD 液晶平板检测实验平台,采集样品 TFT-LCD 液晶平板的实时图像并统计系统输出时间间隔,以测试系统的输出时间的稳定性,从而判断系统的负输出时序性。从实验结果上看,改进后的并行系统的输出时间间隔稳定性远高于原始系统,两者相差一个量级。其 100 帧图像统计参数如表 3 所列。

表 3 输出稳定性统计结果

	输出时间/s	
	并行	原始
均值	0.0414	0.1173
标准差	0.001	0.02
误差范围	$\pm 0.004$	$\pm 0.03$

**结束语** 本文以减少处理时间,提升系统的输出时序性和输出稳定性为目标,结合环形缓冲和 Open MP 提出了一种并行处理优化方法。该方法首先将复杂问题分解为多个子模块并行解决,使系统实时图像处理能力不再受限于单幅图像的处理总时间,而是受限于 CPU 资源和各处理模块中的最大处理时间,从理论上提升了系统处理能力;其次,将复杂计算分配给计算机多核并行处理,从技术上加快了计算效率;最后,通过环形缓冲调整系统的输入输出时序,从技术上增强了系统时序性。针对不同等级缺陷样本的重复处理实验,该方法的处理时间均远小于传统处理方法,验证了其处理能力。实时检测实验中,该方法的输出时间波动性也远低于传统方法,证明了对系统时序性的提升。未来将研究如何保证复杂并行系统的稳定性和鲁棒性。

### 参考文献

- [1] ZHANG T, LU R. Automatic period selection for dft method in the application of tft-lcd panel detection[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(3): 361-373.
- [2] YANG S W, LIN C S, LIN S K, et al. Automatic defect recognition of TFT array process using gray level cooccurrence matrix [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(11): 2671-2676.
- [3] LU R S, SHI Y Q, LI Q, et al. AOI Techniques for Surface Defect Inspection[J]. Applied Mechanics and Materials, 2010, 36: 297-302.
- [4] 卢荣胜, 吴昂, 张腾达, 等. 自动光学(视觉)检测技术及其在缺陷检测中的应用综述[J]. 光学学报, 2018, 437(8): 23-58.
- [5] 王亚军, 李建文, 吉方. 基于环形缓冲区的实时系统负载均衡技术[J]. 计算机应用与软件, 2005, 22(4): 38-39.
- [6] WANG Y. Load balance technique on real time system based on ring buffer [J]. Computer Applications & Software, 2005: 38-39, 112.

- [7] KIM C G, KIM J G, LEE D H. Optimizing image processing on multi-core CPUs with Intel parallel programming technologies [J]. *Multimedia Tools & Applications*, 2014, 68(2): 237-251.
- [8] CHAPMAN B M. Shared Memory Parallel Programming with Open MP [M]. *International Workshop on OpenMP Applications and Tools*, Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [9] CHAPMAN B, JOST G, VAN D P R. Using OpenMP: Portable Shared Memory Parallel Programming [J]. *Journal of Computer Science & Technology*, 2010, 10(3).
- [10] YAMAZAKI I, KURZAK J, WU P, et al. Symmetric Indefinite Linear Solver using OpenMP Task on Multicore Architecture [J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2018; 1-1.
- [11] WU G, CHEN Q, CAO F, et al. Parallel hybrid genetic algorithm for sat problems based on OpenMP [C] // *International Conference on Intelligent Systems & Knowledge Engineering*. IEEE, 2018.
- [12] ZHANG Q, ZHAO Q. Application of Parallel Computing with OpenMP in Global Ionosphere Mapping [J]. *Geomatics & Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(2): 227-233, 240.
- [13] 柳建, 孙胜军, 毛国平, 等. 蒙特卡洛模拟的并行实现及并行效率研究 [J]. *计算机应用与软件*, 2018, 35(1): 301-303, 339.
- [14] 崔树林, 张旭, 张树清, 等. 基于 GPU 的大规模栅格数据分块并行处理方法 [J]. *计算机技术与发展*, 2015(3): 19-22.
- [15] LIU Y, YU F. Automatic inspection system of surface defect son optical IR-CUT filter based on machine vision [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2014, 55(7): 243-257.
- [16] 房玮睿, 王春露. 基于缓冲池和多线程的智能交通短信平台设计与实现 [C] // *中国通信学会学术年会*. 2009; 7-11.
- [17] 刘振安, 章守信, 刘胜璞. 并行图像处理算法的设计与实现 [J]. *测控技术*, 2003, 22(5): 5-6.
- [18] 耿晓中. 基于多核分布式环境下的任务调度关键技术研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [19] 胡海兵, 薛源, 徐挺, 等. ITO 导电薄膜表面缺陷的图像特征分析 [J]. *计算机应用*, 2017, 37(S1): 198-200.

(上接第 561 页)

- [2] STOLZ D, WATTENHOFER R. Byzantine agreement with median validity [C] // *19th International Conference on Principles of Distributed Systems*, 2015.
- [3] CASTRO M, LISKOV B. Practical Byzantine fault tolerance and proactive recovery [J]. *ACM Transactions on Computer Systems*, 2002, 20(4): 398-461.
- [4] CASTRO M, LISKOV B. Practical byzantine fault tolerance [C] // *The Third Symposium on Operating Systems Design and Implementation*. Berkeley: USA, 1999; 173-186.
- [5] 范捷, 易乐天, 舒继武. 拜占庭系统技术研究综述 [J]. *软件学报*, 2013, 24(6): 1346-1360.
- [6] 袁勇, 王飞跃. 区块链技术发展现状与展望 [J]. *自动化学报*, 2016, 42(4): 481-494.
- [7] 王继业, 高灵超, 董爱强, 等. 基于区块链的数据安全共享网络体系研究 [J]. *计算机研究与发展*, 2017, 54(4): 742-749.
- [8] 张俊, 高文忠, 张应晨, 等. 运行于区块链上的智能分布式电力能源系统: 需求、概念、方法以及展望 [J]. *自动化学报*, 2017, 43(9): 1544-1554.
- [9] 袁勇, 周涛, 周傲英, 等. 区块链技术: 从数据智能到知识自动化 [J]. *自动化学报*, 2017, 43(9): 1485-1490.
- [10] 祝烈煌, 高峰, 沈蒙, 等. 区块链隐私保护研究综述 [J]. *计算机研究与发展*, 2017, 54(10): 2170-2186.
- [11] CONG L W, HE Z. Blockchain Disruption and Smart Contracts [C] // *Nber Working Paper Series*. Social Science Electronic Publishing, 2018; 1-41.
- [12] YUAN Y, WANG F Y. Development status and prospect of block chain technology [J]. *Journal of Automation*, 2016, 42(4): 481-494.
- [13] BEHL J. Scalable BFT for Multi-Cores: Actor-Based Decomposition and Consensus-Oriented Parallelization [C] // *10th Workshop on Hot Topics in System Dependability*. Broomfield, Co, 2014; 1-6.
- [14] 何蒲, 于戈, 张岩峰, 等. 区块链技术与应用前瞻综述 [J]. *计算机科学*, 2017, 44(4): 1-7.
- [15] FREY B J, DUECK D. Clustering by passing messages between data points [J]. *Science*, 2007, 315(5814): 972-976.
- [16] RODRIGUEZ A, LAIO A. Machine learning. Clustering by fast search and find of density peaks [J]. *Science*, 2014, 344(6191): 1492-1496.
- [17] WANG H, CEN Y, LI X. Blockchain router: A cross-chain communication protocol [C] // *The 6th International Conference on Informatics, Environment, Energy and Applications*. ACM, 2017; 94-97.
- [18] HERLIHY M. Atomic cross-chain swaps [C] // *Proceedings of the 2018 ACM Symposium on Principles of Distributed Computing*. ACM, 2018; 245-254.
- [19] LI Z, WANG W M, LIU G, et al. Toward open manufacturing: A cross-enterprises knowledge and services exchange framework based on blockchain and edge computing [J]. *Industrial Management & Data Systems*, 2018, 118(1): 303-320.
- [20] FRIDGEN G, RADSZUWILL S, URBACH N, et al. Cross-Organizational Workflow Management Using Blockchain Technology-Towards Applicability, Auditability, and Automation [C] // *51st Annual Hawaii International Conference on System Sciences*. 2018. 3507-3516.
- [21] LI W, SFORZIN A, FEDOROV S, et al. Towards scalable and private industrial blockchains [C] // *Proceedings of the ACM Workshop on Blockchain, Cryptocurrencies and Contracts*. ACM, 2017; 9-14.