

文章编号: 0258-7025(2009)04-1016-04

基于数字信号处理器的图像处理系统 在激光熔池温度场检测中的应用

曹 震 杨洗陈 张海明

(天津工业大学激光技术研究所, 天津 300160)

摘要 激光制造中熔池温度场的检测具有重要的实用价值, 温度场是激光加工中重要的技术参量, 它直接影响加工质量。研究其分布情况, 对于控制激光熔池形貌、改进工艺设计、提高激光加工精度和质量, 都具有重要意义。提出了基于数字信号处理器(DSP)图像处理方法, 对激光熔池温度场进行检测。采用 DSP 对图像进行实时处理, 处理过程脱离 PC 机, 简便、高效。结果表明, 采用该图像处理方法可以得到与激光加工工艺参数相关的激光熔池形貌尺寸、激光熔池温度场二维数值分布等信息。进一步发展, 可用于激光加工的在线监控和反馈控制。

关键词 激光技术; 熔池; 数字信号处理器; 温度场; 检测; 图像处理

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093604.1016

Application of Image Processing System Based on Digital Signal Processor to Temperature Field Measurement in Laser Molten Pool

Cao Zhen Yang Xichen Zhang Haiming

(Laser Processing Center, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

Abstract It is very important for temperature field testing in laser processing. Temperature field is an important parameter which affects the quality of laser processing. In order to control profile of laser molten pool and improve process design, precision and quality in laser processing, it is very necessary to study the temperature distribution. The image processing based on digital signal processor (DSP) was presented. It was used to measure the temperature field of laser molten pool. A new method of image processing was developed with DSP as personal computer, without PC. It makes the system become simple and efficient. It shows that some important informations included 2D morphology and size, numerical value distribution and dynamic characteristics of temperature field in laser molten pool can be obtained. In the future, it will be much more available on online measurement and feedback control in laser processing.

Key words laser technique; molten pool; digital signal processor; temperature field; measurement; image processing

1 引 言

研究激光熔池温度场分布情况, 对于改进激光加工质量, 调整激光加工工艺参数, 具有重要的意义, 近年来受到了广泛的关注^[1,2]。激光熔池存在亮度高、尺寸小和热过程复杂等特点^[3]。因此利用

CCD 对激光加工过程中的激光熔池进行图像采集, 所采集的图像数据需要经过增强、除噪、锐化和识别等处理。在以前工作中, 开发了基于 PC 机的 CCD 温度场检测系统, 但是基于 PC 机的处理系统在图像处理方面速度较慢, 系统体积大, 仅能离线处理,

收稿日期: 2008-06-17; 收到修改稿日期: 2008-08-11

基金项目: 天津市科技支撑计划重点项目(08ZCKFGX02300)和国家自然科学基金(60478004)资助项目。

作者简介: 曹 震(1981—), 男, 硕士研究生, 主要从事基于 DSP 的嵌入式激光加工测温系统方面的研究。

E-mail: cazen@163.com

导师简介: 杨洗陈(1941—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光材料相互作用和激光加工理论及应用等方面的研究。

E-mail: yangxich@126.com

满足不了在线和实时检测要求,特别是激光加工机器人的在线检测要求^[4,5]。数字信号处理器(DSP)运算速度快,精度高,广泛地应用于图像处理领域,而其体积小、集成性强的特点,使其更适应于在线系统的需要。利用 DSP 对图像进行处理,可有效地解决实时性问题,对激光加工过程中的在线监控和反馈控制,具有重要的意义^[6]。

2 基于 DSP 的激光熔池图像处理

数字信号处理器,是一类具有专门为数字信号处理任务而优化设计的体系结构和指令系统的通用处理器件,具有处理速度快和有复合功能的单周期指令等特点,在高速图像处理中得到了越来越多的应用^[7]。

数字信号处理算法的数据格式有定点和浮点之分,而数字信号处理系统采用的数据格式决定了它所处理信号的处理精度、动态范围和信噪比,且不同数据格式的易用性和开发难度也不一样。

基于 DSP 的激光熔池温度场检测系统,首先要针对激光熔池的特点,选择恰当的定点或浮点 DSP。由 CCD 采集的激光熔池图像每个像素小于 16 bit,模数转换时需要的比特数较低,因此选用 16 bit 定点 DSP 即可满足处理要求。在整个 CCD 采集的图像中,激光熔池所占面积很小,目标温度场信息也较少,不需要大量运算,考虑算法的复杂度和经济问题,定点 DSP 更适用于本系统。一般说来,浮点 DSP 芯片的运算精度高、动态范围大、寻址空间大、指令运算能力较强,但是,针对激光熔池图像的特点并不能充分发挥其优势。而在数据位数和浮点芯片相同的情况下,定点 DSP 芯片的运算精度与浮点 DSP 芯片基本相同,功耗、成本、体积与浮点 DSP 芯片相比较小,且易于实现,稳定性好^[8]。因此,定点 DSP 更适合于基于 DSP 的激光熔池温度场检测系统。

根据激光熔池的特点,在开发的系统中采用 TI 公司的定点 DSP: TMS320C5509 作为系统的处理器,对图像进行处理,最终生成激光熔池温度场二维数值分布图。基于 DSP 的图像处理软件开发工具,采用 TI 公司推出的 CCS(Code Composer Studio)集成开发软件。CCS 是一个开放、具有强大集成能力的开发环境,它采用了由先进的开发工具组成的直观系统,可大幅减小 DSP 编程时间,并能在极短的时间内消除实时工作中的间歇。主要流程如图 1 所示。

2.1 灰度化处理

由 CCD 拍摄到的激光熔池图像为彩色图像,无

法分辨温度梯度,为进一步作分析并得到温度分布图,首先需要将图像转换为灰度图。激光熔池彩色图像每个像素由 3 个字节表示,每个字节对应着 R, G, B 分量的亮度,转换后的黑白图像的一个像素用一个字节表示该点的灰度值,范围在 0 到 255 之间。转换关系如下

$$\text{Gray}(i, j) = 0.11R(i, j) + 0.59G(i, j) + 0.3B(i, j), \quad (1)$$

其中 $\text{Gray}(i, j)$ 为转换后的黑白图像在 (i, j) 点处的灰度值。

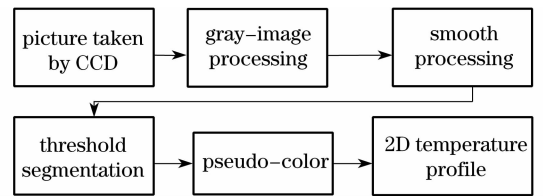


图 1 图像处理流程图

Fig. 1 Flow chart of image processing

2.2 平滑处理

CCD 拍摄的熔池图片可能会受到以下干扰: 1) 日光强度因素: 在自然光条件下拍摄熔池, 熔池温度高, 亮度高, 会对拍摄图像产生干扰。2) 被固定工件的稳定程度因素: 在加工过程中被固定在车床上的工件可能会因车床的移动产生轻微的抖动, CCD 相机同时被固定在车床上, 同样可能产生抖动, 使得拍摄图片出现重影的可能。3) 随着功率的变化, 熔池会出现火花飞溅的现象, 为后面的目标识别造成干扰。4) 当熔池超过熔点后会产生气化, 出现烟雾状的离子体, 也会为熔池边界的识别造成干扰。为消除噪声干扰, 抽出对象特征, 图像处理系统针对熔池图像的特点采用邻域平均法。设 $f(i, j)$ 为给定含噪声的图像, 经过平滑处理后为 $g(i, j)$,

$$g(i, j) = \sum f(i, j) / N, (i, j) \Rightarrow S, \quad (2)$$

其中 S 是所取邻域中各邻近像素的坐标, N 是邻域中包含的邻近像素的个数。这里采用 3×3 均值滤波法, CCS 核心程序如下

$$\begin{aligned} \text{gray_averg} = & (\text{int})(\text{gray}[j-1][i-1] + \\ & \text{gray}[j-1][i] + \text{gray}[j-1][i+1] + \\ & \text{gray}[j][i-1] + \text{gray}[j][i+1] + \\ & \text{gray}[j+1][i-1] + \text{gray}[j+1][i] + \\ & \text{gray}[j+1][i+1]) / 8 \text{gray}[j][i] = \text{gray_averg}. \end{aligned}$$

2.3 阈值分割

在 CCD 所拍摄的激光熔池图像中, 背景和目标在图像的灰度直方图上各形成一个波峰, 即背景峰和目标峰。目标与周围背景对比明显, 目标面积占图像

总面积的比例较小,所以,目标对应的灰度位于高值部分,目标对应的像素点数在灰度直方图中所占的比例较小,具有明显的目标峰和背景峰。由于在两个波峰间形成一个低谷,因而选择双峰间低谷所对应的灰度作为分割阈值,将背景和目標物分离,阈值分割处理可将熔池目标识别出来。CCS 核心程序如下

$$\begin{aligned} & \text{if}(\text{gray}[j][i] < M) \\ & \quad \text{gray}[j][i] = M, \end{aligned}$$

其中 M 即为阈值,取值可根据灰度直方图确定。

2.4 灰度图着色

灰度图像转换为彩色图像是一种图像增强技术。对预处理后的灰度图进行着色处理,对不同灰度级赋予不同的红绿蓝三色值,生成伪彩色图,通过不同颜色反映出熔池的不同温度,增强了视觉效果,同时也较为直观地反应了温度场的分布情况。CCS 核心程序中,使背景呈现白色为例。熔池部分的灰度图伪彩色处理方法与背景色处理方法相同。

3 实验方法及结果分析

3.1 实验系统构成

激光器: HL25000 型 CO_2 连续激光器,波长 $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$,额定功率 5 kW,稳定度 $\pm 5\%$,光束发散角 $\leq 10 \text{ mrad}$ 。

数控机床: 采用配有 SIEMENS 802D 系统的五轴四联动数控机床。

CCD 摄像机: 传感器为 753 pixel (水平方向) \times 582 pixel (垂直方向),隔行变换 CCD,扫描面积为 4.8 mm (水平方向) \times 3.6 mm (垂直方向);扫描: 625 行/50 场/25 帧;水平 15.625 kHz,垂直 50 Hz;镜头安装为 CS 型。

光学系统: 电动变焦镜头,中性衰减片。

图像处理系统: 以 TMS320C5509 为核心的图像处理系统。

3.2 实验结果及分析

图 2 为不同功率下 CCD 相机拍摄的激光熔池的热辐射图像,图 3 为经过 TMS320C5509 处理后的伪彩色图像。图 2 的热辐射图像不能分清熔化状态和温度分布信息,经过 DSP 进一步处理后得到伪彩色图像图 3,对系统进行标定后即可得到激光熔池的温度场二维数值分布图。由 DSP 处理得到的二维温度场分布图能清楚显示熔池的几何形状,且能给出熔化过程信息。

激光功率为 1000 W 时,熔池尺寸小,熔池边界周围温度低;随着功率增加,熔池尺寸逐渐增加,到 1800 W 时基本上为圆形分布,熔池尺寸基本趋于稳

定。随着功率增大,熔池边界温度梯度迅速增加。

测试结果表明,基于 DSP 的图像处理方法,能够快速、直观地给出激光熔池不同工况下的信息,能够实时检测整个熔池表面温度场。

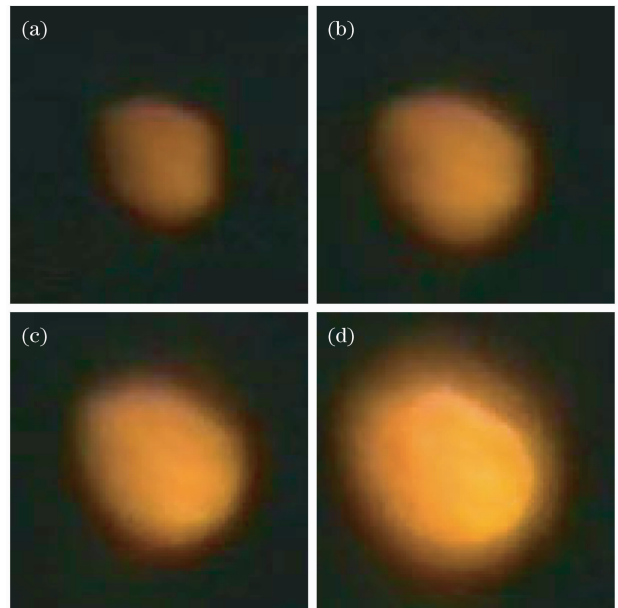


图 2 CCD 采集熔池的图像所用的激光功率为: (a) 1000 W; (b) 1400 W; (c) 1800 W; (d) 2200 W

Fig. 2 Image of molten pool taken by CCD.

The applied laser power is (a) 1000 W; (b) 1400 W; (c) 1800 W and (d) 2200 W

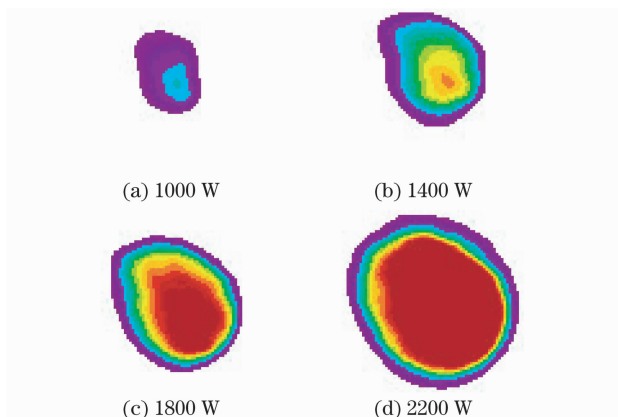


图 3 经 DSP 处理后温度场的二维分布图

Fig. 3 2D profiles of temperature field processed by DSP

3.3 DSP 与 PC 图像处理系统的比较

在以前的工作中,已经完成了基于 PC 机的图像处理系统^[9]。图 4 为激光功率在 2000 W 时,基于 PC 机的处理系统与基于 DSP 的处理系统得到的温度场二维分布图。

由比较可看出:基于 PC 与基于 DSP 的激光熔池温度场图像处理系统得到的结果基本相同,但是

基于 PC 系统的图像数据采集与处理分析工作分步进行,由 CCD 采集得到图像后,再由 PC 进行处理,无法达到实时性要求。而基于 DSP 的检测系统,CCD 与处理器直接相连,可以达到图像采集和处理同步进行,从而满足实时性要求。同时,基于 DSP 的图像采集处理系统具有诸多优点。表 1 为两种图像处理系统的比较。

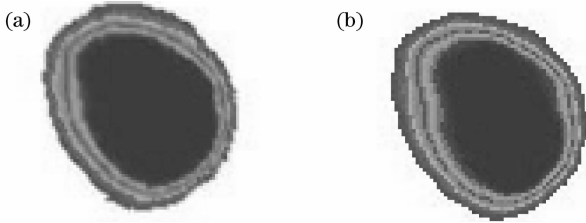


图 4 计算机(a)与 DSP(b)图像处理结果的比较

Fig. 4 Comparison between by computer (a) and DSP (b) in image processing result

表 1 基于 PC 与 DSP 的图像处理系统的比较

Table 1 Comparison of image processing system based on computer and DSP

Image processing system	PC	DSP
Real time	Bad	Good
Program code	Complex	Simple
Multiply-add	Average	Good
Volume	Large	Small
Power	High	Low
Acquisition and process	Fractional step	Synchronization
Reliability	Low	High
Performance-to-price ratio	Low	High

基于 PC 机的处理系统中,系统分为光源、图像采集设备、图像传输线缆、图像采集卡、主机等多个部分,各部分由不同厂家生产,又涉及兼容性、连接件接插、信号传输等中间环节,在恶劣环境下长时间工作时容易出现问題;而基于 DSP 的处理系统将图像采集、处理和通信部件集成到一个设备中,其可靠性和工作的稳定性明显高于基于 PC 的处理系统。在基于 DSP 的图像处理系统中,CCD 与处理器直接相连,在精度和像素一致性方面带来了一些好处,且便于直接控制。另外,基于 PC 机的图像处理系统体积大且不利于安装、拆卸和移动。

在激光加工和再制造领域,光、机、电、机器人等技术的结合,使加工设备趋于小型化,自动化,对检测设备的要求也趋于严格,特别是存在对加工设备体积限制较严的场合,如生产装置内部、移动装置等环境。DSP 具有体积小、运算功能强、稳定性好等特点,因而基于 DSP 的图像处理系统应用于激光加工在线检测和反馈系统,优势十分明显。

4 结 论

开发了基于 DSP 图像处理系统,采用平滑处理、阈值分割、伪彩色等图像处理技术。经过温度标定可以得到激光熔池温度场的分布情况,给出熔化过程信息。

基于 DSP 的激光熔池温度场检测系统具有强大的图像处理能力,满足图像处理中运算速度和处理实时性要求。

与 PC 比较,基于 DSP 的图像处理系统具有体积小、集成性强的特点,其可靠性和工作稳定性明显高于基于 PC 的处理系统,适合于激光加工过程中的在线检测和实时监控。

参 考 文 献

- 1 Yang Xichen, Lei Jianbo, Liu Yunwu *et al.*. Experimental measurement of metal powder stream concentration field in laser manufacturing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7): 993~997
杨洗陈,雷剑波,刘运武等. 激光制造中金属粉末流浓度场的检测[J]. *中国激光*, 2006, **33**(7): 993~997
- 2 Cao Ziwen, Zou Shikun, Liu Fangjun *et al.*. Laser shock processing on 1Cr11Ni2W2MoV martensite steel[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 316~320
曹子文,邹世坤,刘方军等. 激光冲击处理 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 316~320
- 3 Cheng Cheng, Ma Xingchao, Xu Zhou *et al.*. Measurement of temporal depending lasing modes of a high power transverse-Flow CO₂ laser processor[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 549~554
程成,马行超,许周速等. 高功率横流 CO₂ 激光横模随时间变化的测量[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 549~554
- 4 Chen Juan, Yang Xichen, Lei Jianbo *et al.*. Calibration study on measurement of temperature field in laser processing by CCD[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(suppl. 1): 354~356
陈娟,杨洗陈,雷剑波等. 激光加工温度场 CCD 检测中的温度标定研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(增刊 1): 354~356
- 5 Shen Yehu, Liu Jilin, Du Xin. Simultaneous three-dimensional environment reconstruction and localization based on monocular vision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 907~914
沈晔湖,刘济林,杜歆. 单目视觉的同时三维场景构建和定位算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 907~914
- 6 Steffen Bonss, Udo Karsunke. Monitoring of high power diode laser sheet metal welding[C]. *Peedings of the 23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics 2004*: 1~7
- 7 Feng Lizhi, Du Shangfeng. The design of image collection based on DSP[C]. *CSAE 2005*, 2005: 379~381
冯立志,杜尚丰. 基于 DSP 的图像采集系统的设计[C]. *中国农业工程学会 2005 年学术年会论文集*, 2005: 379~381
- 8 Yang Guanlu, Hong Huafeng. Rubbings image processing based on DSP[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2007(suppl. 1): 310~314
杨冠鲁,洪华峰. 采用 DSP 的拓片图象处理[J]. *电子测量与仪器学报*, 2007, (增刊): 310~314
- 9 Lei Jianbo, Yang Xichen, Chen Juan *et al.*. Study on design of laser molten pool temperature field measurement software by CCD[J]. *Applied Laser*, 2007, **27**(1): 5~8
雷剑波,杨洗陈,陈娟等. 激光熔池 CCD 测温系统的软件设计研究[J]. *应用激光*, 2007, **27**(1): 5~8