

基于嵌入式机器视觉的激光熔覆成形熔池离焦量 在线测控系统

王 涛 傅戈雁 石世宏

苏州大学机电工程学院, 江苏 苏州 215000

摘要 在金属激光熔覆自由三维成形中,不断生长的成形面与成形喷头之间的距离应保持恒定值,以保证生长表面上处于聚焦激光焦点附近熔池的离焦量基本不变。以光学三角法为原理,提出了一种基于嵌入式机器视觉的激光自由成形熔池离焦量在线测控系统,推导出了镜头焦距设计公式,给出了系统硬件方案以及软件方案,同时为高效稳定处理熔池图像,提出了一种基于面积的熔池灰度阈值估计算法。经测试,此测量系统能实时准确地测得熔池离焦量,将该系统运用至实际薄壁圆环成形中,实时调节光头提升速度以保持离焦量恒定,使得薄壁圆环成形精度得到明显提高。

关键词 激光技术; 激光熔覆成形; 机器视觉; 嵌入式系统; 熔池

中图分类号 TN249; TF124 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.0303011

Embedded Machine Vision Online Measure-Control System of Defocusing Amount in Laser Cladding Forming

Wang Tao Fu Geyan Shi Shihong

School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215000, China

Abstract To maintain the defocusing amount during the metal laser cladding forming experiments, the distance between the forming surface and the nozzle should be fixed. Based on optical triangle method, an embedded machine vision online measuring system for controlling the laser defocusing amount is proposed. The formula for designing the lens focal length of the measuring camera is deducted, and both hardware and software solutions are meanwhile presented. To process the gained pictures from the measuring camera effectively and stably, a new algorithm estimation based on molten pool gray threshold is used for programming. The output voltage from the measuring system is also integrated into the robot controlling coding which helps adjust the nozzle position automatically once the laser defocusing amount is offset. This measuring system is later verified through several metal laser cladding forming experiments to be stable and precise. By comparing the thin-wall cylinder forming parts, the surface roughness of the part made with the measuring system is much brighter and cleaner than the ones without this system.

Key words laser technique; laser cladding forming; machine vision; embedded system; molten pool

OCIS codes 140.3390; 150.5495; 150.5758; 350.3390

1 引 言

激光熔覆三维(3D)成形技术是指以激光为热源,以金属粉末为原材料,采用分层熔覆堆积成形三维实体的方法生产金属零件的技术。激光熔覆3D成形技术能直接制造出零构件,设备与成形工艺成本相对较低,

收稿日期: 2014-09-22; 收到修改稿日期: 2014-10-14

基金项目: 国家自然科学基金(61475107)、江苏省科技支撑计划重点(BE2012068)资助课题、江苏省光子制造科学与技术重点实验室开放基金(GZ201209)

作者简介: 王 涛(1991—),男,硕士研究生,主要从事激光熔覆成形方面的研究。E-mail: wangtao_sz@foxmail.com

导师简介: 傅戈雁(1959—),女,教授,博士生导师,主要从事激光快速成形方面的研究。

E-mail: fugeyan@suda.edu.cn(通信联系人)

能堆积中大型零构件,在研发试制和单件小批量生产场合能快速响应,有效提高研发速度或生产效率^[1-5]。

然而由于熔覆成形过程工艺工况的不稳定,可能使得成形层片的厚度偏离设定值或波动。这将造成熔池高于或低于设定的离焦位置,使熔池的离焦量发生变化和波动。在成形过程中这种误差的累积会造成成形表面凹凸不平,甚至成形失败^[6-8]。所以,保持成形过程中离焦量的恒定对于提高成形质量以及成品率至关重要。设计熔覆成形过程离焦量闭环测量控制系统,对成形离焦量进行实时检测,并反馈控制成形喷头的提升量,可有效提高成形质量以及成品率^[9-12]。以光学三角法为测量原理^[13-15],采用嵌入式处理器为平台,提出一种基于面积的灰度阈值分割算法以分割出熔池图像从而计算熔池图像重心位置,最终实现运行稳定、精度满足闭环控制需求的熔池离焦量在线测量系统。以本测量系统为核心,进行一组离焦量闭环控制薄壁圆环堆积实验,与提升量固定的薄壁圆环堆积实验相比,所得圆环的成形精度以及表面粗糙度明显提高。由于本测量系统以嵌入式数字信号处理(DSP)为运算核心,具有体积小、能耗低、处理任务单一的特点,因而相比于基于工控机测量的方案^[16],以及二维轮廓传感器的测量方案^[17]具有实时性较高、成本较低、便于集成等优点。

2 研究内容

2.1 测量原理与方案

2.1.1 测量原理

本测量方法基于光学三角法,如图1所示。测量装置与激光头通过连接架连接。从激光头中发出的聚焦激光束照射在加工表面,形成高亮的熔池。镜头将熔池实像投影在互补金属氧化物半导体(CMOS)图像传感器中,而熔池图像在CMOS中的位置将随着熔池在垂直方向上位置的改变而改变。对COMS所输出的图像进行处理可得出熔池图像的位置,经几何换算可计算出熔池在垂直方向上的坐标即离焦量。

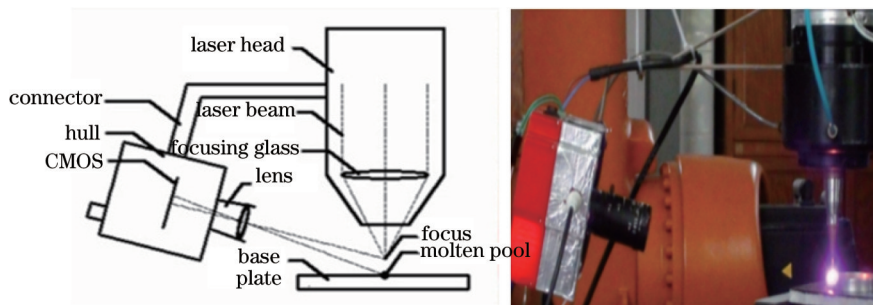


图1 熔池离焦量测量系统原理图及实物

Fig.1 Physical map and schematic diagram of defocusing amount measure system

熔池运动轨迹与成像系统的几何关系如图2所示。其中 s 为物距, s' 为像距, α 为熔池运动轨迹与物平面夹角, B 为物平面与镜头轴线交点, C 为像平面与镜头轴线交点, D 为熔池中心点 A 在像面上的投影点, E 为 A 点在镜头轴线上的垂直投影点;记中心位于 B 点的熔池高度为 0, 向上为正方向, h 为 A 点位置;记 C 点为图像传感器的零点, 向下为正, y 为 D 点位置。

由 $\triangle OAE \sim \triangle ODC$ 可得

$$\frac{y}{s'} = \frac{l_{AE}}{l_{OE}}, \quad (1)$$

在 $\triangle ABE$ 中

$$l_{AE} = h \cos \alpha, \quad (2)$$

$$l_{EB} = h \sin \alpha, \quad (3)$$

另有

$$l_{OE} = s - l_{EB}, \quad (4)$$

将(2)~(4)式代入(1)式可得

$$y = \frac{s' h \cos \alpha}{s - h \sin \alpha}, \quad (5)$$

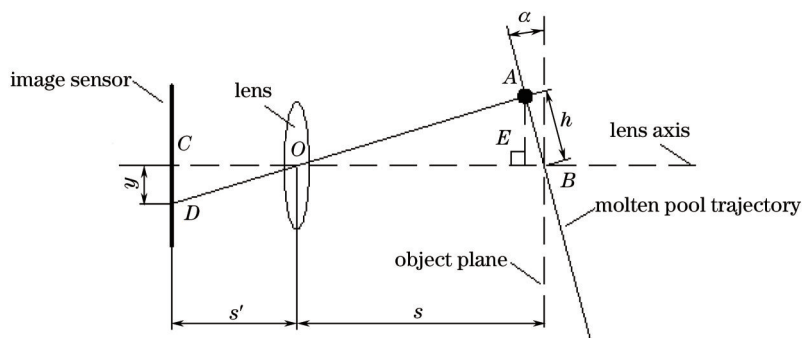


图2 熔池运动轨迹与成像系统的几何关系图

Fig.2 Geometrical relationship between molten pool motion trail and imaging system

镜头焦距 f 与物距 s 、像距 s' 满足以下关系

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f}, \quad (6)$$

由(5)、(6)式可得

$$y = \frac{sfh \cos \alpha}{(s+f)(s-h \sin \alpha)}, \quad (7)$$

即

$$f = \frac{(s^2 - sh \sin \alpha)y}{sh \cos \alpha + yh \sin \alpha - sy}. \quad (8)$$

(7)式即为离焦量 h 与熔池图像重心位置 y 的关系,而镜头焦距由(8)式决定。

2.1.2 系统方案

根据以上测量原理设计的嵌入式机器视觉熔池离焦量的测量系统如图3所示。系统由DSP嵌入式系统、CMOS图像传感器、镜头、视频D/A芯片、F/V模块等组成。

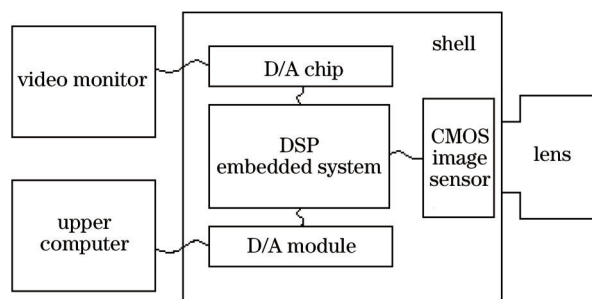


图3 嵌入式机器视觉系统组成图

Fig.3 Structure chart of embedded machine vision system

镜头与CMOS组成成像系统,将光学信号转化为数字信号;嵌入式系统对数字图像进行阈值估计、图像分割、重心计算、几何换算,最终得出熔池位置;D/A芯片与视频监视器组成监视系统,便于镜头对焦以及测量状态的实时监控;F/V模块将熔池离焦量以电压形式输出,以简化系统集成。

2.2 系统实现

2.2.1 硬件设计

在图4中,嵌入式机器视觉系统以DSP芯片为核心。图像采集采用微星CMOS数字图像传感器MT9M001,MT9M001数据输出端口直接与DSP视频端口VP1相连,采集得的数字图像直接传输至处理器,通过I²C总线可对CMOS内部进行参数配置;视频输出采用飞利浦数字图像编码芯片SAA7105,SAA7105与DSP的视频端口VP0相连,将处理后的数字图像信号转为模拟信号输出至监视器,通过I²C总线可对编码器内部进行参数配置;DSP中运行图像处理软件,对采集的数字图像信号进行阈值估计、阈值分割、重心计算,并最终将熔池在图像中1~1000的像素点位置以1~2000 Hz的方波向F/V模块输出;F/V模块将输入的1~

2000 Hz 方波信号线性转换成 0~10 V 电压信号输出。系统电源输入为 24 V 直流电,经电源系统输出 3.3、1.4 和 12 V 直流电分别为数字电源、DSP 内核以及 F/V 模块供电。

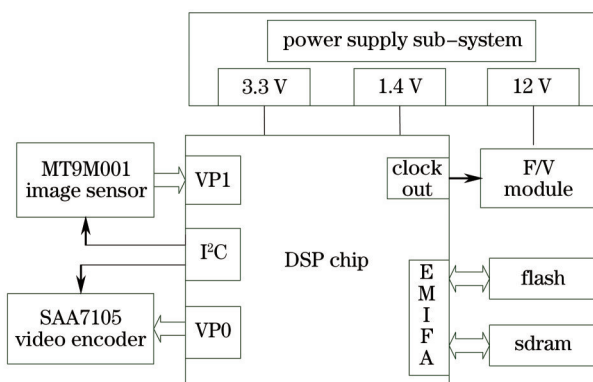


图 4 硬件系统图

Fig.4 Diagram of hardware system

2.2.2 图像处理

为对 CMOS 图像传感器输出的图像实时采集与处理,以达到熔池离焦量在线测量的目的,设计了相应软件程序,应用程序流程图如图 5 所示。

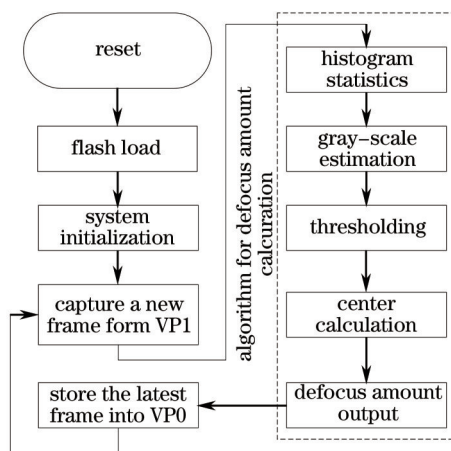


图 5 软件流程图

Fig.5 Flow diagram of software system

在激光熔覆 3D 成形加工过程中,由于熔池温度变化较大,同时镜头透射率随着粉尘累积而下降,使得在所获取图像中熔池亮度并非恒定,因此使用固定的灰度值对图像进行阈值分割的方法稳定性不足。人眼识别熔池位置时一般判定图像中最亮区域为熔池所在位置,模仿人眼识别特点提出一种基于面积的熔池灰度阈值估计算法:选定一个面积大小作为面积阈值,所选定区域内的任何像素亮度均不小于其他位置像素,则该区域内的亮度最小值作为熔池亮度估计阈值,该区域重心作为熔池重心。假定所获取的一幅图像尺寸为 m 行 n 列,取面积阈值为 s_{th} ,最大灰度值为 g_{th} , $P(i)$ 为各灰度下所含像素量,则灰度阈值为

$$k_{th} = \min \left[k \mid \sum_{l=k}^{g_{th}} P(l) \leq s_{th} \right], \quad (9)$$

重心为

$$r_c = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [f(i,j) \times i]}{\sum_{l=k_{th}}^{g_{th}} P(l)}, \quad (10)$$

$$c_c = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [f(i,j) \times j]}{\sum_{l=k_{th}}^{g_{th}} P(l)}, \quad (11)$$

式中 $f(i,j)=\begin{cases} 0 & g(i,j)<k_{th} \\ 1 & g(i,j)\geq k_{th} \end{cases}$, $g(i,j)$ 为 i 行 j 列像素点的灰度值。

通过上述图像处理算法分割出的熔池图像以及定位结果如图 6 所示。

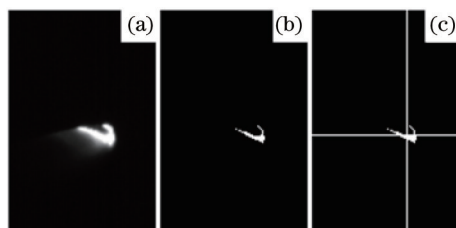


图 6 图像处理过程。(a) 原始图像; (b) 图像二值化; (c) 熔池重心定位

Fig.6 Image process. (a) Original image; (b) image binaryzation; (c) molten pool location

相比于固定灰度阈值分割算法此算法具有稳健性强的优点,能适应不同的激光功率变化,对面积阈值的估计误差容忍度大;而相比于 OTSU 最大类间差法^[18],本算法更适用于定点处理器。

2.2.3 系统标定与精度评估

所设计的物距 $s=200\text{ mm}$,镜头焦距 $f=12\text{ mm}$,镜头轴线与水平面夹角 $\alpha=15^\circ$,代入(7)式推出

$$h=(18.29-0.024h)y, \quad (12)$$

式中 $-6\text{ mm}<h<6\text{ mm}$,则(12)式可简化为

$$h=18.29y. \quad (13)$$

所采用图像传感器像素间隔为 $5.2\ \mu\text{m}$,像素位置 $0\sim 1000$ 对应电压 $0\sim 10\text{ V}$,则离焦量 h 与电压 U 的设计关系为

$$h=9.51U. \quad (14)$$

在实际应用中安装好所设计装置后由于安装误差以及零点偏置等因素,使得实际中离焦量 h 与电压 U 关系与(14)式不一致,因此需要对(14)式做进一步的标定。具体标定方法:采集一幅激光会聚的图像,记下激光焦点所在的像素位置,再取另一离焦量所对应的像素位置,由此两点可以确定离焦量 h 与电压 U 的实际关系。如图 7 所示,图中尖角处为激光焦点位置,对应像素点位置为 697。在实际熔覆过程中熔池在焦点上下 6 mm 范围内波动,即图中标尺 $4\sim 16\text{ mm}$ 处,选定此范围作为标定区间。离焦量 6 mm 处对应像素点位置为 762。经标定,在焦点左右 6 mm 处离焦量 h 与输出电压 U 满足

$$h=9.311U-64.944. \quad (15)$$

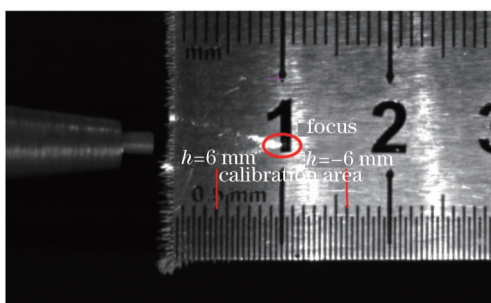


图 7 系统测量分辨率标定图

Fig.7 Standardization of system resolution

为检验测量系统的实际精度,固定好测量装置并经过标定后对离焦量 h 在 $-6\sim 6\text{ mm}$ 范围内每隔 2 mm 测量 6 次输出电压 U ,取其平均值 \bar{U} 、最大值 U_{\max} 、最小值 U_{\min} ,并计算其对应测量离焦量最大值 h_{\max} 、最小值 h_{\min} 以及最大误差 $|\Delta|_{\max}$ (表 1)。具体实现方法:在暗室条件下,打开激光器的红色标记光束,关闭强激光;移动机器人,使得激光焦点落在基板上,每隔 2 s 测量一次输出电压 U ,共测 6 次;同样的方法移动机器人,分别测得离焦量为 $-6,-4,-2,2,4,6\text{ mm}$ 时的电压 U 。由于机器人的移动精度较高,可以认为以上离焦量位置可以精确达到。

表 1 测量统计表

Table 1 Measurement statistical table

h /mm	\bar{U} /V	U_{max} /V	U_{min} /V	h_{max} /mm	h_{min} /mm	$ e _{max}$ /mm
-6	6.340	6.34	6.34	-5.912	-5.912	0.088
-4	6.547	6.55	6.54	-3.957	-4.050	0.050
-2	6.754	6.76	6.75	-2.002	-2.095	0.095
0	6.970	6.97	6.97	-0.046	-0.046	0.046
2	7.187	7.19	7.18	2.002	1.909	0.091
4	7.408	7.41	7.40	4.051	3.957	0.043
6	7.625	7.63	7.62	6.099	6.006	0.006

通过测试,本系统的测量误差最大值为0.095 mm,而此应用实例中所设计的硬件分辨率为0.093 mm[由(15)式决定],因此可以认定本装置测量稳定,精度满足成形需求。

引起误差的因素有以下几点:1)设计精度。在设计装置测量精度时所选用的硬件设备包括成像镜头,图像传感器以及成像距离等仅满足设计精度的需求,而要达到更高的测量精度,最简便的方法是更换焦距更大,成像质量更好的镜头;2)电磁干扰。系统的工作环境为典型的强电磁干扰的工业环境,因此较强的电磁干扰会对模拟电压的传输产生干扰;3)温升影响。工作位置与激光熔池接近时较高的环境温度会使得图像传感器、镜头等成像器件及其支撑零件产生热变形,同时,温度升高也会使得电子元器件产生温度漂移,使得装置测量结果出现误差。

3 结 果

3.1 激光熔覆成形在线测控系统

为验证所述系统对于实际熔覆成形精度控制的作用,设计了两个薄壁圆环堆积对比实验。实验采用IPG公司波长为1064nm的YLS-2000-CT光纤激光器,激光功率为600 W,使用313铁基合金粉末,送粉速度为8 g/min,扫描速度为12 mm/s,初始离焦量为-4 mm。不同之处在于:实验一中的每层提升量固定,为开环控制;而实验二中的离焦量采用闭环控制。实验设备如图8所示,离焦量测量系统与控制柜、机器人、闭环校正程序构成了离焦量闭环控制系统:在成形过程中,回转台每旋转一周,成形件高度增加一层,控制软件则将根据测得的离焦量控制机器人带动激光头提升,成形过程中离焦量始终保持在合理区间。

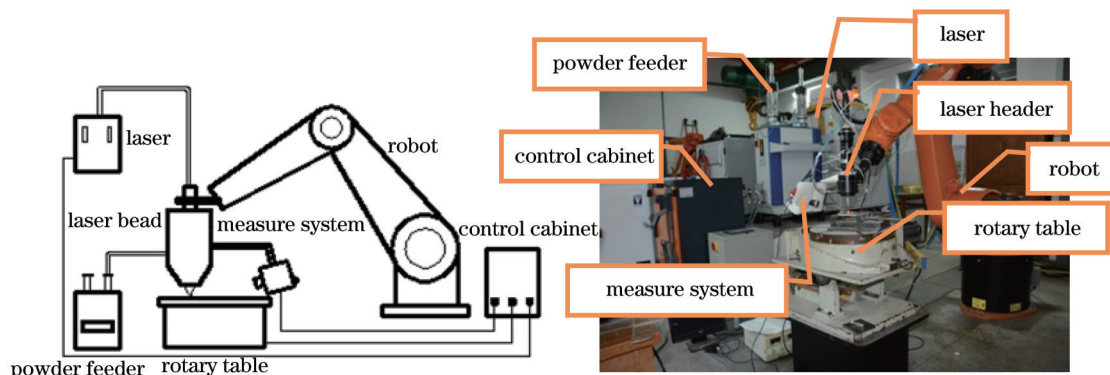


图 8 激光熔覆成形系统

Fig.8 Laser cladding forming system

3.2 薄壁圆环成形过程与结果

图8为闭环加工的薄壁圆环堆积过程。离焦量测量系统实时监测当前离焦量,每加工完一圈后,圆环高度增加,反馈给系统的离焦量减小,使机器人带动激光头提升,以确保离焦量保持在3.5 mm左右,如图9(b)所示,并记录圆环生长高度。当圆环达到设定高度时激光器自动停机,过程中圆环在没有人工干预下一次成形。

在实验一中,激光头以固定提升量加工。由于提升量与圆环的实际生长量存在差异,使得离焦量逐渐偏出合理区间。为使加工在合理离焦量区间下进行,每隔一定高度需停机重新调整初始离焦量,这就造成

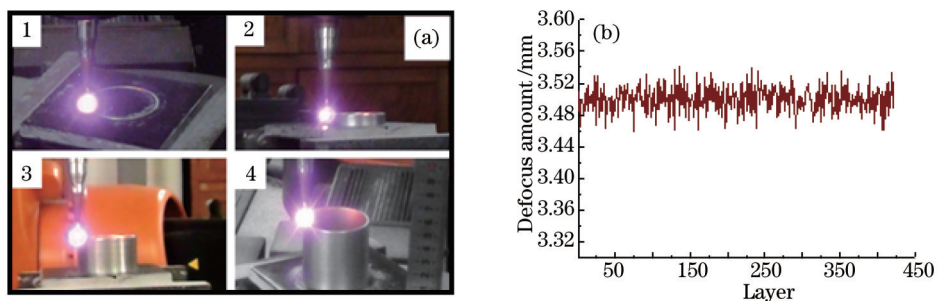


图9 闭环加工薄壁圆环堆积过程。(a) 薄壁圆环生长过程; (b) 成形过程离焦量变化

Fig.9 Deposition procedure of closed loop processed thin-wall cylinder. (a) Thin-wall cylinder deposition procedure; (b) variation of the defocus amount during deposition procedure

了熔池大小突变,从而使得壁厚突变,最终在外壁上出现了凸痕,如图10(a)所示。在实验二中,引入熔池离焦量测量系统后实时测量离焦量可推算出圆环的生长量,通过动态改变光头提升量以匹配圆环生长量,使得加工在合理离焦量区间下进行,熔池大小相对稳定,得到的圆环壁厚较为均匀,表面粗糙度达到0.8,如图10(b)所示。基于本熔池测控系统,完成了更多形状较为复杂的零件(图11),实现了零件成形过程的自动化。

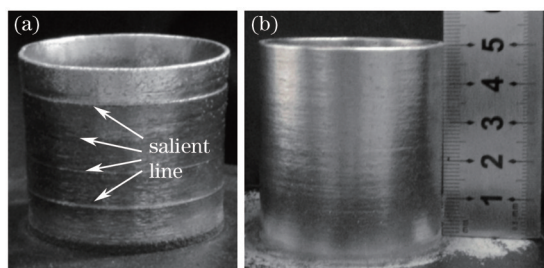


图10 开环、闭环加工薄壁圆环堆积对比图。(a) 开环控制圆环; (b) 闭环控制圆环

Fig.10 Contrast between open and closed loop processed thin-wall cylinder. (a) Open loop processed thin-wall cylinder; (b) closed loop processed thin-wall cylinder

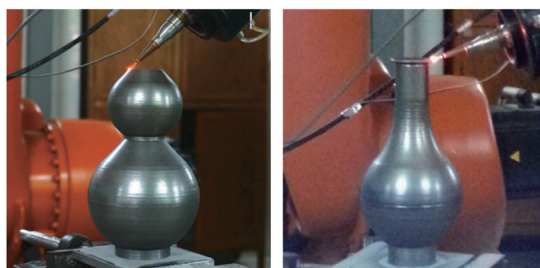


图11 基于本熔池测控系统完成的更多零件

Fig.11 More components processed with this measurement and control system

4 结 论

1) 提出一种基于嵌入式机器视觉的激光熔覆熔池离焦量在线测量系统,推导出了镜头焦距的设计公式。同时提出了一种基于面积的熔池灰度阈值估计算法,在实际测试中验证证明本系统测量原理以及阈值估计算法稳定有效,测量精度达到0.1 mm,处理速度达到30 frame/s。

2) 测量系统以嵌入式DSP为运算核心,具有体积小、能耗低、软硬件集于一体、处理任务单一的特点,具有实时性较高、成本较低、便于集成、应用方便等优势。

3) 实现了熔覆成形离焦量闭环控制。薄壁圆环堆积实验表明,与开环系统相比,闭环系统的成形件尺寸精度显著提高,表面粗糙度明显降低。

参 考 文 献

1 L Thivillon, P H Bertrand, B Laget, *et al.*. Potential of direct metal deposition technology for manufacturing thick functionally

- graded coatings and parts for reactors components[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2009, 385(2): 236–241.
- 2 K I Schwendner, R Banerjee, P C Collins, *et al.*. Direct laser deposition of alloys from elemental powder blends[J]. *Scripta Materialia*, 2001, 45(10): 1123–1129.
- 3 C L Atwood, M L Griffith, M E Schlienger, *et al.*. Laser engineered net shaping (LENSTM): A tool for direct fabrication of metal parts [C]. *Processing of the Laser Materials Processing Conference Section A-ICALEO'1998*, 1998, 16–19: E-1.
- 4 Song Jianli, Li Yongtang, Deng Qilin, *et al.*. Research progress of laser cladding forming technology[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(14): 29–39.
宋建丽, 李永堂, 邓琦林, 等. 激光熔覆成形技术的研究进展[J]. *机械工程学报*, 2010, 14: 29–39.
- 5 Wang Xuyue, Wang Yanfei, Jiang Hao, *et al.*. Laser cladding forming of round thin-walled parts with slope angle[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(1): 0103006.
王续跃, 王彦飞, 江 豪, 等. 圆形倾斜薄壁件的激光熔覆成形[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0103006.
- 6 T Gareth, Mark Pridham. Improvements to laser forming through process control refinements[J]. *Optics & Laser Technology*, 1998, 30(2): 141–146.
- 7 G J Bi, A Gasser, K Wissenbach, *et al.*. Investigation on the direct laser metallic powder deposition process via temperature measurement [J]. *Appl Surf*, 2006, 253(3): 1411–1416.
- 8 Zhu Gangxian, Li Dichen, Zhang Anfeng, *et al.*. The influence of laser and powder defocusing characteristics on the surface quality in laser direct metal deposition[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(2): 349–356.
- 9 H Dongming, R Kovacevic. Sensing, modeling and control for laser-based additive manufacturing[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, 43(1): 51–60.
- 10 Liu Jichang, Li Lijun. In-time motion adjustment in laser cladding manufacturing process for improving dimensional accuracy and surface finish of the formed part[J]. *Optics & Laser Technology*, 2004, 36(6): 477–483.
- 11 G Bi, A Gasser, K Wissenbach, *et al.*. Characterization of the process control for the direct laser metallic powder deposition[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 201(6): 2676–2683.
- 12 Gao Shiyu, Li Jian, Li Chenguang, *et al.*. Research on the variation regularity of single laser tracks cross-section morphology during laser cladding[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0503010.
高士友, 李 健, 李臣光, 等. 激光熔覆单道沉积轨迹横截面形貌变化规律研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0503010.
- 13 Wang Xiaojia, Gao Jun, Wang Lei. Survey on the laser triangulation[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 128(s2): 601–604.
王晓嘉, 高 隽, 王 磊. 激光三角法综述[J]. *仪器仪表学报*, 2004, 128(s2): 601–604.
- 14 Wang Shaoqing, Zhuang Baohua. Rebuilding principle formula of optical triangulation method of displacement measurement in view of the Lambert theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, 16(12): 1802–1808.
王少清, 庄葆华. 基于朗伯定律重建光学三角法测位移原理公式[J]. *光学学报*, 1996, 16(12): 1802–1808.
- 15 Dong Ling, Yang Xichen, Lei Jianbo. Off-line automatic programming research of laser remanufacturing robot based on machine vision[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(10): 1003006.
董 玲, 杨洗陈, 雷剑波. 基于机器视觉的激光再制造机器人离线自动编程研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 1003006.
- 16 J Mazumder, D Dutta, N Kikuchi, *et al.*. Closed loop direct metal deposition: art to part[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2000, 34(4): 397–414.
- 17 A Heralic, A K Christiansson, B Lennartson, *et al.*. Height control of laser metal-wire deposition based on iterative learning control and 3D scanning[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(9): 1230–1241.
- 18 Liu Jianzhuang, Li Wenqing. The automatic thresholding of gray-level picture via two-dimensional OTSU method[J]. *Acta Automatica Sinica*, 1993, 19(1): 101–105.
刘健庄, 栗文青. 灰度图象的二维 Otsu 自动阈值分割法[J]. *自动化学报*, 1993, 19(1): 101–105.

栏目编辑: 宋梅梅