DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.01.010

金属增材制造过程平面度和轮廓度在线测量技术

曹明顺[1,2],何丕尧[2],李中伟[2]

(1. 黄冈职业技术学院 机电学院,湖北 黄冈 438002; 2. 华中科技大学 材材料科学与工程学院,湖北 武汉 430074)

摘　要:金属增材制造技术在航空航天、医疗等多个领域得到广泛应用,但仍面临着零件裂纹、空隙和翘曲等很多质量缺陷问题。在早期阶段对成形部分零件进行质量检验,发现成形过程中的缺陷,通过反馈控制调节参数来修复缺陷或者中止加工过程,这是非常有必要的。研究了结构光三维测量技术及相关的一些关键技术,并基于这些技术开发了一种可以用于监测粉末床熔融制造过程的在线测量系统。

关键词:金属增材制造;在线测量系统;结构光三维测量

中图分类号:TG249　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)01-0040-07

Online Measurement Technology for Flatness and Profile of Metal Additive Manufacturing Process

CAO Mingshun[1,2], HE Peiyao[2], LI Zhongwei[2]

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Huanggang Polytechnic College, Huanggang 438002, China; 2. School of Material Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Metal additive manufacturing technology had been widely used in aerospace, medical and other fields. However, it still faces many quality defects such as cracks, voids and warping. It is very necessary to carry out quality inspection on part of forming parts in the early stage, discover defects in forming process, and repair defects or abort machining process by feedback control adjustment parameters. Based on the three dimensional structure light measurement technology and some related key technologies, an online measurement system for monitoring the melting process of powder bed is developed.

Key words: metal additive manufacturing; on-line measurement system; three-dimensional measurement of structured light

增材制造技术（Additive Manufacturing, AM），又称 3D 打印,是利用材料逐层累加的原理,根据零件的三维模型进行零件快速加工制造的一种多学科综合应用的制造技术[1]。目前,金属增材制造技术有多个研究方向，其中以粉末床熔融制造技术(Powder Bed Fusion,PBF)的应用最为广泛,它包括激光选区烧结(Selective Laser Sintering,SLS),激光选区熔化(Selective Laser Melting,SLM)和电子束熔化(Electron Beam Melting,EBM)[2]。粉末床熔融制造技术的原理是利用刮粉装置将粉末储存器中的粉末铺展到构建平台的基板上；当粉末层均匀时,系统使用热源(例如激光束、电子束)来选择性的熔化粉末得到预期的平面形状;一层完成后,构建平台降低所需的层厚度,粉末储存器上升一个层厚度,刮粉装置再将粉末铺展到基板上填补所产生的间隙,构建新的一层,然后热源再次对粉末进行熔化,一层一层加工,最终制造出一个完整零件。

金属增材制造技术在航空航天、医疗等多个领域得到广泛应用,但仍面临着零件裂纹、空隙和翘曲等很多缺陷问题,即使采用后处理(表面处理、热处理等)进行修复,也无法用于质量检测[3]。现在大都是采用试错法来确定工艺参数，这种方法不仅耗时长,精度得不到保障,而且成本也十分昂贵。为了确保获得预期的零件质量，以及确保成形零件的一致性和复现性，亟需进一步研究粉末床熔融制造技术的工艺参数、成型特性与零件质量之间的关系。在粉末床熔融制造的过程中，在线测量技术可以对成形的零件进行初步质量检验[4]。这样在加工过程中,通过对零件质量的评估,根据成形特性修改工艺参数,使得机器能够加工出质量更好的零件，同时也能使我们更好的研究三者之间的关系。

在线测量技术能够增加我们对粉末床熔融制造

收稿日期:2018-06-11

基金项目:国家重点研发技术重点专项(2017YFB1103900);校级工程技术青年专项(2018C2022133)

作者简介:曹明顺(1981-),山东金乡人,硕士,讲师.研究方向:数字化控制技术、CAD/CAM 应用等研究.
电话:18986533331,E-mail:caofushun@163.com

过程的认识，并加快过程的开发，从而改善加工工艺和零件的性能。实时监测还可以帮助我们通过反馈控制，来补偿或纠正制造过程中的错误，或者中止继续制造有缺陷的零件。目前，国内在在线测量方面的研究比较少，国外的研究主要在以下几个方面：马里兰大学 Kleszczynki 的研究小组使用高分辨的 CCD 相机测量粉末床熔融制造过程的几何特征，用来监测制造过程中的一些缺陷[5]。鲁汶大学 Kruth 的研究团队设计一套同轴测量系统，用 CCD 相机观察熔池的形状，用光电二极管等器件检测熔池的温度，他们利用该系统可以检测到悬垂结构附近的变形和过热[6]。Yadroitsev 研究小组设计一套类似的系统，研究了 Ti-6Al-4V 合金的制造过程，得出了熔池温度，宽度和深度是与激光功率和“照射时间”成正比的，其中“照射时间”是激光光斑直径与扫描速度的比值[7]。最后一个方面是检测残余应力的在线测量系统，Shiomi 等设计了一个应变计原位测量残余应力的系统，他们将应变片安装在构建平台的基板上，当 SLS 诱导层被相继研磨时，能够测量构建平台中的应变；他们还发现随着越来越多的层从被建成的部分移除时，残余应力也逐渐降低[8]。Van Belle 等研究了在粉末床熔融过程中产生的残余应力，他们将应变仪玫瑰花瓣安装在支撑平台下，通过监测应变片数据的变化，采用力平衡原理，在支撑部件中计算对应于弹性弯曲的残余应力[9]。上述多种在线测量技术对于粉末床熔融增材制造的研究有着很大的作用。但是，这些测量技术大都是针对二维的物理量进行测量，不能很好的检测、表征粉末床熔融增材制造过程中经常出现的一些三维物理量，如平面度、轮廓形貌、孔洞、裂纹和翘曲等。

针对以上研究存在的一些问题，设计并开发了一套可用于监测制造过程中零件的平面度（三维）与轮廓（二维）信息的在线测量系统。该系统可以实时监测零件的每一层的加工过程，并迅速反馈每一层的平面度及轮廓加工信息；同时可以很好地测量内部有特殊结构的零件；当检测到零件的缺陷时，可以及时的反馈给机器，通过反馈控制来防止缺陷继续产生。

1　结构光三维测量技术

在线测量系统在测量零件的平面度信息时采用了结构光三维测量原理，而测量轮廓信息采用了双目立体视觉原理。

1.1　结构光测量原理

在结构光测量轮廓中有很多种方法可以实现对成形零件的快速测量，近些年来，相位测量轮廓术（PMP）因为具有稳定性强、测量效率高、测量分辨率高等优点，其发展十分迅速，得到了越来越广泛的应用。测量成形零件三维轮廓主要是采用相位轮廓测量法，先采集物体上具有一定相位移的光栅图像，再计算这些包含被测物体三维信息的相位初值[10]。

要得到被测物体的相位初值，首先要采集多幅具有一定相位移的图像。假设条纹图案是按照正弦分布，则其在被测物体表面的强度表达式为[11]：

$$I_i(x,y)=I'(x,y)+I^*(x,y)\cos[\phi(x,y)+\delta_i] \tag{1}$$

式中，$I'(x,y)$为图像的平均灰度，$I^*(x,y)$为图像的调制系数，δ_i 为图像的相位移增量，$\phi(x,y)$为带求解的相位移初值。因为式(1)包含 $I'(x,y)$、$I^*(x,y)$、$\phi(x,y)$三个未知量，要求解出相位初值 $\phi(x,y)$至少需要三个方程，即需要三幅图像。

目前在所有的相移算法中，标准 N 帧相移算法的使用最为广泛，它具有能很好的抑制系统的随机噪声，并且对(N-1)次以下谐波不敏感的特点。采用标准的四步相移算法进行相位移初值的计算，四幅光栅图像的相位移增量分别为：0，$\pi/2$，π，$3\pi/2$，代入式(1)得：

$$\begin{aligned}
&I_1(x,y)=I'(x,y)+I^*(x,y)\cos[\phi(x,y)]\\
&I_2(x,y)=I'(x,y)+I^*(x,y)\cos[\phi(x,y)+\pi/2]\\
&I_3(x,y)=I'(x,y)+I^*(x,y)\cos[\phi(x,y)+\pi]\\
&I4(x,y)=I'(x,y)+I^*(x,y)\cos[\phi(x,y)+3\pi/2]
\end{aligned} \tag{2}$$

通过式(2)计算出相位初值：

$$\phi(x,y)=\arctan\left(\frac{I_4-I_2}{I_1-I_3}\right) \tag{3}$$

在一个周期内，对式(3)中计算得到的相位初值可以保证其唯一性，但测量时存在多个光栅，使得以一个相位周期呈以锯齿状分布，需要对相位初值进行相位展开，获得连续的绝对相位 $\phi(x,y)$。

对相位初值进行相位展开的算法为多频外差相位展开算法，主要思想是通过两种不同频率的相位函数叠加一种频率更低的相位函数，大大降低了对相位初值计算精度的要求，使得相位展开过程更加稳定，主要算法原理可见于参考文献[11]。

图 1 为结构光测量技术示意图。首先投影仪投射出 3 组不同频率的图像，每组 4 幅，每幅图像的相位移增量为 $\pi/2$。同时控制左右相机同步的采集光栅图像，再利用标准的四步相移算法求出三个相移初始值，然后使用多频外差相位展开算法解得绝对相位值。计算出每个像素的绝对相位值后，根据相机间的极线几何约束，建立图像对应点之间的匹配关系，采用三角测量原理计算出该点的三维坐标。

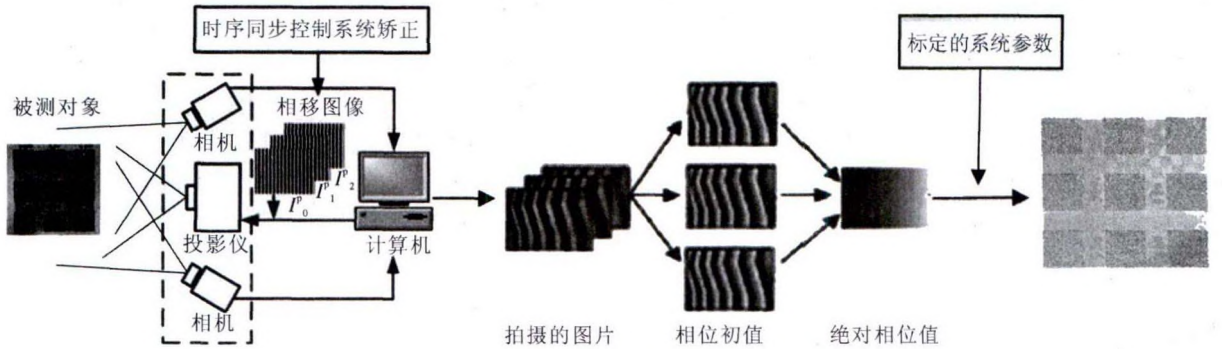


图 1 结构光三维测量示意图

Fig.1 Schematic diagram of structured light 3D measurement

1.2 自标定技术

系统的参数标定是结构光测量系统的关键技术之一。由于在线测量系统安装在基于粉床的增材制造机器上使用,在成形过程中,有的需要抽真空,有的温度较高,这样可能会使得相机的位置姿态稍稍改变。所以采用相机的自标定技术[12]来解决这些问题,该技术可以直接从图像序列标定得到相机的内部参数,无需在机器中放置标定板,拥有更好的灵活性。

1.2.1 自标定算法原理

通过结构光栅图像对测量系统外参数进行修正的自标定算法,其算法流程主要分为两步:第一步,估计测量系统外参数,计算出相机图像中控制点粗略的三维坐标;第二步,构建非线性最小二乘优化方程,并求解出精确的测量系统外参。

投影仪对被测零件投射水平和垂直两个方向的光栅图像,见于图 2,利用相位移和三频外差原理求解获得两个相机在水平与垂直方向上的相位图。然后在左相机(相机 1)图像上划分虚拟网格,获取网格节点为控制点,并通过图像像素的信噪比去除易引起相位误差的低质量节点,再通过控制点的水平和垂直相位寻找右图像上的对应控制点。

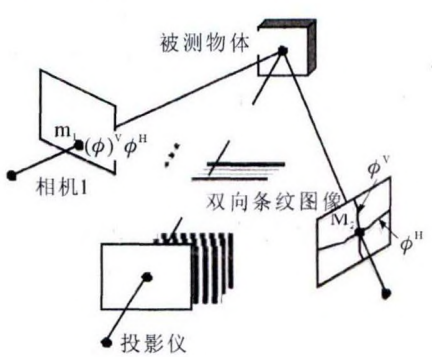


图 2 自标定示意图

Fig.2 Self-calibration diagram

在极线几何[13]中,相机图像间的关系可以通过基础矩阵 F 描述,其包含测量系统内外参数的所有信息。将镜头畸变忽略不计,则 $m=m'$,根据经典 8 点算法估计基础矩阵 F,并基于使控制点和对应极线间距离最短来迭代优化。再由使用相机的传感器像素尺寸和选用镜头的标准焦距求得左右相机的归一化焦距,,并令获得的图像中心为主点 (u_0,v_0),获得估计的测量系统内参 A_1、A_2。根据基础矩阵 F 和测量系统内参 A_1、A_2 估算出本征矩阵 E,再对本征矩阵 E 进行奇异值分解即可计算出大概的相机间位置关系 R 和 T。

通过上述方法求解得到测量系统外参的估计值后,即可根据式(4)通过最小二乘法计算控制点的三维坐标[13]。

$$\begin{cases} s_1\tilde{m}_1=A_1[I|0]\tilde{M}^1_c \\ s_2\tilde{m}_2=A_2[R|0]\tilde{M}^1_c \end{cases} \tag{4}$$

其中,将左相机的相机坐标定义为全局坐标系,I 为 3×3 的单位矩阵。

之后根据控制点的实际像素坐标和其三维坐标的重投影坐标构建非线性最小二乘方程[13]:

$$Cst=\sum_{i=1}^{L}\| m^i_1-\hat{m}^i_1(A_1,k_1,M^1_c)\|^2 + \sum_{i=1}^{L}\| m^i_2-\hat{m}^i_2(A_2,k_2,R,T,M^1_c)\|^2 \tag{5}$$

式中,i 为控制点的序号,L 为控制点的个数,$\hat{m}^i_1$、$\hat{m}^i_2$ 分别为 M^1_c 在两相机图像上的重投影坐标。由式(5)求的使 Cst 值最小的测量系统参数 A_1,k_1,A_2,k_2,R,T。在求解精确的测量系统外参数中,需要一个比例因子将控制点的三维坐标从像素尺寸单位转换为物理尺寸单位,使用如图 3 所示的一字标尺提供比例因子。之后利用先前求解得到的相位图像以及求解得到

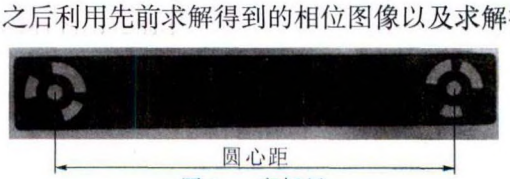


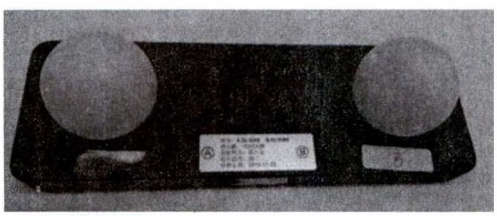
图 3 一字标尺

Fig.3 One-word ruler

的精确的测量系统内外参数计算相应的三维坐标。

1.2.2 自标定验证实验

为验证该自标定技术，需要对测量设备进行精度验证实验，国内外一般通过测量标准球来评估面结构光测量设备的测量精度。通过使用设备在标定和未标定两种情况下对标准陶瓷球进行测量，分析标准陶瓷球球心距误差，对比自标定技术的精度和稳定性。如图 4 所示为大理石的标准球，其球 A 直径、球 B 直径和球心距皆由三坐标测量设备获得其实际大小，其数值分别为 50.806 8、50.806 6 和 150.012 5 mm。



A	球径:A50.8068 B50.8066	B
	球心距:150.0125	
	基校材质:铝合金	
	检测温度:20 ℃	
	检检日期:2016-11-23	

图 4 标准球

Fig.4 Standard ball

实验内容如下，从在线测量系统开机对标准球进行持续一个半小时每 3 分钟一次的测量。实验结果如图 5 所示，可以知道未使用自标定技术的球心距测量误差从开机时的 -0.01 mm 随着测量时间逐渐增长，在开机 30 min 后测量误差稳定在 0.06 mm 左右。这主要是因为相机等电子器件在刚开始工作阶段，内部元器件存在预热的过程，使测量结果存在轻微和持续的偏差。但是通过自标定获得的球心距误差则一直稳定在 -0.05 mm 附近，证明采用自标定技术的测量结果的稳定性和精度都满足在线测量系统的使用要求。

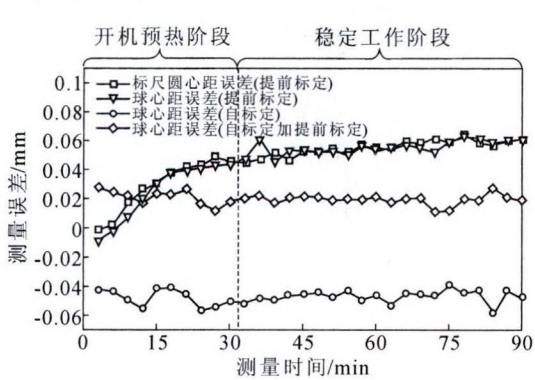


图 5 标准球测量误差

Fig.5 Standard ball measurement error

2 实验过程及分析

2.1 测量系统的设计

2.1.1 测量系统的组成

在线测量系统硬件部分主要由两个 CCD 相机、两个可变焦相机镜头、一个 DLP 投影仪(结构光栅投影系统)和支撑部分组成。其双目立体视觉结构示意图如图 6 所示，其中从相机投射出的虚线部分为相机的有效视场，α 为相机的有效视场角，2θ 为两相机光轴夹角的半角，Z 为测量系统的工作距离（即 DLP 投影仪至成形基板的距离），L 为相机的测量距离（即相机镜头中心至成形基板上光轴交点的距离），B 为相机的基线长度[14]。

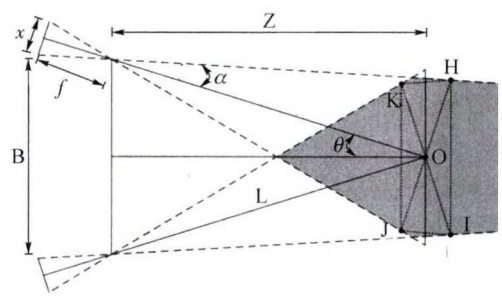


图 6 双目立体视觉结构示意图

Fig.6 Schematic diagram of binocular stereo vision

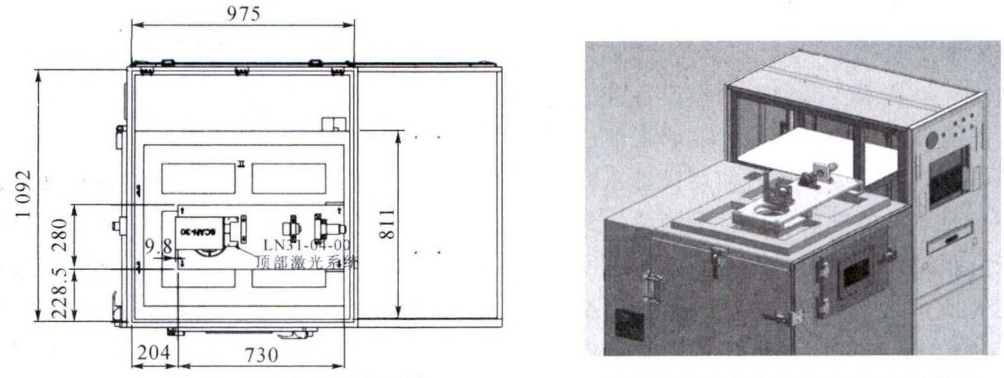
根据某公司的技术需求，针对该公司的激光选区熔化成形设备——HK M250 型金属 3D 打印机设计了一套在线测量装置。如图 7 所示，由某公司的 HK M250 设备的内部结构参数首先确定在线测量装置的大致安放位置，由此可以计算出在线测量装置的工作距离 Z 为 492 mm。再根据成形基板的尺寸信息 250 mm×250 mm 和相关设计经验值初步确定 X 方向和 Z 方向测量范围 Δx 和 Δz 分别为 250 mm 和 55 mm。由计算可得如表 1 所示的参数。

2.1.2 测量系统硬件选型

根据以上计算得到的参数，选用 Basler 制造的面阵 CCD 相机，型号为 acA1300-30gm，其主要参数有像素位深：12 bits、感光芯片尺寸：4.86 mm×3.62 mm、水平 / 垂直分辨率：1 296×966 像素、帧速率：30 fps等。

因此，由计算可得：$f \approx 9$ mm，所以需选取焦距为 9 mm 的相机镜头，故选用 Ricoh 的型号为 FL-CC0814A-2M F1.4 f 8 mm 2/3″镜头，其主要参数有镜头最小焦距：8 mm、光圈值：F1.4、工作距离：100 mm 等。

再根据测量装置的工作距离和成形基板尺寸，选择合适的 DLP 投影仪，要求使投影光栅完全覆盖成形基板，因此选用 TEXAS INSTRUMENTS 公司的 DLP® LightCrafter™ 4500 投影仪，其主要参数有



(a)成形腔上盖图纸 (b)HK M250成形腔上盖三维图纸

图 7 HK M250 机器图纸

Fig.7 HK M250 Machine drawings

表1 相机几何参数

Tab.1 Camera geometry

光轴夹角 θ	$\theta=\arctan\frac{\Delta z}{\Delta x}\approx12.41°$，取 $\theta=13°$
基线长度 B	$B=2\times Z\cdot\tan\alpha\approx227$ mm
相机测量距离 L	$L=\frac{Z}{\cos\theta}\approx505$ mm
有效视场角 α	$\alpha=\arctan\frac{\Delta x}{2\times L\cdot\cos\theta}\approx14.25°$，取 $\alpha=15°$

亮度值:150 lm、投射比:1.4、均匀性:90%、图像对角线尺寸:32.8 inch、投影图像长宽比:16:9 等。在 492 mm 处投影范围为 351 mm×200 mm，满足使用要求。

2.2 成形坐标系配准

将左相机坐标系定义为世界坐标系，所以对于计算所得零件每一层三维数据信息和基于设计的工作坐标系下的对应的切片数据处于不同的坐标系下，所以就需要对计算得到的零件每一层三维数据信息进行坐标系转换，使其与切片数据处于同一坐标系下，便于后期的数据比对。因此为实现这个目的，必须提前配准双目立体视觉测量系统的世界坐标系和切片数据中设计的工作坐标系，即计算求得两坐标系的相对位置关系(旋转矩阵 R 和平移向量 T)。

为计算出对应的 R 和 T，则必须确定点在两个坐标系中的坐标值，通过使用 SLM 设备的激光发射器在打印基板上烧蚀出 7×9 个圆形阵列，圆直径为 10 mm。其中，工作坐标系原点位于图 8 中中间圆的圆心处，Z 轴垂直基板面向上，X 方向为阵列行方向，Y 方向为阵列列方向。

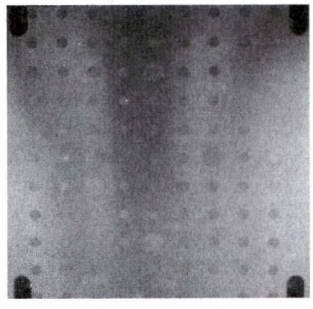


图 8 用于坐标系配准的基板烧蚀图样

Fig.8 Substrate ablation pattern for coordinate system registration

设任意一圆心点 P 在世界坐标系和工作坐标系下的非齐次坐标值分别为 P_w 和 P_d[14]，则两者关系为：

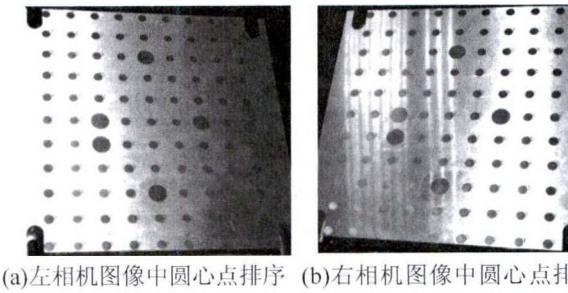
$$P_d=[R\ \ T]\begin{bmatrix}P_w\\1\end{bmatrix} \tag{6}$$

因为有 63 个圆心点，式(6)一个超定的非其次线性方程组，为求解出 R 和 T，可以将求解超定非齐次线性方程组问题转化为使用最小二乘法求解 R 和 T 的最优值问题，如式(7)所示：

$$(R,T)=\min_{R,T}\sum_{1}^{63}w_i\|(RP_{wi}+T)-P_{di}\|^2 \tag{7}$$

其中，求解 R 和 T 的公式推导详细见于参考文献[14]。

根据以上算法，相机系统标定完成后，采集烧蚀过的基板图像，对左右两相机图像分别进行图像矫正、圆心点像素坐标提取、圆心点排序步骤，然后对排序好的左右相机图像圆心点进行三维重建，获得圆阵列在世界坐标系下的圆心三维坐标。然后导入工件坐标系下的标准圆心三维坐标，利用上述算法求解将世界坐标系配准到工件坐标系的 RT 矩阵。图 9中(a)、(b)分别显示了左右相机图像中圆心点的排序。



(a)左相机图像中圆心点排序 (b)右相机图像中圆心点排序

图 9 左右相机圆心排序

Fig.9 Center sorting of left and right camera

2.3 测量数据

依据以上所阐述的原理，在整个测量的过程中，投影仪会投射出 3 组不同频率的光栅图像，每组图

像的相位移分别为：0、$\pi/2$、π、$3\pi/2$。每当投影仪投射出一幅光栅图像时，接收到触发信号的相机会同步的将预想采集并保存，在最后还额外的保存一幅无光栅的图像，总共 13 保存幅图像。三维测量是通过处理相机采集到的图像，计算出相关的特征信息的三维数据，主要过程分两部分，即三维形貌测量和边缘轮廓测量。

三维形貌测量是对相机采集的带有光栅的 12 幅图像进行相位解相和展开运算，然后计算出三维形貌信息，再通过标定好的 RT 矩阵将三维形貌数据转换到成形基面上的成形坐标系上；而边缘轮廓测量则是先对无光栅的图像进行畸变矫正，再通过所述的算法对图像进行轮廓提取和立体匹配，以此得到左右图像上的边缘特征点对，最后利用双目立体视觉原理计算出轮廓特征的三维坐标，通过 RT 矩阵转换到加工制造坐标系下。

当坐标配准完成后，成形设备就可开始工作，进行零件的加工制造。我们需要测量铺好粉末层的三维形貌、激光熔化后成型层的三维形貌和边缘轮廓数据。在一个加工周期下，测量系统的工作流程如图 10 所示，首先刮板将粉末均匀送至加工基板表面；测量系统开始工作，对铺好的粉末层进行测量，获得粉末层的三维形貌数据；高能激光器工作，通过振镜系统按切片生成的路径选择性地将粉末熔化成形；测量装置开始测量，获得该成形层的三维形貌和边缘轮廓数据；之后基板下降，刮板返回初始位置，等待下一个成形周期的执行。如此反复循环，就完成了零件的成形和测量。

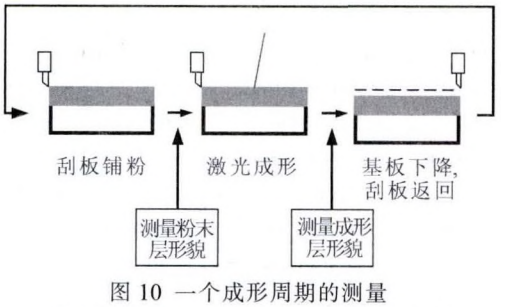
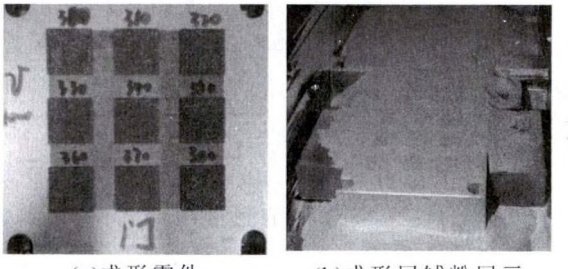


图 10 一个成形周期的测量

Fig.10 Measurement of a forming period

2.4 测量结果分析

在 SLM 设备上加工成形了如图 11(a)所示的零件，成形材料为铝合金粉末，共计 9 个 3×3 的 20 mm×20 mm 的方形阵列，边与边间距为 10 mm。成形参数中激光扫描速度为 1 000 mm/s，每块方形区域内部填充方式为网状栅格，填充栅格间距为 0.05 mm。如图 11(a)中标识所示，激光器输出功率从左往右、从上往下依次为 300、310、320、330、340、350、360、370 和 380 W，每个方形区域的激光成形功率各不相同。在此次成形过程中，所有方形区块的成形高度为 1 mm，每一层的成形厚度 0.05 mm，共计成形 20 层。图 11(b)所示为某一成形层的铺粉完成后，等待测量和激光烧结时的状态。

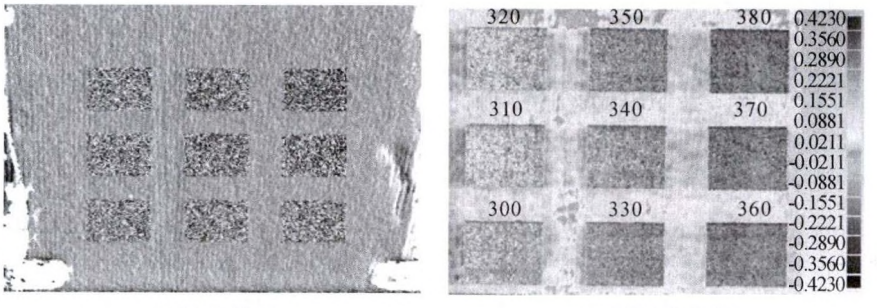


(a)成形零件　　(b)成形层铺粉展示

图 11 成形零件样例

Fig.11 Samples of molded parts

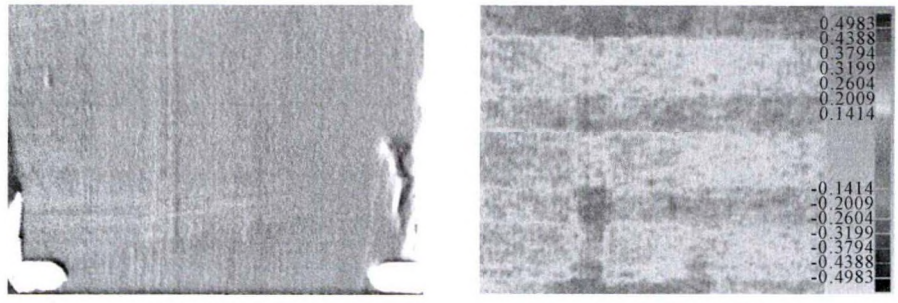
由于软件集成问题和成形过程中的复杂性，成形过程中并不是所有成形层像理想测量过程中那样被测量。图 12(a)所示为 16 层激光成形后成形层的三维形貌测量数据，因为通过成形坐标系配准，获得的点云数据已经转换到成形坐标系下，对其进行平面度分析如图 12(b)。我们可以通过对成形区域的三维形貌数中每个点的三维坐标中相对于 Z=0 的偏差来判断平面度，并根据偏差的正负和大小，对点云映射不同的颜色，使分析结果通过点云的彩色云图清晰明确显示。图 12(b)中最右边是平面度分析的标尺，暖色部分表示相对于 Z 轴的偏差大于 0，冷色部分恰好相反。可以看出，成形区域的高度会低于粉末层



(a)测量数据　　(b)平面度分析

图 12 成形层测量数据

Fig.12 Forming layer measurement data



(a)测量数据 (b)平面度分析

图 13 粉末层测量数据

Fig.13 Powder layer measurement data

0.2 mm 左右，同时功率越高的成形区域颜色更为均匀，表明该成形区域的成形质量更好。

图 13(a)所示为第 17 层激光成形前铺好的粉末层三维数据，将数据导入分析软件中对基板部位的粉末层进行平面度分析，其平面度偏差如图 13(b)所示。从图中以看出重新铺粉以后，成形区域的高度会比粉末层要高出 0.15 mm 左右，并且出现了铺粉不均匀的现象。

图 14 为 360 W 激光功率成形的方形部分，其四周分布的红色点云就是测量得到的成形层边缘轮廓数据。主要采用双目立体视觉原理来实现对轮廓信息的提取。从我们所测量的边缘轮廓数据可以看出，边缘轮廓提取是准确的。

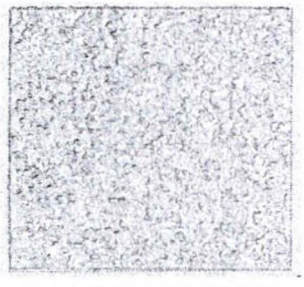


图 14 边缘轮廓测量数据

Fig.14 Edge profile measurement data

3 结论

通过研究结构光三维测量技术及相关的一些关键技术，并基于这些技术开发了一套可以用于监测粉末床熔融制造过程的在线测量系统。该系统能够实时的监测整个加工过程，发现成形过程中的缺陷，通过反馈控制调节参数来修复缺陷或者中止加工过程。此外，我们可以借助在线测量系统进一步的研究工艺参数、成形特性和零件质量之间的关系，再根据激光选区熔化成形设备——HK M250 型金属 3D 打印机的需求设计了一套在线测量装置，并且在机器上进行了一系列的实验。在实验中，从第 16 层成形层发现，功率越高，成形区域的成形质量越好；随后，在第 17 层铺粉过程中，出现了铺粉不均匀的现象，成形层要高出粉末层 0.15 mm 左右。从这些实验结果充分的证明该在线测量系统的科学性与实用性。

参考文献：

[1] 卢秉恒，李涤尘. 增材制造(3D 打印)技术发展[J]. 机械制造与自动化，2013，42(4): 1-4.

[2] Chua Z Y, Ahn I H, Moon S K. Process monitoring and inspection systems in metal additive manufacturing: Status and applications [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2017, 4(2): 235-245.

[3] 吴伟辉，杨永强，毛星，等. 激光选区熔化增材制造金属零件精度优化工艺分析[J]. 铸造技术，2016，37(12): 2636-2640.

[4] 施凡，赵吉宾，王志国，等. K465 合金激光增材制造加工工艺研究[J]. 机械科学与技术，2017，36(8):1298-1302.

[5] Kleszczynski S, Zur Jacobsmü hlen J, Sehrt J T, et al. Error detection in laser beam melting systems by high resolution imaging[C] //Proceedings of the Twenty Third Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium. 2012.

[6] Craeghs T, Clijsters S, Kruth J P, et al. Detection of process failures in layerwise laser melting with optical process monitoring[J]. Physics Procedia, 2012, 39: 753-759.

[7] Yadroitsev I, Krakhmalev P, Yadroitsava I. Selective laser melting of Ti6Al4V alloy for biomedical applications: Temperature monitoring and microstructural evolution [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 583: 404-409.

[8] Shiomi M, Osakada K, Nakamura K, et al. Residual stress within metallic model made by selective laser melting process [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2004, 53(1): 195-198.

[9] Van Belle L, Vansteenkiste G, Boyer J C. Investigation of residual stresses induced during the selective laser melting process [C] //Key Engineering Materials. Trans Tech Publications, 2013, 554: 1828-1834.

[10] 张学昌，杨峰. 融合图像域信息的面结构光测量点云数据三角化处理[J]. 机械科学与技术，2008,27(4): 421-424.

[11] 李中伟. 基于数字光栅投影的结构光三维测量技术与系统研究[D]. 武汉：华中科技大学，2009.

[12] Zhong K, Li Z, Li R, et al. Pre-calibration-free 3D shape measurement method based on fringe projection [J]. Optics express, 2016, 24(13): 14196-14207.

[13] 广军. 机器视觉[M]. 北京：科学出版社, 2005.

[14] 周迈. 视觉图像三维测量教学实验平台设计与开发[D]. 天津：天津大学, 2008.