

基于 Motoman 机器人的激光快速成形/修复系统研究

马 良 杨东辉 杨海欧 林 鑫 黄卫东

(西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要 以 Motoman SSF-2000 机器人为基础, 开发出激光快速成形/修复系统。在机器人上集成了高精度送粉系统、视觉监视系统、惰性气体保护系统, 能够实现零件的高精度成形及修复。控制系统采用 MotoCom32 通信接口实现计算机与机器人的通信, 对激光快速成形/修复系统全工艺参数进行计算机集成控制, 保证激光加工过程自动化运行。简单零件的成形与修复通过示教盘的示教编程实现, 复杂零件成形与修复过程通过读取解析 AutoCAD 的 DXF 文件, 获取用户设计的曲线信息, 并将曲线离散为满足精度要求的多线段。通过机器人程序与计算机同步协调工作, 实现运动轨迹的不断更新, 从而完成复杂曲线的激光连续加工。实验表明该系统可以出色地完成高精度的零件成形及修复过程。

关键词 光学制造; 激光立体成形; 机器人; DXF 文件; 工艺参数

中图分类号 TG142 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100309

Study of Laser Solid Forming/Repairing System Based on Motoman Robot

Ma Liang Yang Donghui Yang Haiou Lin Xin Huang Weidong

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract A laser solid forming/repairing system is developed based on Motoman SSF-2000 robot where high-precision robot powder feeding system, real-time vision system and inert gas protection system are integrated altogether and high-precision forming and repairing process can be achieved. The computer communicates with the robot by utilizing MotoCom32 communication interface to control all the processing parameters about the automation of the laser processing operation. When a simple part is formed or repaired, the system programs by the way of controlling teaching plate. When a complex part requires forming or repairing, the control system reads the DXF file produced by AutoCAD which records the geometric information of the curve, and calculates the curve to a large number of short lines to meet the accuracy requirement. By the real-time communication between computer and the robot, the control system can update the motion trail data. Experiments show that the system can complete the processing of laser solid forming and repairing excellently.

Key words optical fabrication; laser solid forming; robot; DXF file; processing parameter

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 140.3510

1 引 言

金属激光快速成形/修复技术是在快速成形技术和大功率激光熔覆技术蓬勃发展的基础上迅速发展起来的一项新的先进制造技术^[1,2]。该技术综合

了激光技术、材料技术、CAD/CAM 技术、数控技术等先进制造技术, 通过逐层熔化、堆积金属粉末, 能够直接从 CAD 数据生成三维实体零件, 可以实现高性能复杂结构致密金属零件的快速、无模具、近净

收稿日期: 2010-03-10; **收到修改稿日期**: 2010-04-23

基金项目: 凝固技术国家重点实验室博士后基金(03-BZ-2010)和实验室自主课题(16-TZ-2007)资助课题。

作者简介: 马 良(1978—), 男, 博士, 主要从事复杂金属零件的激光立体成形方面的研究。

E-mail: maliang@nwpu.edu.cn

成形。这项技术尤其适用于大型复杂结构零件的整体制造,在航空航天等高新技术领域具有广阔的发展前景^[3,4]。

工业机器人是传统的机构学与现代电子技术相融合的产物,其高柔性、高灵活性等特点,使其已经成为柔性制造系统(FMS)、自动化工厂(FA)、计算机集成制造系统(CMS)的自动化工具^[5~7]。通过将机器人技术与激光快速成形/修复技术相结合,可以大大提高激光成形/修复过程的柔性和灵活性,方便实现复杂金属零件的快速成形与修复以及大型零件的现场修复过程。本文重点讨论基于首钢 Motoman SSF-2000 型机器人的激光快速成形/修复系统的构架、全工艺参数控制以及复杂形状轮廓多线段连续插补的实现方法等问题。

2 基于 Motoman 机器人的快速成形/修复系统构架

与传统的数控平台相比,机器人快速成形/修复系统有自己的特点。在运动学上,机器人有高灵活性,能够加工具有复杂细节和复杂外形的金属零件,一般不需要二次装夹,能够保证成形效率和精度;在同样尺寸下,机器人的工作范围更大,能够节省约

40%的工作空间;对于不易移动的巨型零件,采用机器人成形/修复将是最为经济的选择。机器人系统的主要弱点是定位精度较低,目前国内外主流机器人的重复定位精度在 $\pm 0.02 \sim 0.08$ mm 之间。对于金属零件的成形/修复来说,一般激光光斑直径在 $0.5 \sim 1.5$ mm 范围,金属零件成形/修复过程中熔池的尺寸一般与激光光斑尺寸相当,由于激光工艺参数(激光功率、扫描速度等)较为繁多,控制过程复杂,激光成形/修复过程熔池会有波动,成形表面会有微小起伏,成形/修复完毕后还需要进行后处理,而上述机器人的重复定位精度较激光光斑小 1 个数量级,一般能够满足激光成形/修复的精度要求。

基于 Motoman 机器人的快速成形/修复系统如图 1 所示,其中包括:机器人和机器人控制系统,远程控制计算机,送粉和保护气氛系统和激光系统。计算机与机器人控制柜的远程通信,采用 MotoCom32 通讯接口,通过 Ethernet 网连接,实现机器人运动轨迹的远程规划和控制。通过将送粉、保护气氛、激光器等控制信号连接到机器人控制柜上,可以实现金属激光成形/修复全工艺参数的控制,大大简化了操作规程,缩短了加工时间,降低了人为导致的误操作,提高了加工过程的安全性。

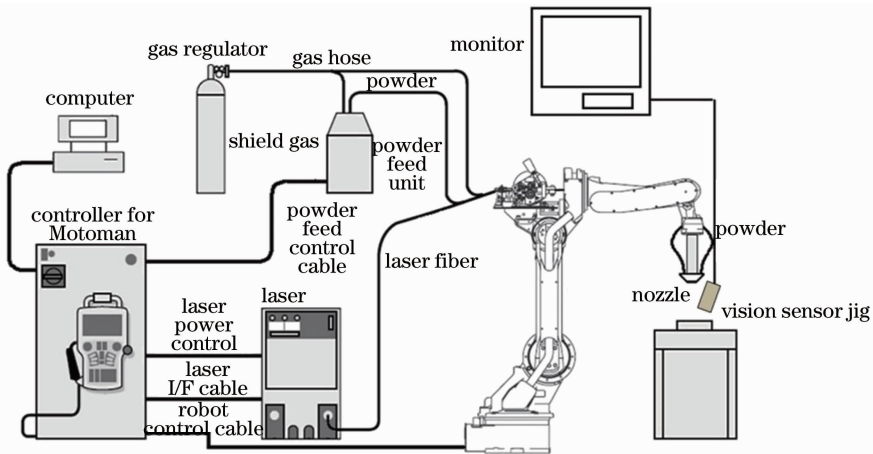


图 1 基于 Motoman 机器人的激光快速成形/修复系统

Fig. 1 Laser solid forming/repairing system based on Motoman robot

3 激光立体成形/修复系统的过程控制

3.1 机器人远程控制系统

本系统采用德国 IPG 公司生产的 300 W 光纤激光器,该类激光器由于光束质量好、输出功率稳定、电光转换效率高(接近 70%)、环境适应能力强、体积小、效率高,已经成为金属激光加工的不二选

择。该类激光器的主要控制参数有两个:激光光闸开关控制和激光功率控制。

激光光闸开关控制信号为 $0 \sim +24$ V 数字电压信号,其中 0 对应激光关闭,+24 V 对应激光打开。Motoman NX100 机器人控制柜预留了 CN07~CN10 四个通用 I/O 接口,其中 CN08 通用输出口为 40 针接口,该接口含有 8 组 OUT 输出,可以分

别控制 8 路开关量。本文使用 OUT17 口作为激光开关控制端口,机器人控制器与激光器的接口关系如图 2 所示,其中 OUT17 相当于一个逻辑继电器,当 OUT17 为 ON 时,OUT17- 与 OUT17+ 导通,即控制光纤激光器的端口两端的电压为 +24 V,从而驱动激光器打开,反之,OUT17- 与 OUT17+ 断开,激光器关闭。

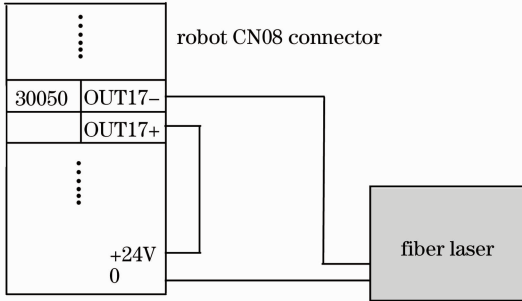


图 2 机器人输出口与激光器相连示意图

Fig. 2 Connection diagram between robot and fiber laser

在金属零件的激光加工中使用的激光功率一般较大,如果辐射到人身上将会导致严重的事故,所以安全成为基于机器人的激光修复设备的关键设计。如果仅仅采用上述的 OUT17 口来控制激光器的开关,在正常运行情况下,程序会在一次扫描完成后关闭激光(即 OUT17 为 OFF),不会发生问题,但是当机器人出现限位报警、冷却系统报警、运算报警等各种报警后,机器人会暂停当前程序,这时程序还没有执行到关闭激光命令行,激光器仍然处于打开状态,这将导致严重的后果。所以需要重新定义机器人 OUT17 端口的梯形图,在 OUT17 端口的逻辑控制端,必须与机器人各种报警信息相“非与”,从而保证只有在所有报警信息解除的情况下,才允许激光器打开。由于发生报警信号后,是允许操作人员手动解除报警信息的,所以存在操作人员在没有关闭激光器的情况下解除了报警信息,从而导致激光端口再次打开,导致严重后果,所以 OUT17 口的逻辑控制端还需要与程序运行标志相“与”,即只有在程序运行状态下才允许激光打开。OUT17 端口采用的具体梯形图如图 3 所示。

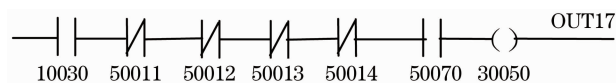


图 3 OUT17 口梯形图

Fig. 3 Ladder program of OUT17

激光功率的控制是通过 Motoman 机器人弧焊基板 JANCD-XEW02(34 针接口)提供的 1 路模拟电压输出来控制的。输出电压 0~14 V,通过隔离

线性调压电路将其转换为 0~10 V 电压输出,直接接入光纤激光器功率控制端口,就可以完成对光纤激光器的功率实时控制。

3.2 激光立体成形/修复控制系统

激光立体成形/修复系统的控制系统采用自主开发的软件实现。对于复杂的三维实体造型零件,通过 CAD 造型系统转换为工业通用的 STL 文件。控制系统的子模块可以实现 STL 模型自动切片,并将每层的轮廓数据自动提取出来,实现光栅式扫描路径填充^[8,9]。对于用户自定义的成形及修复过程,在 AutoCAD 环境中进行几何设计,将文件保存为 DXF 格式,控制系统可以通过对 DXF 文件的解析来提取用户设计的所有几何信息。图 4 为基于 Motoman 机器人的激光快速成形/修复控制系统的主界面。MotoCom32 接口只提供了直线插补指令,而用户设计的图形可能包含直线、双曲线、抛物线、贝塞尔曲线中任何一种或者几种曲线,所以首先需要将上述各种曲线离散为直线段,然后控制机器人运动,实现用户设计图形的激光立体成形/修复,其中多线段的连续插补是实现该方案的关键环节。

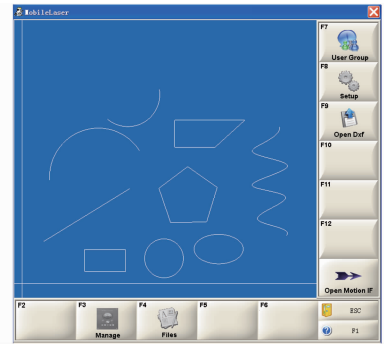


图 4 基于 Motoman 机器人的激光快速成形/修复控制系统界面

Fig. 4 Interface of laser rapid forming/repairing system based on Motoman robot

根据设定的激光加工精度,系统将扫描曲线分割为多段小直线,控制机器人以一定的速度沿着小直线段运行,从而实现任意曲线的激光加工。但是由于机器人控制柜内部的位置寄存器 P 的数目是有限的(NX100 系统有 1600 个 P 变量),因此对于一条有几千甚至上万个位置点的扫描曲线,就需要采用 P 变量同步更新的算法,即在机器人运行上述 P 变量的过程中,同步更新机器人已经执行过的 P 变量,当机器人运行到最后一个 P 变量位置时,前面的 P 变量也被更新完毕,通过跳转到程序开始位置,重新执行上述 P 变量,由于 P 变量的位置信息

已经被更新,所以机器人将扫描新的位置,从而实现任意长曲线的连续激光加工。

P 变量更新算法的关键是:通过远程检测机器人内部还剩余多少个点没有执行,即图 5 中的 n_p 变量的值,可以确定当前机器人已经运行到了哪个点,当前已经更新到第几个点由 P_i 记录,根据两者的差值,可以决定更新 P 变量的位置和数目。图 6 为 P 变量更新流程图。在计算机远程启动机器人运动程序之前,首先需要给机器人发送 1600 个 P 变量,然后启动机器人运动控制程序,启动成功后,机器人沿着 P 变量设定的坐标位置开始运动,这时主程序也同时启动 P 变量更新程序,通过反复检测机器人内部剩余点数目等变量,计算当前需要更新 P 变量的数目。更新程序主要确保机器人在运动过程中,新的 P 变量被不断传递给机器人,通过这两个程序协同工作,从而保证任意长度曲线的连续激光扫描。

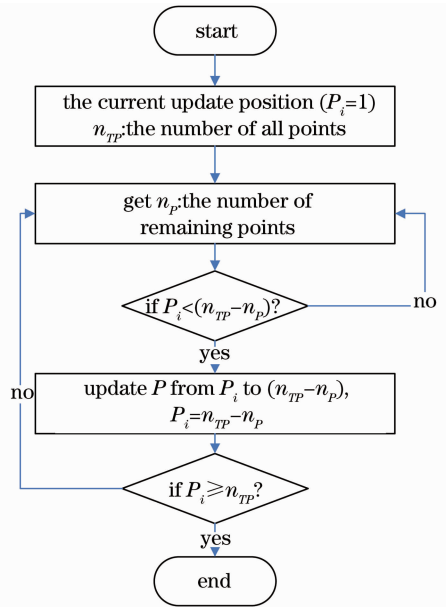


图 6 P 变量更新算法

Fig. 6 Algorithm of update P variable

材料,如钛合金等材料成形及修复过程中,设计并安装了可拆卸气氛保护罩。可以实现对铝合金、不锈钢材料及钛合金等材料的沉积过程的气氛保护。

在同轴送粉喷嘴上部,系统集成了远程监视系统,此系统由视频传感器及监视器组成。监视系统可以实时观察激光沉积过程,通过观察激光光斑形状、亮度及飞溅粉末流线来实时判断沉积层的质量。

4 实验验证及存在的问题

在激光立体成形/修复系统基础上,通过调整合理的工艺参数可以得到结构复杂、表面粗糙度较低、内部组织均匀的成形试样,图 7 展示的即为此系统成形试样。由于机器人手臂姿态可自由调节,因此在叶片等复杂曲面零件的修复上具有较大的优势,可以达到在较小的热影响区下相对较高的修复精度,减少后期机械加工难度和时间。图 8 为使用此系统修复成功的叶片,图中椭圆形部分为破损叶片修复后的形貌。

基于 Motoman 机器人的激光立体成形/修复系统在使用过程中仍然存在一些需要解决的问题。由于现在使用的是 300 W 的光纤激光器,存在光斑直径小、功率密度低、成形及修复过程耗时较长等问题;由于光斑直径较小(约 0.5 mm),对送粉系统的精度提出了较高的要求,一旦出现送粉过程不均匀或者气体流量与送粉速率不匹配等问题,就会造成沉积层表面凸凹不平;机器人在启动与停止过程中由于机械结构原因会有加速、减速的过程,而激光器

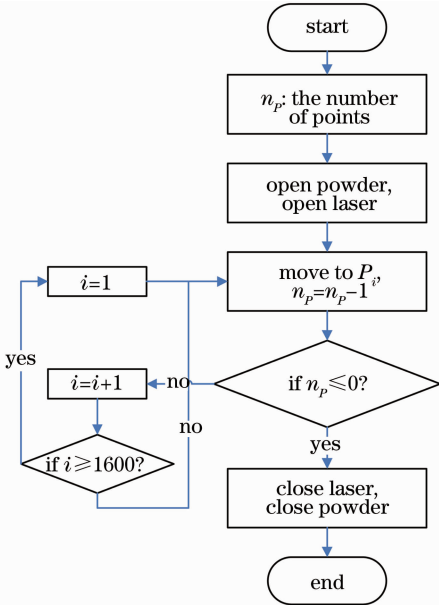


图 5 机器人端运动控制算法

Fig. 5 Motion control algorithm in robot

3.3 送粉及保护系统

送粉器系统采用高精度 DPSF-2 型送粉器,送粉率在 0~40 g/min 可调,送粉精度优于 $\pm 2\%$ 。送粉器集成了两路独立送粉管路,可以实现双路高精度独立送粉,用于梯度功能材料的激光立体成形加工。送粉保护气体采用氩气,气体的流量可以在每分钟 3~9 个标准大气压范围内调节。在机器人激光整形放大光路中,位于熔池上部的镀膜保护镜容易遭到飞溅金属液滴污染,造成激光光斑形状改变。因此在保护镜下方增加了大气流侧吹装置,这样可以有效保护镜头的安全。在对需要惰性气氛保护的

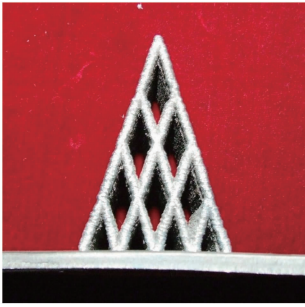


图 7 基于 Motoman 机器人激光立体成形系统成形试样
Fig. 7 Complex part manufactured by laser solid forming system based on Motoman robot

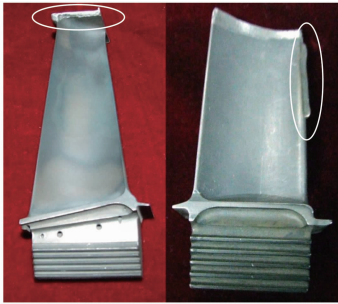


图 8 基于 Motoman 机器人激光立体成形系统所修复的叶片
Fig. 8 Blades repaired by laser solid forming system based on Motoman robot

的启动是在毫秒级别的,这就使得加减速部位出现局部沉积量过大现象,因此需要引入激光功率的实时控制。

5 结论与展望

以 Motoman SSF-2000 型机器人为基础,构建了金属激光立体成形/修复系统,该系统可以对激光加工过程的主要影响因素进行计算机远程控制。建立了机器人运动控制程序和计算机 P 变量远程同步更新程序,通过两者的协同工作,实现了多线段的连续插补。通过读取解析 AutoCAD 的 DXF 文件中的几何信息,获取用户设计的曲线信息,并将曲线离散为满足精度要求的多线段,使用多线段连续插补算法,实现运动轨迹的不断更新,从而完成复杂曲线的激光连续加工。实验表明该系统能够出色地完成高精度薄壁小型零件的成形,能够完成复杂曲面零件高精度、高质量的修复工作。

在本系统成功开发的基础上,将进一步研究熔

池温度场的实时采集与控制,单道沉积高度的实时采集与控制,建立激光立体成形/修复实时控制数学模型。使机器人能够自动调整扫描过程中的扫描速度与激光功率,自动实现高精度、高质量零件的加工与修复,从而推动激光立体成形/修复装备小型化、智能化发展,实现大型、重要构件的现场成形与修复。

参 考 文 献

- Huang Weidong, Li Yanmin, Feng Liping *et al.*. Laser solid forming of metal powder materials [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2002, **3**: 40~43
黄卫东, 李延民, 冯莉萍等. 金属材料激光立体成形技术 [J]. *材料工程*, 2002, **3**: 40~43
- Huang W.. Research and development of laser additive manufacturing in Northwestern Polytechnical University [J]. *Proceedings of the 28th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics*, 2009
- Yang Lin, Zhong Minlin, Huang Ting *et al.*. The study of parameters for laser direct manufacturing Ni based super-alloy [J]. *Applied Laser*, 2004, **24**(6): 345~349
杨林, 钟敏霖, 黄婷等. 激光直接制造镍基高温合金零件成形工艺的研究 [J]. *应用激光*, 2004, **24**(6): 345~349
- Huang Weidong, Lin Xin. Research progress in laser solid forming of high performance metallic component [J]. *Materials China*, 2010, **29**(6): 12~27
黄卫东, 林鑫. 激光立体成形高性能金属零件研究进展 [J]. *中国材料进展*, 2010, **29**(6): 12~27
- Li Yanmin, Pan Qingyue, Huang Weidong *et al.*. The application of artificial neural network on technique optimization of laser processing [J]. *Transactions of Metal Heat Treatment*, 1998, **19**(4): 14~18
李延民, 潘清跃, 黄卫东等. 应用人工神经网络于激光加工工艺优化 [J]. *金属热处理学报*, 1998, **19**(4): 14~18
- Dong Zhibo, Wei Yanhong, Zhan Xiaohong *et al.*. Optimization of mechanical properties prediction models of welded joints combined neural network with genetic algorithm [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, **12**: 69~72
董志波, 魏艳红, 占小红等. 遗传算法与神经网络结合优化焊接接头力学性能预测模型 [J]. *焊接学报*, 2007, **12**: 69~72
- Zhang Ke, Lu Xueqin, Wu Yixiong *et al.*. Research status and development trend about mobile welding robots [J]. *Welding & Joining*, 2004, **8**: 5~9
张轲, 吕学勤, 吴毅雄等. 移动焊接机器人的研究现状及发展趋势 [J]. *焊接*, 2004, **8**: 5~9
- Ma Liang, Huang Weidong. Rapid slicing algorithm based on dynamic topological reconstruction for STL model [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10): 1623~1626
马良, 黄卫东. 基于 STL 数据模型动态拓扑重构的快速切片算法 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(10): 1623~1626
- Ma Liang, Huang Weidong. An algorithm for rapid recognition of outlines group based on information inheriting [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2009, **28**(4): 482~486
马良, 黄卫东. 基于信息继承的可连轮廓组快速提取算法 [J]. *机械科学与技术*, 2009, **28**(4): 482~486