

# 激光再制造机器人光电视觉技术进展

(邀请论文)

杨洗陈 张海明 刘立峰 方艳 董玲 高贵 刘美丽 陈卓  
王非 刘正 张耀武

(天津工业大学激光技术研究所, 天津 300160)

**摘要** 机器视觉技术对激光机器人加工过程检测与控制具有主要作用。基于 CCD/CMOS 光电视觉技术,开展了激光再制造机器人零件三维几何形貌重建、激光熔池温度场、同轴送粉粉末流浓度场等 3 种机器视觉系统研究。3D 形貌机器视觉系统:扫描宽度 200 mm,扫描速度 10~50 mm/s,最大误差小于 1 mm。温度场机器视觉系统:测温范围 700 °C~2400 °C,精度 50 °C。粉末流场机器视觉系统:粉末流量检测范围 1~100 g/min。3 种系统均可进行实时检测,且体积小,能方便地与机器人安装、耦合。

**关键词** 机器人;机器视觉;激光;再制造;CCD/CMOS 相机

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0601008

## Machine Vision in Laser Remanufacturing Robot

Yang Xichen Zhang Haiming Liu Lifeng Fang Yan Dong Ling Gao Gui Liu Meili  
Chen Zhuo Wang Fei Liu Zheng Zhang Yaowu

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

**Abstract** Machine vision plays an important role in measuring and controlling for laser robot processing. Based on CCD/CMOS, three kinds of machine vision systems for laser remanufacturing robot are developed to reconstruct of 3D-CAD part, temperature field and powder stream field. Their parameters are as follows: scanning width is 200 mm, scanning speed is 10~50 mm/s, deviation is less than 1 mm in 3D-CAD part; measuring temperature regions are 700 °C~2400 °C, deviation is less than 50 °C; measuring powder stream rate regions are 1~100 g/min. They all can realize a real time and online testing and are available in laser remanufacturing robot processing.

**Key words** robot; machine vision; laser; remanufacturing; CCD/CMOS camera

**OCIS codes** 150.6910; 110.2970; 100.3010; 350.3390

## 1 引言

进入 21 世纪,激光加工机器人技术获得快速发展,国际上激光切割机器人和激光焊接机器人已形成系列产品,在汽车、航空、航天和军事等产业获得成功应用<sup>[1~3]</sup>。近年来,随着绿色制造、低碳生活和循环经济的发展,面对航空航天、冶金和汽车等行业再制造的广阔市场需求,国外已有激光熔覆机器人的报道<sup>[4,5]</sup>,国内天津工业大学开展了激光再制造机器人研究<sup>[6]</sup>。

在激光再制造过程中,存在声、光、电、磁、热和力等十分复杂的物理场,对激光再制造零部件的外部形状和内在质量有很大的影响,作业条件也是不断变化的,这些变化也对工艺稳定性产生影响。例如:激光高温熔池内存在传热、传质和对流等物理传输过程,高温熔池外存在激光等离子体,需要开展激光熔池温度场和等离子体场的检测;为了控制激光熔覆层的质量,需要开展同轴送粉金属粉末流浓度场和速度场的检测;为了重建激光再制造作业修复

**收稿日期**: 2011-03-31; **收到修改稿日期**: 2011-04-11

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

**作者简介**: 杨洗陈(1941—),男,教授,博士生导师,主要从事激光材料相互作用、激光加工理论及应用和机器视觉等方面的研究。E-mail: yangxich@126.com

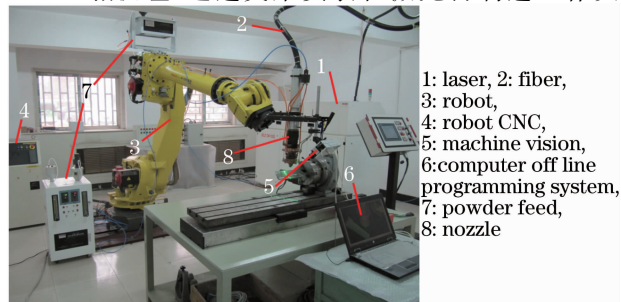
本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)

损伤部位,需要开展零件和损伤部位 3D 形貌检测,利用逆向工程进行反求重建,建立 3D-CAD 软件,再形成 3D-CAM 程序,引导机器人激光熔覆,完成损伤部位的三维修复。因此,需要开展机器视觉技术研究,从而使激光再制造机器人具有一定的智能化,对激光再制造过程进行在线实时监控。但是,激光再制造机器人的机器视觉技术具有很高的技术难度,需要激光材料相互作用、机器视觉检测、计算机模拟、信息处理、逆向工程、软件开发和机器人离线编程和控制等多种学科知识的交叉。开展激光再制造机器人的机器视觉技术研究不仅具有重要的实用价值,而且具有较高的理论意义。

近年来以 CCD/CMOS 为代表的光电视觉技术日臻成熟,具有视觉直观、非接触测量、实时检测、体积小、成本低和易与机器人耦合等特点。CCD/CMOS 光电器件作为激光加工机器人的光电视觉技术,已形成目前国内外研究前沿和热点课题<sup>[7~11]</sup>。本文重点对激光再制造机器人中零件三维几何形貌重建、激光熔池温度场、同轴送粉金属粉末流浓度场等机器视觉技术研究进展做了综合报道。

## 2 激光再制造机器人光电视觉系统构成

本工作研制的具有视觉功能的激光再制造机器人系统主要由图 1 所示 8 个部分构成:1)可光纤传输的高功率激光器系统单元;2)高功率激光光纤耦合和光纤传输单元;3)六自由度机器人本体单元;4)机器人数字控制系统单元;5)机器视觉检测系统单元;6)计算机离线编程系统单元;7)远程熔覆材料同轴输送进给系统单元;8)激光再制造工作头单元。其中机器视觉检测系统主要由零件表面形貌 3D 扫描单元、激光熔池温度场检测单元和激光同轴送粉粉末流场检测单元组成;3 种机器视觉检测系统均采用 CCD/CMOS 相机组,通过支架安装在激光再制造工作头



1: laser, 2: fiber,  
3: robot,  
4: robot CNC,  
5: machine vision,  
6: computer off line  
programming system,  
7: powder feed,  
8: nozzle

图 1 具有视觉的激光再制造机器人系统

Fig. 1 Laser remanufacturing robot system with machine vision

上。该系统单元采集相关数据和图像信息,机器人系统依托高性能计算机软硬件的标准化特性,有效地将机器视觉、逆向工程、图像处理、离线编程、模拟仿真、状态监控、优化控制、人工智能和网络通信等领域的知识交叉集成应用到机器人控制系统中,形成一整套智能化的激光修复再制造机器人系统。

## 3 激光再制造零件三维几何形貌重建机器视觉技术

在激光再制造机器人对零件现场修复工作中,修复现场常常缺乏零部件原设计图纸,需要重建其三维模型,以便生成磨损区域的加工路径,并由加工轨迹点和法向参数来控制机器人的末端姿态。目前市场上已有对零件进行三维非接触测量的扫描仪,如美国 Perceptron 公司的 ScanworksV3 三维激光扫描系统,加拿大 Creaform 公司的 Handyscan3D EXA/REV scan 手持式三维数字扫描系统。但是存在以下问题:体积大,结构复杂,不便于与机器人耦合;扫描仪仅提供生成的点云或三角网格面文件,扫描功能和重建功能分离,三维模型重构需要导入到另外分离的逆向软件中进行,机器人无法直接使用;无有识别磨损区域特征功能;价格高,不利推广应用。本文基于双目 CMOS 相机立体视觉检测原理,开发了一种用于激光再制造机器人的零件三维形貌视觉检测系统。

### 3.1 检测原理

该检测系统由零件三维形貌扫描硬件装置和零件三维模型重构专用软件组成。三维形貌扫描装置发射结构光,在待修复零件表面进行扫描,双目 CMOS 立体视觉相机采集结构光反射信息,送入计算机,经三维模型重构专用软件处理后,即可生成待修复零件 3D-CAD 模型。将 3D-CAD 模型数据送入路径规划模块,进行离线编程和仿真,检查无误后即可送入数控系统进行加工,如图 2 所示。三维模型的检测、反求过程以及机器人加工路径的生成都是自动快速的,具有结构简单、精度高、成本低和操作容易等特点。

零件三维形貌扫描基于双目立体视觉三维测量原理<sup>[12,13]</sup>。2 个摄像机从不同的角度同时获取物体的两幅数字图像,2 幅图像之间存在视差,再根据三角测量原理,求出物体三维信息。图 3 为双目立体成像原理图。

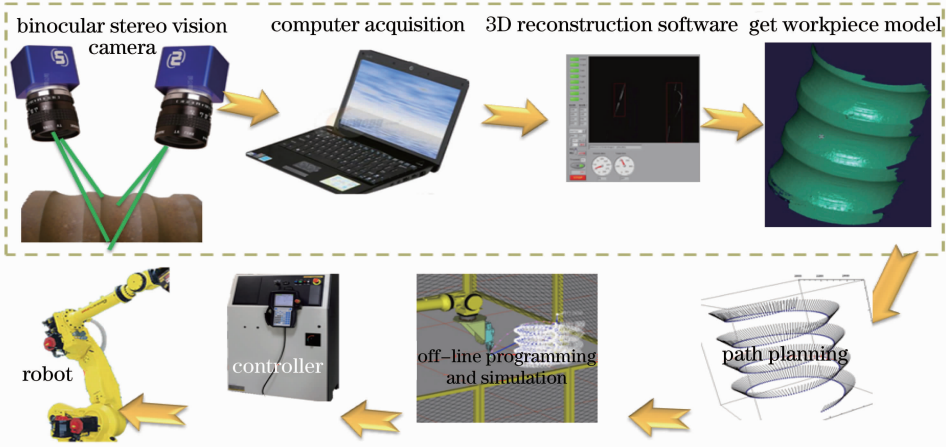


图 2 激光再制造零件三维几何形貌重建机器视觉检测流程图

Fig. 2 Flow diagram for 3D reconstruction of part by machine vision

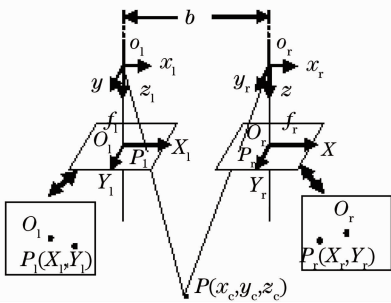


图 3 双目立体视觉原理

Fig. 3 Principle of binocular stereo vision

假设两摄像机的图像在同一个平面上，则  $P$  点在左右图像上的坐标  $Y_l = Y_r = Y$ ，图中  $b$  为两摄像机投影中心距。设左摄像机世界坐标系为  $O_l-x_l-y_l-z_l$ ，有效焦距  $f_l$ ；右摄像机坐标系为  $O_r-x_r-y_r-z_r$ ，有效焦距  $f_r$ 。对于  $O-x-y-z$  坐标系中的空间点  $P(x_c, y_c, z_c)$  与两摄像机像面点  $P_l(X_l, Y_l), P_r(X_r, Y_r)$  之间的对应关系为

$$s_l \begin{bmatrix} X_l \\ Y_l \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_l & 0 & 0 \\ 0 & f_l & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$s_r \begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_r & 0 & 0 \\ 0 & f_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{lr} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{M}_{lr} = [\mathbf{R}_{lr} | \mathbf{T}_{lr}] = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中  $\mathbf{M}_{lr}$  为左右摄像机坐标系的转换矩阵，由旋转矩阵  $\mathbf{R}_{lr}$  和平移矢量  $\mathbf{T}_{lr}$  构成。由此可求出空间点  $P$  的三维坐标为

$$\begin{cases} x_c = zX_l/f_l \\ y_c = zY_l/f_l \\ z_c = \frac{f_l(f_r t_x - X_r t_z)}{X_r(r_7 X_l + r_8 Y_l + f_l r_9) - f_r(r_1 X_l + r_2 Y_l + f_l r_3)} \end{cases}, \quad (4)$$

由此可见，只要能够找到空间中某点在左右 2 个摄像机像面上的相应点，并且通过摄像机标定获得摄像机的内外参数，就可以确定这个点的三维坐标。

### 3.2 系统构成

机器人零件三维形貌视觉检测系统主要由双目立体视觉检测装置和机器人耦合装置构成<sup>[14,15]</sup>。图 4 为双目立体视觉检测装置图，由 2 个摄像机、结构光、专用图像处理软件和计算机组成。

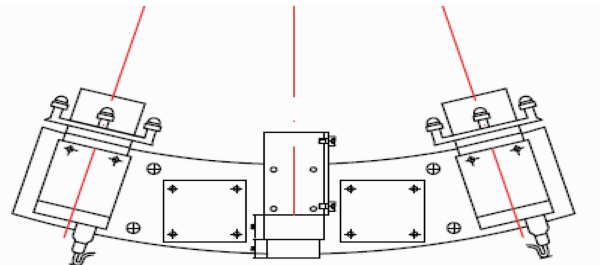


图 4 双目立体视觉检测装置

Fig. 4 Setup of binocular stereo vision

摄像机：工业型 CMOS 相机，130 万像素，最高分辨率 1280 pixel × 1024 pixel；输出颜色 Bayer 彩色；帧频率在分辨率 640 pixel × 1024 pixel 时为 45 frame/s；可编程控制。开发环境 Win2000、XP、Vista。

结构光:具有线光斑的半导体激光器,输出波长 532 nm,输出功率 100 mW,光斑模式:TEM<sub>00</sub>。2 个 CMOS 摄像机和半导体激光器被固定在同一底板上,两相机光轴夹角选为 30°。半导体激光器向被测物体投射结构光,用于被测物体特征点提取和匹配。

计算机:系统共用的移动式图形工作站 HP 8530。处理器主频 2530 MHz,内存 8 Gb,硬盘 250 Gb,显示器 37.7 cm WSXGA+(1680 pixel×1050 pixel),显存 512 Mb,英特尔千兆网络连接(10/100/1000 网卡)。

图 5(a)为激光再制造机器人零件三维几何形貌重建机器视觉系统。激光加工头通过专用夹具与机器人末端执行器成 135°相连。双目 CMOS 立体视觉检测装置固定在激光加工头上,与激光加工头焦点的距离以 300~400 mm 为好,这里选为 350 mm。图 5(b),(c)分别为双目立体视觉检测装置扫描叶片生成的点云图案和 3D-CAD 模型。

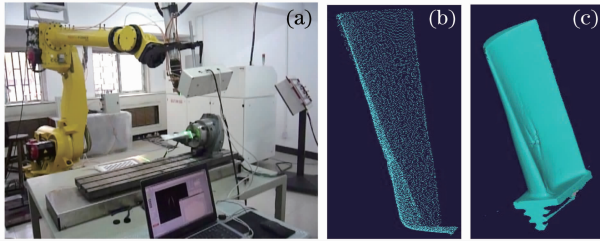


图 5 零件三维几何形貌重建机器视觉系统

Fig. 5 Machine vision system for 3D reconstruction of part

### 3.3 系统标定和坐标变换

如图 6 所示,在机器人零件三维形貌视觉检测中,存在 4 个坐标系:零件表面坐标系(W)、双目 CMOS 相机组坐标系(E)、机器人末端执行器坐标系(H)和机器人坐标系(R)。三维扫描装置检测出的数据位于 CMOS 相机坐标系。经坐标变换,由相机坐标系(eye)变换到机器人末端坐标系(hand)。由于机器人末端(hand)与加工头末端(tool)通过专

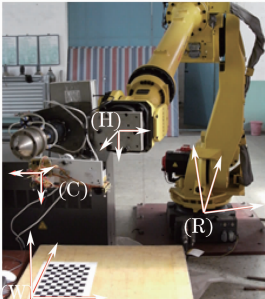


图 6 机器人零件三维形貌视觉检测坐标系

Fig. 6 Coordinate system in laser robot machine vision

门设计的夹具连接,必须根据夹具几何尺寸将测量到的模型数据由机器人末端坐标系(hand)变换到加工头坐标系(tool),以此来实现全局坐标系的统一,再配合不同的工艺参数,如离焦量、搭接率等来实现对加工过程的引导。

对机器人零件三维形貌视觉检测全套系统进行了标定试验<sup>[16~18]</sup>,包括:单摄像机的标定,求取摄像机内外参数矩阵  $M_1, M_2$ ;双目摄像机相对位置标定,按变换矩阵  $M_{1-r} = [R_{1-r} \quad T_{1-r}]$  求取;双目摄像机与机器人末端的手眼关系标定,按变换矩阵  $M_{h-e} = [R_{h-e} \quad T_{h-e}]$  求取。全套立体视觉系统标定变换关系如图 7 所示。经过坐标变换,能够将从不同角度扫描重建的模型置于机器人坐标系中,完成了多角度的数据拼接,对机器人加工也非常方便。

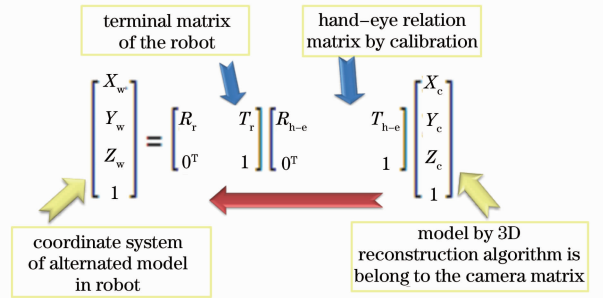


图 7 机器人零件三维形貌视觉检测全套系统标定变换关系图

Fig. 7 Calibration of laser robot/machine vision system

### 3.4 零件三维模型重建软件设计

三维模型重建通常是采用逆向工程软件进行的,国际上已研发出多种逆向工程专用软件:Imageware, Geomagic Studio, CopyCAD 和 Rapid Form 等<sup>[19]</sup>。曲面重构是逆向工程最关键、最复杂的环节,里面涉及到计算机图形学、数字图像处理和计算方法等多方面知识的综合应用。在一般的逆向工程中,模型重建是先构建曲面,然后根据实际需要转化成实体模型。

但是在激光再制造中,由于数据需要在不同的软件之间进行传输,而且不同的软件系统精度不同,经常存在不能转换的区域或转换失败,可能会导致实体转换不能完成重建的现象发生。近年来用网格化模型代替实体模型更有利于曲面模型的三维造型,但是目前很多的三角剖分算法都是针对平面三角剖分的,如何将空间点云三角化一直是个难点<sup>[20,21]</sup>。本工作针对以上遇到的问题,在基于体的算法基础上提出了法矢量过滤法和边缘提取法<sup>[22]</sup>。该方法可以保证所生成三角网格的拓扑和原型的拓



扑结构保持一致,提高了三角网格化的精度,实验证明该方法具有很强的实用性。图 8 为零件三维模型重建软件设计流程图:零件三维形貌扫描装置采集的点云数据→计算机点云数据处理→破损区域识别→曲面重建→零件 CAD 模型生成→数控加工数据生成。

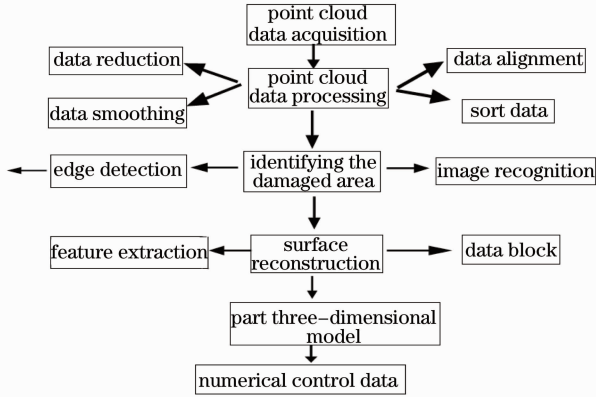


图 8 零件三维模型重建软件流程图

Fig. 8 Software flow of 3D-CAD reconstruction

### 3.5 零件表面激光扫描

在 FANUC R2000iB 工业机器人上,系统对零件表面进行三维扫描,如图 9 所示。具有两种扫描模式:低速高精度扫描(小于 5 mm/s)和高速普通扫描模式(小于 100 mm/s)。本试验中采用高精度扫描模式,用示教盒控制机器人沿被测量工件从不同角度移动完成对工件扫描。



图 9 零件表面激光扫描试验

Fig. 9 Scanning test for 3D-CAD reconstruction

### 3.6 零件三维模型重建

首先提取结构光,提取流程如图 10 所示:结构光扫描零件→双目 CMOS 相机采集结构光→结构光目标区提取→结构光中心计算→双目结构光配准。

图 11 为零件三维模型重建的图像。试验结果显示,该系统能够实现被加工零件的精确重建,效果较好。且重建出的零件位于机器人坐标系,无需校准对齐,数据可直接用于加工。

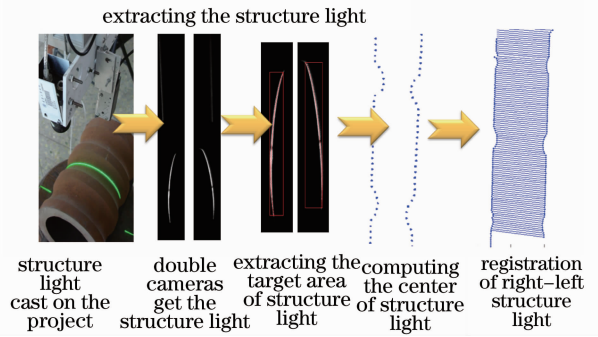


图 10 结构光目标区域提取

Fig. 10 Extraction of target area for structure light

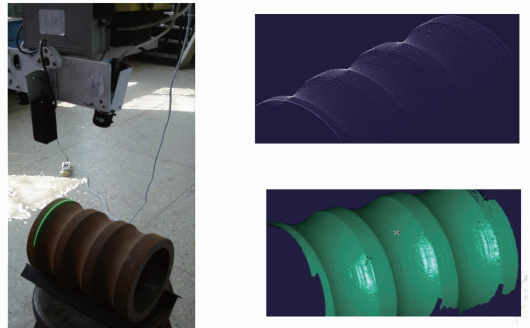


图 11 零件三维形貌重建

Fig. 11 3D reconstruction results of the part

图 12 比较了重建模型与实体零件尺寸的误差,图中黄色部分为测量区域。在造型软件中采用拟合的方法求出该区域的曲率半径分别为 161.956 mm 和 161.890 mm,使用卡尺测量该部分的结果为 161.90 mm,其误差分别为 0.056 mm 和 0.010 mm。从测量结果看,高精度扫描模式下误差在 ±0.1 mm 之间。该系统的误差主要包括标定误差、机器人定位误差及程序延时造成的数据不同步误差,通过多次标定和优化程序可以减小这两项误差,获得更好的精度。

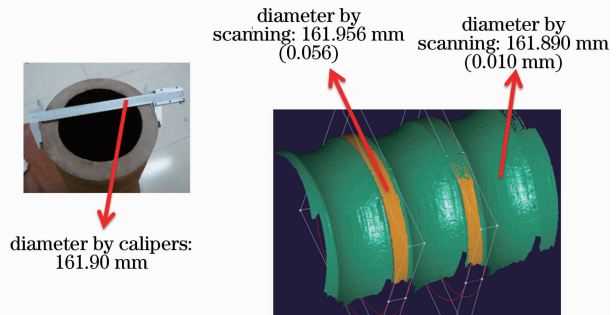


图 12 重建模型与实体零件尺寸的误差比较

Fig. 12 Measuring difference between 3D model and callipers

## 4 激光熔池温度场的机器视觉检测技术

尽管红外 CCD 相机检测温度场已获得成功应用,但是红外 CCD 相机价格昂贵,限制了它的推广。开发一种成本低、简单快捷、便于现场应用的激光熔池温度场检测技术成为当前该领域的重点。近年来位于可见光波段的彩色 CCD 相机发展日臻成熟,价格便宜,图像性能优良,国内外进行了许多彩色 CCD 相机检测温度场的研究<sup>[23,24]</sup>,主要基于比色测温 and 全灰度测温两种方案。用它检测激光熔池温度场具有如下优点:非接触测温;能快速地给出温度场 2D 分布图像;给出温度场分布的定量信息;体积小,重量轻。但是由于受材料表面发射率和检测波段敏感性较差的影响,彩色 CCD 温度检测的精度不太高。

### 4.1 CCD 测温原理

普朗克黑体辐射定律描述了黑体辐射的光谱分布,温度为  $T$  的单位面积元的绝对黑体,在半球面方向所辐射的波长为  $\lambda$  的辐射出射度  $M(\lambda, T)$  为

$$M(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp[C_2/(\lambda T)] - 1} \quad (5)$$

CCD 相机光谱响应曲线如图 13 所示,其中蓝(B)绿(G)两色具有较高的光谱响应。

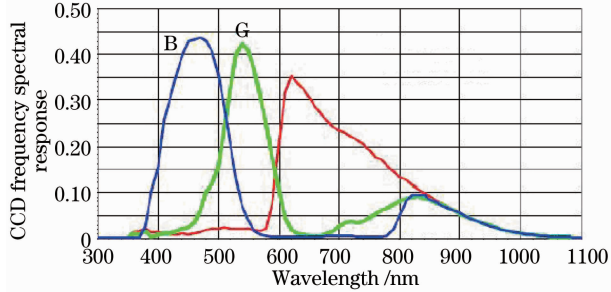


图 13 CCD 相机的光谱响应曲线

Fig. 13 CCD camera spectroscopy

选定 2 个波长进行比色,可推导出激光熔池热辐射表面的色温表达式为

$$T = \frac{C_2 \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}{\ln R_{12}(T) - \ln \frac{k(\lambda_1, T) \eta(\lambda_1, T) \lambda_2^5 \delta \lambda_1}{k(\lambda_2, T) \eta(\lambda_2, T) \lambda_1^5 \delta \lambda_2}} \quad (6)$$

令 CCD 相机因子  $F = n \frac{k(\lambda_1, T) \eta(\lambda_1, T) \lambda_2^5 \delta \lambda_1}{k(\lambda_2, T) \eta(\lambda_2, T) \lambda_1^5 \delta \lambda_2}$ 。在实际测温工作中,可以通过标准黑体辐射源标定得到 CCD 相机因子  $F$ ,由 CCD 拍摄的激光熔池热辐射图像,可提取其上各点的比色值  $R_{12}(T)$ 。依据(6)式可进行比色测温。

激光金属熔池的辐射特性接近余弦辐射体,经

过光学系统成像,激光熔池辐射到达 CCD 靶面形成的像面辐照度为

$$E'(\lambda, T) = \left( \frac{n'}{n} \right)^2 K \pi L(\lambda, T) \sin^2 U' \cos^4 \omega', \quad (7)$$

式中  $n$  和  $n'$  分别表示物像方介质的折射率; $K$  表示系统的透射率; $L(\lambda, T)$  表示物体的辐射亮度; $U'$  表示像方孔径角; $\omega'$  表示像方视场角。

CCD 采集激光熔池热辐射图像,经过光电转换后,就成了 CCD 的电荷量信号

$$Q(\lambda_0, T) = \int_{\lambda_0 - \frac{\delta \lambda}{2}}^{\lambda_0 + \frac{\delta \lambda}{2}} \kappa \eta(\lambda, T) E'(\lambda, T) A \tau d\lambda = \int_{\lambda_0 - \frac{\delta \lambda}{2}}^{\lambda_0 + \frac{\delta \lambda}{2}} \kappa A \tau \eta(\lambda, T) \left( \frac{n'}{n} \right)^2 K \pi L(\lambda, T) \sin^2 U' \cos^4 \omega d\lambda, \quad (8)$$

式中  $\eta(\lambda, T)$  为 CCD 的光谱响应; $A$  为 CCD 的光敏面面积; $\tau$  为曝光时间; $\kappa$  为量子效率; $\lambda_0$  和  $\delta \lambda$  分别是彩色 CCD 各像素点滤光片峰值响应波长和响应带宽。

CCD 电荷量信号被转换成标准视频信号输出,标准视频信号经过数据采集卡和计算机处理后,显示成灰度图像,表达式为

$$N(\lambda_0, T) = k(\lambda_0, T) Q(\lambda_0, T), \quad (9)$$

式中  $k(\lambda_0, T)$  为灰度转换系数。

在 CCD 相机前加装一个中心波长为  $\lambda_r = 650 \text{ nm}$  的窄带滤光片,带宽为  $10 \text{ nm}$ ,即  $645 \sim 655 \text{ nm}$ ,窄带滤光片取理想状态(在理想状态下,为一个冲击函数)。则在红色波长下 CCD 输出的灰度值为

$$H_i = \frac{1}{4} A_r \mu_r t_r \left( \frac{2a}{f} \right)^2 \frac{K \lambda_r \epsilon(\lambda, T) C_1}{\lambda_r^5 \exp[C_2/(\lambda_r T)]} T_r(\lambda), \quad (10)$$

当  $\epsilon(\lambda, T)$  即熔池的发射率受波长的影响较小时,可以假定  $\epsilon(\lambda, T)$  在计算过程中为  $T$  的应变变量,即  $\epsilon(T)$ 。则可以将(9)式转化为

$$T_r = \frac{C_2}{\lambda_r \left\{ \ln \left[ 0.25 A_r \mu_r t_r \left( \frac{2a}{f} \right)^2 K \lambda_r \epsilon(T_r) C_1 T(\lambda_r) \right] - \ln H_i \lambda_r^5 \right\}} \quad (11)$$

式中  $A_r \mu_r t_r K \lambda_r T(\lambda_r)$  可以由黑体炉标定得到,依据(11)式可进行全灰度测温。

### 4.2 激光机器人 CCD 温度检测视觉系统

该系统主要由 CCD 测温装置、计算机和专用测温软件等组成。CCD 测温装置装于机器人手臂末端,并与计算机相连,图 14(a)为激光机器人 CCD 温度检测视觉系统试验现场,图 14(b)为 CCD 测温装置。

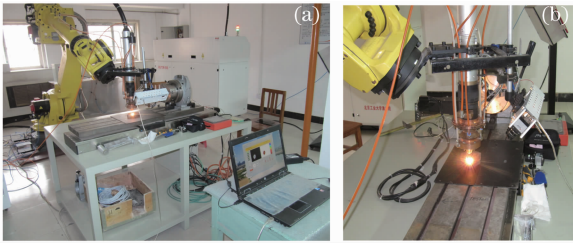


图 14 激光机器人 CCD 温度检测视觉系统

Fig. 14 CCD temperature vision in laser robot

CCD 相机: 高分辨率数字工业摄像机, 90 万像素, 1280 pixel×1024 pixel; 输出颜色 Bayer 彩色; 帧频率在分辨率 640 pixel×480 pixel 时为 45 frame/s; 可编程控制。开发环境 Win2000、XP、Vista。电子快门: 1/50 (OFF), 1/120, 1/250, 1/500, 1/1000, 1/2000, 1/4000, 1/10000 可选择; 视频输出。光学系统: CCTV LENS 镜头: 1/3", 6.0 ~ 60 mm F1.4, CS 接口; 焦距 6 ~ 60 mm; 中性衰减片, 透射率为 1.6%。

计算机: 与三维模型重建系统共用的移动式图形工作站 HP 8530。

### 4.3 CCD 相机温度标定

采用中国计量科学研究院黑体辐射源进行 CCD 相机测温标<sup>[25]</sup>。根据激光熔池温度场的温度分布特性, 确定标定温度范围为 600 °C ~ 1400 °C。图 15 为 CCD 拍摄到的标准黑体辐射源靶面的热辐射

射图像。随着温度升高, 图像也变得越来越明亮, 表明温度升高时, 热辐射也增强。

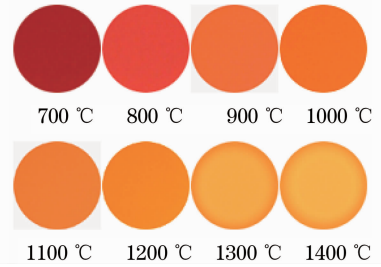


图 15 CCD 拍摄到的黑体辐射源靶面的热辐射图像  
Fig. 15 Thermal pattern of blackbody radiation sources target surface by CCD camera

由试验结果建立热辐射图像比色值与温度  $T$  的关系曲线, 采用最小二乘法对实验数据进行了拟合, 得到的拟合公式为

$$T = \frac{3.7193 \times 10^3}{0.6409R_{12}^2 - 4.7888R_{12} + 12.4191 - \ln R_{12}} \quad (12)$$

### 4.4 CCD 测温图像处理专用软件

以 LabVIEW 为开发环境, 图形工作站计算机为应用平台, 开发出 CCD 温度场实时检测专用软件<sup>[26,27]</sup>。该软件包括 4 个功能模块: 图像处理、温度计算、温度场 2D 分布及温度场数值显示。图 16 为处理流程图。

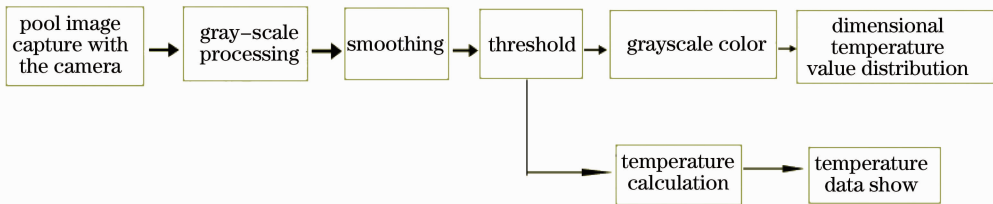


图 16 CCD 温度场实时检测专用软件处理流程图

Fig. 16 Software flow of temperature measurement by CCD

### 4.5 温度场检测计算机视觉显示界面

图 17 为激光熔池温度场 CCD 温度检测视觉系统处理结果, 图 17(a) 是 CCD 采集的激光熔池温度场热辐射图像, 图 17(b) 是经专用软件处理后温度场伪彩色分布云图。

在 CCD 相机测温时, 图形工作站计算机屏幕上可实时显示 CCD 采集的激光熔池温度场热辐射图像 2D 分布和专用软件处理后温度场内各点的数值, 图 18 是计算机显示界面。

试验发现, CCD 测温范围 700 °C ~ 1400 °C, 可以外延到 2500 °C, 温度分辨率为 50 °C。

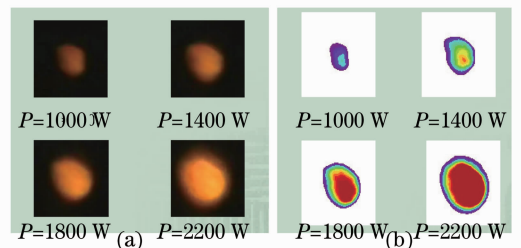


图 17 激光熔池温度场 CCD 温度检测视觉系统处理结果

Fig. 17 Temperature vision by CCD in laser melt pool



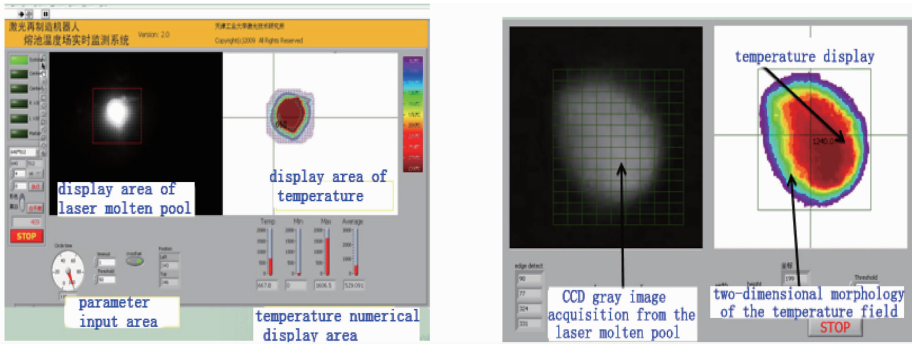


图 18 CCD 测温计算机实时显示界面

Fig. 18 Computer display interface of temperature vision by CCD in laser molten pool

## 5 激光机器人粉末流浓度场机器视觉技术

激光同轴送粉中金属粉末流输出过程十分复杂,浓度场的分布直接影响激光同轴熔覆质量,国内外曾采用多种方法进行检测<sup>[28~30]</sup>。但这些方法的具有如下缺点:只能获得空间单点或多点信息,粒子图像所含信息仅能用于粉末流浓度场的观测,不能实现粉末流浓度场和速度场的计算重建。在早期工作中,采用 Nd<sup>+</sup>:YAG 双脉冲激光器作为照明光源,开发了一种数字粒子图像测速技术(DPIV)检测系统,能实现粉末流的浓度场和速度场的重建<sup>[31,32]</sup>。但是这套系统体积大,成本高,不能与机器人耦合。近年来又开发了一套小型化的激光同轴送粉粉末流浓度场机器视觉系统<sup>[33]</sup>,体积小,重量轻,便于与机器人耦合;检测速度快,非接触测量;能实时给出粉末流的聚焦参数和三维空间分布。

### 5.1 检测原理

激光同轴送粉粉末流浓度场机器视觉系统检测金属粉末流浓度场主要依据 DPIV 原理,如图 19 所示。具有二维片光源的高亮度半导体激光器发出的激光照亮由同轴送粉嘴输出的金属粉末,在粉末被照亮的时候,由高速跨帧 CMOS 相机拍得金属粉末流照片,拍得的照片经过数字图像处理卡输入到计算机,由专用软件进行处理。

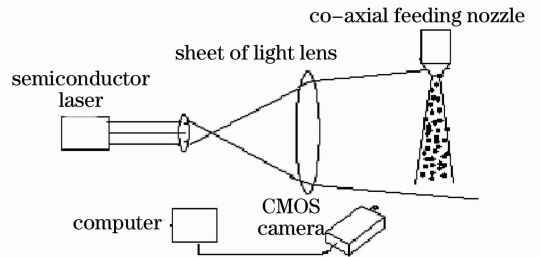


图 19 粉末流浓度场 DPIV 检测原理图

Fig. 19 DPIV measurement of powder stream concentration

采用图像处理方法和自相关算法,进行粉末流浓度场的重建方法如图 20 所示。

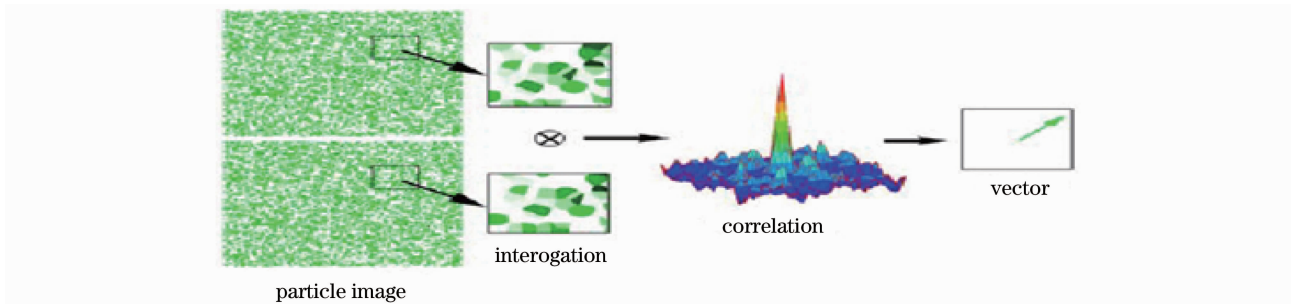


图 20 自相关算法重建粉末流浓度场

Fig. 20 Reconstruction of powder stream concentration field

### 5.2 系统组成

激光机器人粉末流浓度场机器视觉系统如图 21(a)所示,由具有二维片光源的高亮度半导体激光器、高速 CMOS 相机、激光同轴送粉装置、高性

能计算机和浓度场机器视觉专用软件组成。

半导体激光器:波长 532 nm,输出功率 100 mW,光斑模式 TEM<sub>00</sub>,连续工作模式,片光厚度约 1 mm。  
CMOS 相机:工业型,100 万像素,分辨率 1024 pixel×



1024 pixel;帧频在分辨率 1024 pixel×1024 pixel 时为 35 frame/s;可编程控制;开发环境 Win2000、XP、Vista。计算机:与三维模型重建系统共用的移动式图形工作站 HP 8530。

激光同轴送粉工作头装于机器人末端上,半导体激光器和 CMOS 相机置于激光同轴送粉工作头下方,图 21(b)为检测装置局部放大图,可清楚显示粉末流图像。

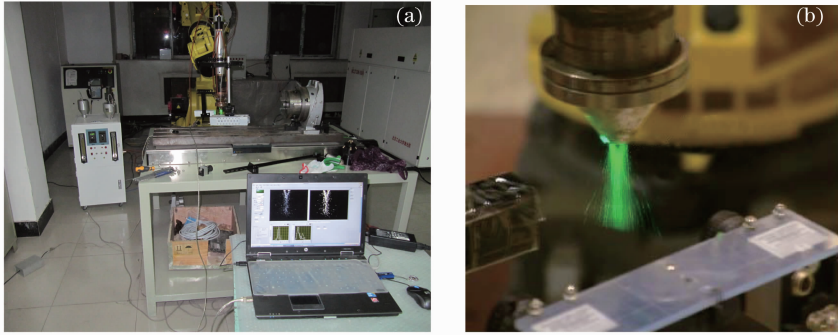


图 21 激光机器人粉末流浓度场机器视觉系统

Fig. 21 Machine vision of powder stream concentration field in laser robot

### 5.3 浓度场机器视觉专用软件开发

软件功能结构如图 22 所示。图像处理系统包括图像采集、数据处理、图像处理、浓度场显示等几部分。

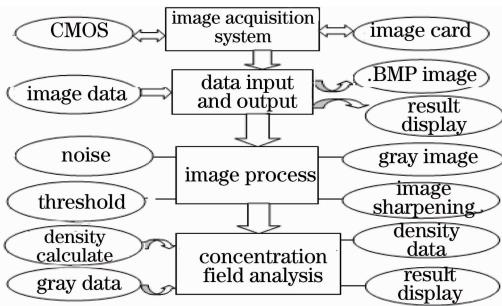


图 22 软件功能结构

Fig. 22 Software constructure of machine vision of powder stream concentration field

### 5.4 浓度场检测计算机视觉显示界面

该软件是激光机器人加工的浓度检测专业软件,界面设计应该简化操作。这个界面包涵了所有图片及其处理结果,界面由图像采集区、参数选择区、去噪算子区、阈值分割区、图像预处理区、结果显示区 6 块区域组成。粉末流浓度场在计算机屏幕上视觉显示界面如图 23 所示。

### 5.5 浓度场检测试验

图 24 为粉末流浓度场机器视觉检测结果对比,图 24(a)为 CMOS 相机直接拍摄的粉末流图像,仅能模糊地显示粉末流形貌,不能分辨粉末粒子。图 24(b),(c)为采用本浓度场检测计算机视觉拍摄处理后的粉末流图像,不仅能清楚地分辨粉末粒子,而且可以清楚地显示粉末流浓度分布形貌,明显地显现了 3 个粉流区:环状区、焦柱区和锥状发散区。

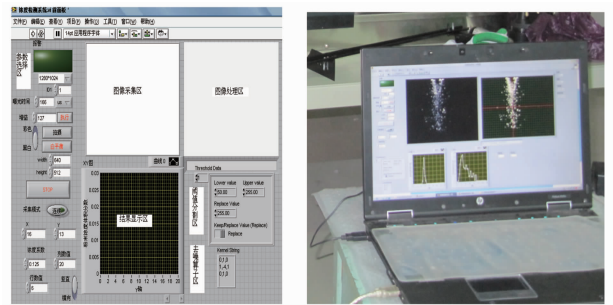


图 23 系统运行界面

Fig. 23 Computer display interface of powder stream concentration field

粉末流浓度从粉嘴出口到焦点由零逐渐增大,一直到焦柱粉流区,金属粉末浓度达到最大,之后随着粉末流的发散,金属粉末流浓度逐渐降低。测得粉末流几何参数:上发散角 5°,下发散角 15°,上焦点 9.11 mm,下焦点 12.38 mm。

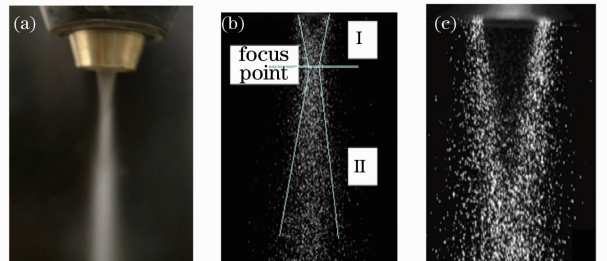


图 24 粉末流浓度场机器视觉检测结果

Fig. 24 Comparison of powder stream images between before and after software processing

图 25 为不同送粉参数(送粉量、气流速度)下激光机器人粉末流浓度场机器视觉检测结果。可以清楚看到送粉量、气体流速等参数的影响。

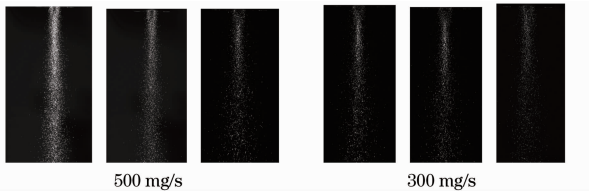


图 25 送粉参数对粉末流浓度场的影响

Fig. 25 Powder stream images under different parameters

## 6 结 论

1) 研制了基于 CCD/CMOS 光电视觉技术的激光再制造机器人 3 种机器视觉系统,性能指标分别为:三维形貌机器视觉系统—能重建工件 3D 形貌,单道最大扫描宽度 200 mm。普通扫描速度 10~50 mm/s,最大误差小于 1 mm;高精度扫描速度 1 mm/s,最大误差小于 0.1 mm。温度场机器视觉系统—能检测熔池温度场分布形貌,测温范围 700 ℃~2400 ℃,精度 50 ℃。粉末流场机器视觉系统—可检测粉末流形貌、参数,粉末流量检测范围 1~100 g/min。

2) 3 种系统都能给出清晰的可视化视觉图像,并能做数值评定。

3) 3 种系统都能在线实时检测,测得的温度、粉末流量、3D 模型位于机器人坐标系。

4) 3 种系统体积小,都能方便地与机器人安装、耦合。

5) 成本低,便于推广应用。

应该指出,激光加工机器人机器视觉技术研究在国内外刚刚起步,无论检测原理、检测器件和图像处理软件技术都在发展之中,本项工作还存在许多不足,需要不断完善,以不断实现产品化。

## 参 考 文 献

- 1 Yang Xichen. Laser processing robot and its industrial applications[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2780~2798  
杨洗陈. 激光加工机器人技术及工业应用[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2780~2798
- 2 Zhao Chen, Wang Gang. Research report of industrial robot developing in China[J]. *Robot Technique and Application*, 2009, (2): 8~13  
赵 臣, 王 刚. 我国工业机器人产业发展的现状调研报告[J]. *机器人技术与应用*, 2009, (2): 8~13
- 3 Gu Zhenyu. Industrial robots: global actualities and trends[J]. *Mechatronics*, 2006, (2): 6~10  
顾震宇. 全球工业机器人产业现状与趋势[J]. *机电一体化*, 2006, (2): 6~10
- 4 G. J. Xu, M. Kutsuna. Cladding with stellite 6+WC using a YAG laser robot system [J]. *Surf. Engng.*, 2006, **22**(5): 345~352
- 5 Yang Xichen. Laser remanufacturing robot [C]. Quanzhou: Session; Laser Manufacturing and Its Industrial Application

- 08OC11\_005, Chinese Optical Society' 2008 Symposium, 2008  
杨洗陈. 激光再制造机器人[C]. 泉州:中国光学学会 2008 年学术年会,激光制造技术及产业化专题,2008
- 6 A. Gasser, G. Backes. Laser beam repairs engine components [C]. LIA Connection E-News, July, 2009
- 7 S. Nowotny, S. Scharek, A. Schmidt. Advanced laser technology applied to cladding and buildup [J]. *Weld. J.*, 2007, **86**(5): 48~52
- 8 Gapontsev. Industrial high power fiber laser systems [C]. Dresden: Proceedings of the 2nd International Workshop on Fiber Lasers, 2006
- 9 E. Stiles, E. Hensel. Combination machine for laser hardening and cladding [C]. *Laser Applications International*, 2006, 13~15
- 10 K. H. Richter, S. Orban, S. Nowotny. Laser cladding of the titanium alloy Ti6242 to restore damaged blades [C]. San Francisco: Proceedings of the 23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, 2004
- 11 A. Groth, C. Walz, S. Naegeler. New innovations in diode laser cladding [C]. San Francisco: Proceedings of the 23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, 2004
- 12 Zhang Guangjun. Vision Measurement [M]. Beijing: Science Press, 2008. 134  
张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 134
- 13 Gao Chunfu, Tang Kehong, Hu Qingyu *et al.*. Stereo vision matching for posture recognition of manipulator[J]. *Optics and Precision Engineer*, 2010, **18**(2): 464~469  
高春甫, 唐可洪, 胡庆玉等. 机械手姿态识别的立体视觉匹配[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(2): 464~469
- 14 Yang Xichen, Liu Lifeng, Zhang Haiming *et al.*. A laser remanufacturing pobot system [P]. China Patent, CN201020253984.1 2011-01-26  
杨洗陈, 刘立峰, 张海明等. 一种激光再制造机器人系统 [P]. 中国专利, CN201020253984.1 2011-01-26
- 15 Yang Xichen, Zhang Haiming, Gao Gui. A 3D Stereo Vision Measurment Setup of Parts on Line for Laser Remanufacturing Robot [P]. China Patents, CN201020199922.7  
杨洗陈, 张海明, 高 贵. 一种激光再制造零件三维形貌在线检测装置 [P]. 中国专利, CN201020199922.7
- 16 Zhang Haiming, Yang Xichen, Dou Yihong. Visual servo in laser remanufacturing robot [C]. Wuhan: 2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering (MACE2010), 2010, 3883~3886
- 17 Zhang Haiming, Yang Xichen, Dou Yihong. An automatic stereo calibration method in laser remanufacturing robot [C]. Shanghai: 2010 Second International Conference on Future Computer and Communication (FCC2010 of IEEE), 2010, 28~29
- 18 Gao Gui, Yang Xichen, Zhang Haiming. Study of binocular vision system calibration in laser remanufacturing robot [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1868~1872  
高 贵, 杨洗陈, 张海明. 激光再制造机器人双目视觉系统标定研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1868~1872
- 19 Sun Jin, Li Yaoming. Development in key technologies of reverse engineering [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2007, **43**(1): 5~7  
孙 进, 李耀明. 逆向工程的关键技术及其研究 [J]. *航空精密制造技术*, 2007, **43**(1): 5~7
- 20 Chen Tao. Segmentation and Regular Surfaces Fitting in Reverse Engineering [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004  
陈 涛. 逆向工程中数据分块和规则曲面拟合算法的研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004
- 21 Zheng Shangwen. Research of Reconstruction of Curve and Surface in Reverse Engineering [D]. Nanjing: Southeast

- University, 2004
- 郑尚文. 逆向工程中曲线和曲面重构的研究 [C]. 南京: 东南大学, 2004
- 22 Zhang Haiming, Yang Xichen, Gao Gui. 3D reconstruction of parts to be processed by laser remanufacturing robot [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2937~2944
- 张海明, 杨洗陈, 高 贵. 激光再制造机器人待加工零件形貌三维重建[J]. 中国激光, 2010, **37**(11): 2937~2944
- 23 Jehming Lin. Temperature analysis of the powder streams in coaxial laser cladding [J]. *Opt. Laser Technol.*, 1999, **31**(8): 565~570
- 24 Xi Mingzhe, Yu Gang, Zhang Yongzhong *et al.*. Interaction of the laser beam and the metal powder conveyed by coaxial powder feeder[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4): 562~566
- 席明哲, 虞 钢, 张永忠 等. 同轴送粉激光成形中粉末与激光的相互作用[J]. 中国激光, 2005, **32**(4): 562~566
- 25 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**(s1): 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[J]. 中国激光, 2007, **34**(s1): 354~356
- 26 Chen Juan, Yang Xichen, Lei Jianbo. Application of digital image processing to measurement system of temperature field in molten pool for laser remanufacturing[J]. *Applied Laser*, 2006, **26**(4): 220~222, 256
- 陈 娟, 杨洗陈, 雷剑波. 数字图像处理在激光再造熔池温度场检测中的应用[J]. 应用激光, 2006, **26**(4): 220~222, 256
- 27 Yang Nan, Yang Xichen. Model of interaction between metal powder particle and laser beam in laser cladding[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1745~1750
- 杨 楠, 杨洗陈. 激光熔覆中金属粉末粒子与激光相互作用模型[J]. 光学学报, 2008, **28**(9): 1745~1750
- 28 Y. D. Thakar, H. Pan, F. Liou *et al.*. Numerical and experimental analysis of the powder flow streams in the laser aided material deposition process [C]. Austin: Proceeding of the 15th Conference on Solid Freeform Fabrication, 2004: 512~522
- 29 H. Pan, Y. D. Thakar, F. Liou. Numerical and experimental study of shielding gas orientation effects on particle stream concentration mode in coaxial laser aided material deposition process [C]. Utah: ASME International Design Engineering Technical Conferences: 21~27
- 30 G. Buresi, A. Talamelli, P. Petagna. Experimental characterization of the velocity field of a coaxial jet configuration [J]. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 1994, **9**(2): 135~146
- 31 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
- 32 Yang Xichen, Li Huishan, Lei Jianbo *et al.*. DPIV method of measurement of powder stream of co-axial feeding for laser manufacturing [C]. *SPIE*, 2004, **5629**: 93~102
- 33 Chen Xiuping, Yang Xichen. Detection of powder stream concentration field in robot laser remanufacturing[J]. *Chinese J. Laser*, 2010, **37**(3): 842~846
- 陈修平, 杨洗陈. 机器人激光再制造中粉末流浓度场的检测[J]. 中国激光, 2010, **37**(3): 842~846