

柔性再制造修复系统及标定技术^{*}

吴 翔¹, 马 孜¹, 徐富家², 胡 英¹

(1. 大连海事大学 自动化研究中心, 大连 116026; 2. 装甲兵工程学院 再制造技术重点实验室, 北京 100072)

摘 要:介绍了一种柔性再制造修复系统原型,利用基于立体视觉技术与结构光技术的手持式扫描仪和基于 6 自由度机器人技术的焊接修复机器人,搭建系统工作平台。介绍了现场两步法标定步骤,通过至少 3 个不同姿态和辅助平面来标定焊枪位姿。利用扫描过程中使用的定位标记点的固定特性完成了扫描系统坐标系与焊枪修复机器人坐标系之间的标定。在标定完毕的系统上,对 A3 钢板进行等离子焊接修复,得到其多层多道的快速修复成形表面平整度低于 0.5 mm,从而验证了系统的可靠性和有效性。

关键词:再制造修复; 破损检测; 系统标定; 焊枪标定

中图分类号: TP31; TH17

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2011)04-0080-05

Calibration of the Flexible Remanufacturing Restoration System

WU Xiang¹, MA Zi¹, XU Fu-jia², HU Ying¹

(1. Automation Research Center, Dalian Maritime University, Dalian 116026; 2. Science and Technology on Remanufacturing Laboratory, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072)

Abstract: A prototype of flexible remanufacturing restoration system which based on the machine vision and 6-DOF robot technology is introduced. Two-step calibration procedure on site is described. The position and posture of the gun are calibrated by at least three different attitudes and auxiliary planes. The calibration between scan system and repair welding robot coordinate system is completed, taking advantage of the anchor point characteristics in scanning process. Using the calibrated systems, plasma welding repair is proceeded in A3 steel plate. The roughness of the multi-channel quick forming surface is less than 0.5 mm, which verifies the reliability and validity of the calibration system.

Key words: remanufacturing restoration; 3D inspection; system calibration; welding torch calibration

0 引 言

再制造技术是采用高新表面工程技术,快速成型技术等先进制造技术,使损伤或报废零部件迅速恢复其原有尺寸,并恢复或超过其原有技术性能的一项技术^[1]。在再制造加工现场,针对破损工件的修复任务,需要实现两个必要步骤:一是对工件破损部位的检测。要求能够得到破损的位置与大小等信息;二是对工件破损部位的修复。要求不仅能够处理大批量任务而且能够根据不同需求实现柔性加工。现代化的再制造修复应实现过程的快速、稳定、自动化。

基于立体视觉^[2]与结构光检测技术^[3]的手持式扫描设备具有灵活、快速、采集信息量大、无

须规划扫描路径等优点,适合加工现场针对不同工件与不同破损的三维扫描检测。基于六自由度的焊接机器人更是在柔性加工制造中得到了重要应用^[4,5]。因此,综合两种技术,开发针对再制造加工现场的再制造修复系统,将实物表面数字化技术应用于再制造加工过程中,快速获得能反映零件的缺损状况大量测量数据,并据此自动规划焊接机器人修复路径,是实现缺损零件的自动化、智能化修复的可行方案。

1 系统结构

1.1 系统组成

系统的硬件设备主要包括:手持式三维扫描仪,KUKA 六自由度机器人,PAW 焊机以及主控计算机。手持式扫描仪通过 1394 线与主控计算机相连,KUKA 机器人控制柜通过以太网方式与计算机通信。系统的结构图如图 1 所示:

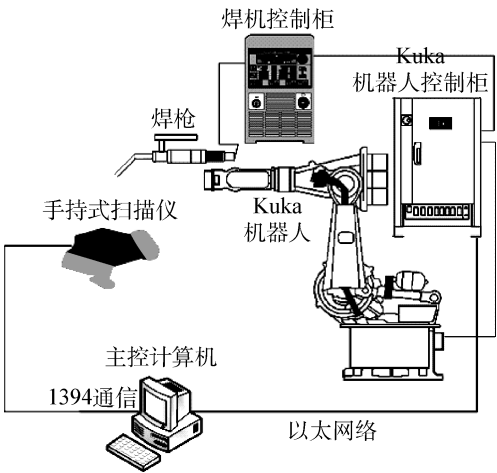


图 1 再制造修复系统结构图

Fig. 1 Architecture of the remanufacturing restoration system

1.2 工作流程

柔性再制造修复系统适用于作业现场进行快速、自动的破损工件修复。首先,手持式三维扫描仪能够灵活地对工件的破损部位进行扫描,其数字化信息很好的完成了破损的描述与定位。基于点云信息的扫描数据经过平滑、重构、切片等处理^[6,7],生成修复机器人能够执行的工作路径,同时配以不同的工艺参数,在仿真路径通过,确保修复的准确与安全后,即可完成整体再制造修复任务。其工作流程如图 2 所示。

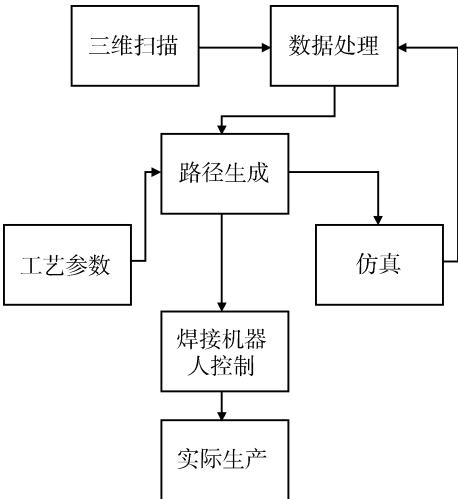


图 2 再制造修复系统工作流程

Fig. 2 Working flow of the remanufacturing restoration system

2 系统标定

再制造修复系统的标定可以分成三个部分,扫描仪标定,焊枪标定,以及扫描坐标系和焊接修复机器人坐标系关系标定。其中的扫描仪标定是扫描仪工作的基础,由成产厂家负责配置,在文中研究的系统中,使用一台能够正常工作的扫描仪,则此环节可以忽略。工艺的不同要求需要焊接机器人更换不同的焊枪,为了准确定位修复过程中焊接机器人工作位姿,焊枪安装后需要进行末端的准确标定。另外,扫描数据的坐标关系是基于三维手持式扫描仪的自有坐标系,应用此数据进行处理,自动生成焊接机器人修复路径,则需要标定其自有坐标系与机器人基坐标系之间的关系,通过坐标的变换,生成焊接机器人能够直接工作的修复路径。

2.1 焊枪标定

2.1.1 位置标定

由焊枪和六自由度工业机器人组成的弧焊机器人如图 3 所示,其中 $o_0x_0y_0z_0$ 为机器人基坐标系, $o_6x_6y_6z_6$ 为机器人末端坐标系。

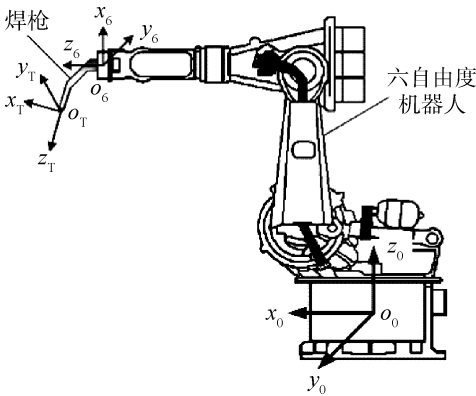


图 3 弧焊机器人坐标系

Fig. 3 Coordinate system of the welding robot

建立如图 3 所示的工具坐标系 $o_tx_ty_tz_t$,工具坐标系的原点 o_t 位于焊枪的枪尖, o_tz_t 轴为焊枪指向的方向。工具坐标系的标定就是确定坐标系 $o_tx_ty_tz_t$ 到 $o_6x_6y_6z_6$ 的齐次变换矩阵 6_TT :

$${}^6_TT = \begin{bmatrix} {}^6_RR & {}^6_Tt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

在机器人工作空间中放置一个椎体,并保持其位置不变。在示教模式下,操作机器人的六个关节,使枪尖在至少三个不同的姿态接触椎体的顶点,如图 4 所示。记录机器人末端的位姿 $(x_i, y_i, z_i, A_i, B_i, C_i)$,其中 (x, y, z) 是机器人末端坐标系原点在基坐标系下的位置, (A, B, C) 是欧拉角表示的末端坐标系与基坐标系的旋转变换。



图 4 焊枪坐标系位置标定

Fig. 4 Position calibration of the welding torch

设坐标系 $o_6x_6y_6z_6$ 到 $o_0x_0y_0z_0$ 的齐次变换矩阵为 0_6T ,坐标系 $o_Tx_Ty_Tz_T$ 到 $o_0x_0y_0z_0$ 的变换矩阵为 0_TT ,写成矩阵形式分别为:

$${}^0_6T_i = \begin{bmatrix} n_{ix} & o_{ix} & a_{ix} & p_{ix} \\ n_{iy} & o_{iy} & a_{iy} & p_{iy} \\ n_{iz} & o_{iz} & a_{iz} & p_{iz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$${}^0_TT_i = \begin{bmatrix} l_{ix} & d_{ix} & r_{ix} & q_{ix} \\ l_{iy} & d_{iy} & r_{iy} & q_{iy} \\ l_{iz} & d_{iz} & r_{iz} & q_{iz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

0_TT_i 表示第 i 步时,坐标系 $o_6x_6y_6z_6$ 到 $o_0x_0y_0z_0$ 的变换矩阵,可以由机器人末端位姿 $(x_i, y_i, z_i, A_i, B_i, C_i)$ 计算得到,其推导过程如下。

$${}^0_TT = \begin{bmatrix} {}^0_6R & {}^0_6T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中

$${}^0_6R = \exp \left[\begin{bmatrix} 0 & C_i & -B_i \\ -C_i & 0 & A_i \\ B_i & -A_i & 0 \end{bmatrix} \right]$$

$${}^0_6T = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

6_TT 写成矩阵形式为:

$${}^6_TT = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & t_x \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & t_y \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

焊枪与机器人末端为刚性连接,所以 6_TT 为常数,其中 ${}^6_Tt = [t_x, t_y, t_z]$ 是待求参数。由坐标系的关系可知 ${}^0_TT_i \times {}^6_TT = {}^0_TT_i$,写成矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} n_{ix} & o_{ix} & a_{ix} & p_{ix} \\ n_{iy} & o_{iy} & a_{iy} & p_{iy} \\ n_{iz} & o_{iz} & a_{iz} & p_{iz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & t_x \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & t_y \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{ix} & d_{ix} & r_{ix} & q_{ix} \\ l_{iy} & d_{iy} & r_{iy} & q_{iy} \\ l_{iz} & d_{iz} & r_{iz} & q_{iz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

由分块矩阵计算可得:

$$\begin{bmatrix} n_{ix} & o_{ix} & a_{ix} \\ n_{iy} & o_{iy} & a_{iy} \\ n_{iz} & o_{iz} & a_{iz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_{ix} \\ p_{iy} \\ p_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{ix} \\ q_{iy} \\ q_{iz} \end{bmatrix} \quad (7)$$

由于椎体顶点在机器人基坐标系 $o_0x_0y_0z_0$ 下为固定点,所以 q_i 为固定值,有:

$$q = q_i = [q_x \quad q_y \quad q_z]^T \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} n_{ix} & o_{ix} & a_{ix} \\ n_{iy} & o_{iy} & a_{iy} \\ n_{iz} & o_{iz} & a_{iz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_{ix} \\ p_{iy} \\ p_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} \quad (9)$$

即:

$${}^0_6R_i {}^6_Tt + {}^0_6p_i = q \quad (10)$$

将(8)式中的 i 个等式相减,可以消去 q 得:

$$({}^0_6R_{i+1} - {}^0_6R_i) {}^6_Tt = {}^0_6p_i - {}^0_6p_{i+1} \quad (11)$$

其中 0_6R_i 和 0_6t_i 是已知数。写成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} {}^0_6R_2 - {}^0_6R_1 \\ {}^0_6R_3 - {}^0_6R_1 \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^0_6p_1 - {}^0_6p_2 \\ {}^0_6p_1 - {}^0_6p_3 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (12)$$

对于形如 $Ax = B$ 的超限定方程,可以通过计算矩阵 A 的广义逆求解 x 在最小二乘意义下的最优解。

2.1.2 姿态标定

在图 5 建立的工具坐标系 $o_T x_T y_T z_T$ 中, $o_T z_T$ 轴正方向是枪尖指向的方向。确定坐标系 $o_T x_T y_T z_T$ 到 $o_6 x_6 y_6 z_6$ 的旋转关系即可确定枪尖的姿态。

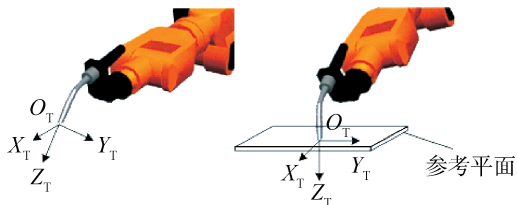


图 5 焊枪坐标系姿态标定

Fig. 5 Posture calibration of the welding torch

在工作台上选择一个平行于机器人基坐标系的 $o_0 x_0 y_0$ 平面的参考平面,调整焊枪垂直于参考平面,如图 5 所示。此时,坐标系 $o_T x_T y_T z_T$ 与 $o_0 x_0 y_0 z_0$ 的旋转关系已知,可以认为是沿 $o_0 x_0$ 轴或 $o_0 y_0$ 轴旋转 180 度得到。如果沿 $o_0 x_0$ 轴旋转,欧拉角是 $(180, 0, 0)$,对应的旋转矩阵 ${}^0_T R$ 为:

$${}^0_T R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

由上式的分块矩阵可得:

$${}^0_6 R {}^6_T R = {}^0_T R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中 ${}^0_6 R$ 已知, ${}^6_T R$ 可以得到精确解。

2.2 坐标系标定

在欧氏空间中,标定两个坐标系关系的典型方案是空间中放置 3 个以上的固定点,分别测量固定点在两个坐标系中坐标,通过解方程组得到两个坐标之间的变换矩阵。手持式扫描仪作为一种独立的三维型面检测设备,其得到的扫描数据是基于扫描仪测量坐标系下的数据。一般情况下,扫描仪是根据最初获得的标记点建立测量坐标系,因此,每次任务都需要计算测量坐标系到修复坐标系的变换矩阵。标定二者关系时,择部分带有中心标识的标记点固定在工作台上(图 6)。

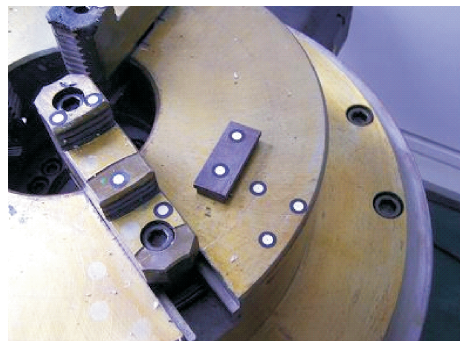


图 6 工作台上的固定标记点

Fig. 6 The marked circles on the table

这些特殊的标志固定在工作台上,可以通过焊枪得到标记点中心在修复机器人基坐标系下的坐标,而且这些坐标在机器人基坐标系是固定不变的。设在测量坐标系下标记点的坐标为拟合球心为 $(p_1, p_2, p_3, p_4, p_5)$ 。在弧焊机器人坐标系下标记点的中心坐标为 $(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5)$ 。设测量坐标系 $o_m x_m y_m z_m$ 到修复坐标系 $o_r x_r y_r z_r$ 的旋转平移矩阵分别为:

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}, \quad t = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (15)$$

则有

$$\begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{ix} \\ p_{iy} \\ p_{iz} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{ix} \\ q_{iy} \\ q_{iz} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

根据旋转矩阵正交性,列向量为单位向量并且互相垂直,有如下等式:

$$\begin{cases} r_1^2 + r_4^2 + r_7^2 = 1 \\ r_2^2 + r_5^2 + r_8^2 = 1 \\ r_3^2 + r_6^2 + r_9^2 = 1 \end{cases} \quad (17)$$

结合上式,可以得到 R 和 t 在最小二乘意义下的最优解。

3 修复实验

为了验证系统的可靠性和有效性,搭建了系统的实验平台。选用 KR5 ARC 型六轴 KUKA 工业机器人、福尼斯 MagicWave-4000 型号 PAW 焊接电源,能够实现直流、直流脉冲、交流等多种等离子焊接工艺。实验基板选择 A3 钢板,表 1 为

采用的等离子焊接修复工艺参数。

表 1 脉冲等离子焊接修复工艺参数

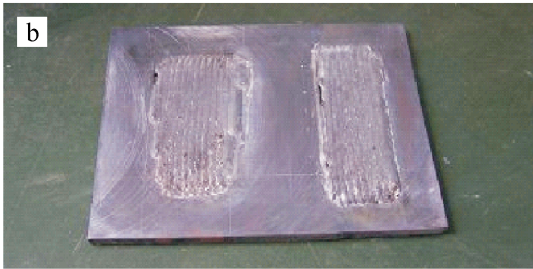
Table 1 Processing parameters of the repair by pulsed PAW

参数名称	参数值
离子气流量/(L·min ⁻¹)	0.5
保护气流量/(L·min ⁻¹)	12
峰值电流 I_P /A	230
基值电流 I_b /A	50% I_P
占空比	50%
焊接速度/(m·min ⁻¹)	0.2
送丝速度/(m·min ⁻¹)	1.1
成形轨迹中心间距 L /mm	5
层间高度 h /mm	0.9
搭接率	0.315

在目标钢板上铣出两个不同大小和深度的槽应用三维扫描手段将槽破损的物理信息转化为数据信息，在已标定完毕的系统基础上，通过分层规划算法，自动生成焊接路径进行焊接修复。实验钢板与修复结果如图 7 所示。其多层多道的快速修复成形表面平整度低于 0.5 mm。



(a) 修复试验前



(b) 修复试验后

图 7 修复试验前后的钢板比较

Fig. 7 Comparing of the steel plat before and after restoration

4 结 论

(1) 介绍了一种柔性再制造修复系统，其综合了三维视觉检测、6 自由度焊接机器人等多种技术，能够满足加工现场对破损工件的快速检测与自动修复。

(2) 焊枪的位姿的精确标定决定了焊接修复机器人能够准确到达规划的位置，执行修复路径。文中介绍了一种操作简单的现场两步法标定步骤，通过至少 3 个姿态来确定焊枪末端位置，通过辅助平面来确定焊枪姿态。

(3) 扫描系统坐标系与焊接修复机器人坐标系之间关系的确定，是准确定位破损信息的基础。文中利用扫描过程中使用的定位标记点的固定特性，完成了双坐标系之间的标定。

参考文献

[1] Xu B S, Zhang W, Liu S C. Remanufacturing technology for the 21th century [C]. The 15th European maintenance conference, 2000, Sweden: 335-339.

[2] 游素亚, 徐光祐. 立体视觉研究的现状与进展 [J]. 中国图像图形学报, 1997, 2(1): 17-24.

[3] Zi M, Huipu X, Ying H, et al. A novel robot surface measurement system enhanced with 3D surface reconstruction [J]. International Journal of Modeling, Identification and Control, 2008, 4(3): 286-298.

[4] 崔培枝, 朱胜, 姚巨坤. 柔性再制造系统研究 [J]. 机械制造, 2003, 41: 7-9.

[5] 史耀武. 成形焊接快速零件制造技术的发展 [J]. 中国机械工程, 1994(06).

[6] 刘斌, 黄树槐. 快速原型制造技术中实时切片算法的研究与实现 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 1997, 9(6): 488-493.

[7] 邹万红. 大规模点云模型几何造型技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007.

作者地址: 辽宁省大连市凌海路 1 号 116026
Tel: (0411) 8472 5190
E-mail: xiangwu@dlmu.edu.cn