

机器人三维可视化离线编程和仿真系统

唐新华¹, Paul Drews²

(1. 上海交通大学 材料科学与工程学院, 上海 200030; 2. 德国亚琛工业大学, Aachen 52074)

摘 要: 提出了一种基于 PC 的交互式三维可视化离线编程和动态仿真系统。利用目前流行的 PC 机和 Windows 操作系统所支持的 OpenGL 三维图形功能, 在系统中实现了焊接机器人及其工件的三维几何建模和机器人运动学建模, 并研究了机器人运动轨迹的自动规划和编程以及它的图形化三维动态仿真。采用交互式三维“虚拟示教”方式实现了机器人单道焊接路径的规划和编程, 对多层多道焊, 则通过采用“宏”技术实现机器人焊接运动轨迹的自动规划和编程, 通过图形化三维动态仿真实现了对机器人程序及运动轨迹的可靠性和安全性验证。离线编制的程序在向机器人控制系统传送的过程中实现了向机器人语言的自动转换, 从而使机器人离线编程的实用性得到大大提高。

关键词: 机器人; 离线编程; 三维可视化; 动态仿真; 虚拟示教; 多层多道焊

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2005)02-64-05



唐新华

0 序 言

机器人在现代工业制造过程中的应用日趋广泛, 它的使用效率和经济性在很大程度上决定于它的编程方法。目前多数机器人仍然采用传统的在线示教法编程。这对一些中小型企业来说, 由于他们的产品寿命周期短、生产任务更迭快而导致的频繁编程占去了机器人大量的有效工作时间, 从而大大降低了它的使用效率, 无法体现其优越性。而且机器人运动轨迹的精度, 在没有视觉传感器跟踪的情况下, 基本上依赖于操作者在示教时的耐心细致和目测精度。随着机器人应用到中小批量生产以及所完成任务复杂程度的增加, 这种示教编程方式已很难满足生产要求。解决此问题的有效途径之一, 就是采用离线编程, 把机器人从在线编程中解放出来, 从而提高其使用效率和生产过程的自动化水平, 降低成本^[1]。

1 机器人的离线编程和三维图形动态仿真

离线编程是指机器人应用程序的编制通过外部独立的计算机进行, 无需机器人本身及其控制系统的参与。最初的离线编程系统是纯文本的, 虽然简易, 但由于其缺乏对机器人运动轨迹三维空间坐标

的直观描述, 轨迹坐标及姿态参数的确定相当困难, 多数情况下仍需通过机器人示教获得, 因而难以实现完全意义上的离线编程。

随着计算机图形功能的增强, 基于三维图形的机器人仿真和离线编程系统得到开发和应用。但早期由于受 PC 机性能的限制, 这类三维动态图形仿真软件, 如 ROBCAD 和 IGRIP 等, 往往是在基于 UNIX 或 IRIX 操作系统的高性能图形工作站上开发的。虽然仿真效果好、功能强, 但成本高、操作复杂, 通常面向的是一些专业技术人员。对于一般的中小型企业而言, 使用这样一套系统所需要的软硬件、运行维护以及人员培训的投入, 与用机器人在线编程所引起的生产效率的损失相比, 已没有太多的优势可言, 因而其实用性受到了很大的限制。

随着计算机技术的发展, 如今一台普通 PC 机的速度和性能就可赶上或超过早期的高性能图形工作站。因此基于 PC 的机器人三维可视化离线编程和动态仿真系统开始得到开发和应用。目前市场上的这类软件有 Workspace5、Robot Works、Robot Studio, 等等。这些软件在对各类机器人语言的支持、三维图形模块的构建和导入、机器人运动轨迹的规划、离线编程的操作、动态仿真等方面各有千秋, 但都是基于 Windows 平台开发的, 因而具有一般 Windows 应用程序的交互式图形友好操作界面; 并利用 Windows 对三维图形的支持, 通过各种形式的三维图形建模或导入方法, 在 PC 上再现机器人的三维虚拟世界, 以实现对机器人离线编程三维运动轨迹的规划和动态仿真。

2 离线编程和仿真系统中三维动态图形的支持接口

目前 PC 机上用于开发三维图形应用程序的支持接口主要有 Direct 3D 和 Open GL, 其中, Direct 3D 作为 Direct X 的一部分, 只用于 Windows 操作系统; Open GL 是基于工业标准的开放式二维和三维图形应用程序编程接口, 可分别支持 Windows、Mac OS、Linux 和 Unix 等操作系统, 它具有简洁的 API 函数表达形式, 得到了全世界工业界的广泛应用。Open GL 对 Windows 的支持使人们能够在普通 PC 机上开发那些过去必须在昂贵的 SGI 图形工作站上运行的三维图形仿真系统, 从而大大降低了软件运行的硬件成本。在 PC 机上安装具有 Open GL 硬件加速功能的图形显示卡还可以使应用程序的图形功能得到大大提升, 从而发挥其图形动态仿真方面的最大优势。文中所开发的三维可视化离线编程和仿真系统所采用的三维图形接口也是 OpenGL。

3 三维可视化离线编程和动态仿真系统的开发

所提出的基于普通 PC 的交互式三维可视化机器人离线编程和仿真系统是在微软的 Windows 操作系统下采用 Visual C++ 开发的, 三维动态图形的显示通过调用 Open GL 的有关 API 函数实现。系统对机器人编程操作人员的工作习惯作了特别考虑, 实现了用简单直观的三维虚拟示教法和图标化编程进行焊缝轨迹的规划和编程。并对形状复杂的多层多道焊采用“宏”的方法实现机器人运动轨迹的自动规划和编程, 使系统的编程效率大大提高。系统还实现了对机器人运动轨迹以及焊缝成形的图形化三维动态仿真, 以便对机器人运动过程中可能出现的碰撞、坐标位置及手臂姿势的可达性进行离线检查, 从而对所编程序的可靠性进行检验并优化。

3.1 系统交互式操作界面

图 1 是系统的操作界面, 上部分为系统菜单和常用工具图标, 其中包括用鼠标对三维图形视窗进行平移、旋转和缩放的功能图标, 以及从各个特定视角观察工件模型的功能图标, 以便操作者用鼠标从最佳视角抓取工件上的机器人运动轨迹特征点, 实现虚拟示教; 右侧显示栏内包括机器人运动轨迹特征点列表、机器人关节坐标($a_1 \sim a_6$)和工具中心点(TCP)直角坐标(xzy)及姿态参数(abc)的调节显示滑块; 系统界面的中心区域是机器人及其工件的虚

拟三维工作环境显示操作区, 也是系统的主要区域, 机器人运动轨迹的规划、编程和仿真都在这一区域进行。

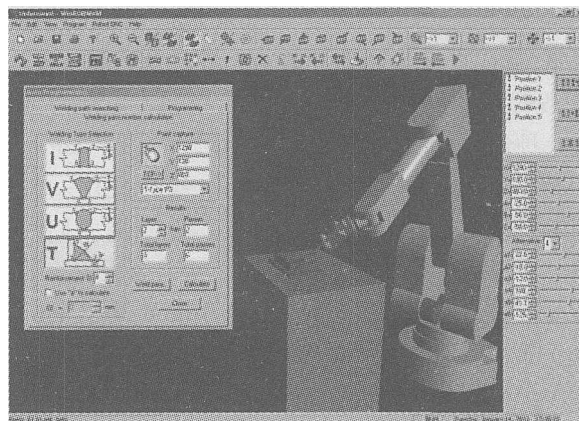


图 1 三维可视化离线编程和动态仿真系统

Fig. 1 3D-visualized off-line programming and simulation system

系统的首要任务是在三维工作区构建机器人和工件的三维模型并使之可视化。通常有三种方式: 内置建模、从模型库导入、以及从其它应用程序文件转换。系统针对不同对象采用了不同的建模方式: 对于工件, 通过格式转换的方式取用其它 CAD 软件创建的三维模型, 并存于工件库以备调用; 对于机器人, 则事先通过 CAD 创建或从其它图形格式转换的方式构造适用于该系统的机器人三维模型, 这里, 除了构造机器人三维几何模型, 还需要根据机器人的 DH 参数构造它的运动学模型, 才能使机器人模型按实际机器人的运动规律移动, 并正确反映机器人的实际位置坐标, 模型存于机器人库, 需要时可由系统装入; 对于仿真过程中动态产生的焊缝成形三维模型, 则通过系统本身内置功能创建。

示教过程中只要鼠标点击虚拟工件模型上的某一点, 虚拟机器人的焊枪端部(即 TCP)便随即自动到达该位置, 如果该点的位置已超出机器人的可达空间, 系统会自动发出警告信息, 并停止继续往该位置移动。机器人在某一位置的手臂姿态可通过改变姿态参数(abc)调整, 使焊枪的位置和角度与焊缝走向及工件形状相配合, 同样机器人的姿态也受各运动轴移动范围的限制。虚拟机器人的当前位置及姿态参数可作为特征点储存起来, 编程时这些特征点便可组成机器人的运动轨迹。

3.2 图标化交互式离线编程以及宏编程的应用

目前, 各个不同制造商的机器人编程语言还不具通用性。即便是同一个制造商生产的机器人, 前

后期所开发的控制系统所采用的机器人编程语言有时也不具兼容性。如果某一用户在不同时期、从不同厂商购进不同型号的机器人进行设备更新或生产线的扩建,势必要求编程人员重新学习培训;此外,用某一机器人编制的程序无法同其它类型的机器人共享,造成人力和物力资源的大量浪费。鉴于此,早在 1992 年德国曾在颁布的 DIN 66312 标准中定义过一种通用的工业机器人编程语言 IRL(Industrial robot language),试图通过标准化,推广使用一种通用的机器人编程语言,然而未能得到制造商们的采纳。原因之一是他们不愿受制于标准编程语言的束缚而失去自己在技术上的优势和设计开发上的自由。随着机器人控制系统的 PC 化,这一问题可能会逐步得到解决。比如有人在 VBS cript 的基础上创造了 Robot Script 通用机器人编程语言,并将其用于一种通用的基于 PC 的机器人控制系统^[2],但基于同样的理由目前还不能为众多的机器人制造商所接受。

采用图标化的离线编程则可以避开上述问题,因为机器人程序在离线编程系统中并非按某种特殊的机器人编程语言表达和存储的,而是可以用某种形象化的易于理解的图标配以一定的文字说明来表示,这个图标可以是一条单一指令,也可以是一组指令或完成某个复杂任务的宏指令。这些图标指令可以在交互式离线编程时从现成的指令库列表或宏指令列表中通过拖曳的方式直接插入程序,某些必要的参数则通过对话框的提示进行更改或缺省输入,不需要记忆复杂的编程指令及其语法规则。对于运动轨迹类指令,机器人的运动轨迹可以在三维图形中用空间曲线直接描述出来,大大提高了程序的直观性。图 2 为该系统所采用的机器人程序及运动轨迹的描述方式。

在离线编程系统所产生的程序,传给机器人时可根据所用的机器人类型,通过一个特定的转换模块进行自动转换。如果离线编程系统对不同的机器人都具有相对应的转换模块,那么该离线编程系统便具有通用性。也就是说,一个离线编程系统中的程序,在转换为某一型号的机器人程序之前是通用的,可根据需要转换并传给不同类型的机器人,而编程只需一次。通过离线编程这个平台,可以使不同类型的机器人程序之间实现某种意义上的通用性。而前提是离线编程系统内部必须具有支持该机器人的程序接口,即程序转换模块。

宏编程的应用是提高机器人编程效率和自动化程度的有效手段。实际生产中,机器人的一系列动作可以按任务分解成若干个单元,如从工具架上取

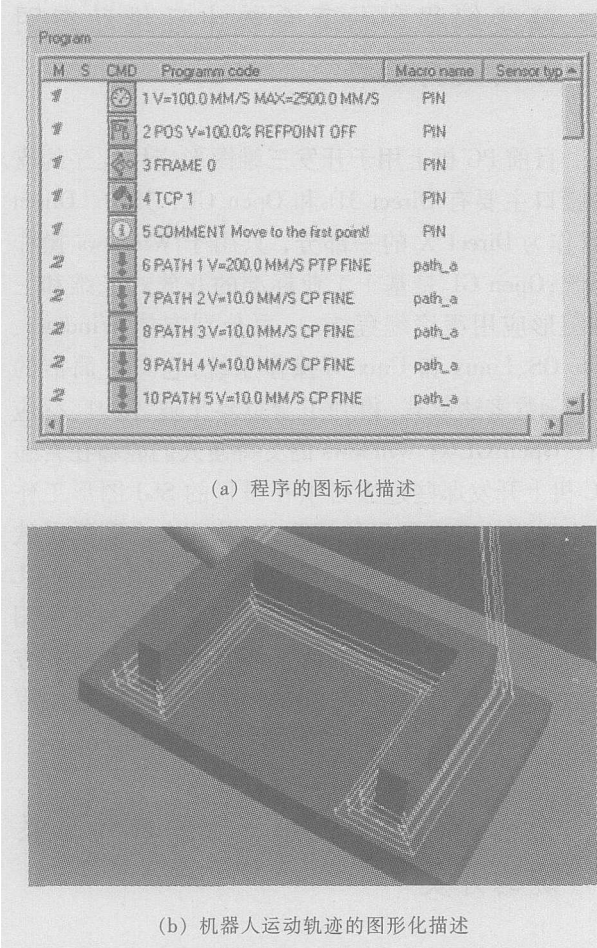


图 2 机器人程序和运动轨迹在离线编程系统中的描述方法
Fig. 2 Description of robot program and moving path in off-line programming system

焊枪然后到达某一指定位置、焊接某一段焊缝、若干次焊接后清理一次焊枪喷嘴,等等,每个任务单元中包含许多动作过程,每次执行一个任务单元,就重复其中所包含的所有动作。因此在编程时往往把它作为子程序处理,子程序一般用来处理重复性较强且包含动作较多的机器人任务单元。有些任务单元本身所包含的机器人动作并不多,不足以作为一个子程序来处理,但该任务单元的使用率较高,而且其中所包含的动作轨迹并不完全相同,比如,画圆是机器人经常性的任务单元,示教编程时通常用两个半圆指令来确定一个圆的运动轨迹,但每次所画的圆其直径可能要求并不相等。针对这种情况,在离线编程系统中,可以把它定义成一个“宏”存放于宏指令库中,通过调用该宏指令,并经过重新定位和修改直径来获得新的画圆宏指令。这一概念可以扩展到所有具有某一特征的机器人焊缝轨迹,也就是把一些常见的特征焊缝轨迹作为“宏”保存在库中,编程时可直接调用这些“宏”,并经过轨迹匹配后插入程序

之中,而无需再对新的焊缝作轨迹特征点的虚拟示教,从而大大提高了离线编程的效率。这尤其适合于多层多道焊情况下机器人运动轨迹的自动规划。从原理上来讲,任何一个程序段都可以把它定义成一个“宏”存储起来以备在相似条件下调用,因此,不仅一些具有某些特征的焊缝轨迹可以作为“宏”来定义,一些常用的机器人任务单元也可以作为“宏”来定义。

3.3 多层多道焊机器人运动轨迹的自动规划

现有的焊接机器人离线编程系统多数情况下只处理单道焊缝轨迹的编程,这是因为在单道焊情况下,机器人沿焊缝运动的初始轨迹是可以通过虚拟示教或工件的 CAD 图形文件提供的有关几何特征来直接确定的。其 TCP(Tool center point)的轨迹位置(也就是机器人焊枪端部沿焊缝根部行走的轨迹位置)在不考虑焊接热变形的情况下一般不受焊接过程参数(如焊接电流等)的影响。而在多层多道焊情况下,后续焊道的焊枪端部轨迹位置将受前道焊缝几何成形的影响。因此,所有影响前道焊缝几何成形的因素,包括焊接电流、电压、焊接速度、焊丝的熔敷速度等,都会对下道焊缝的位置产生影响。在实际生产中,往往可以等前道焊缝焊接完成以后,根据实际情况通过平移焊枪调整当前焊缝的轨迹位置,但这也仅仅限于简单的直线焊缝。对于较复杂的空间焊缝轨迹,由于焊缝的堆敷方向是变化的,无法采用简单的焊枪沿某一方向的预平移来补偿焊缝上各点的轨迹位置。一个比较容易想到的办法,是采用传感器对焊缝位置进行实时跟踪,但在多层多道焊条件下,焊缝表面形状复杂多变,要通过对焊缝表面进行三维扫描和图像处理,并从中找到当前焊道的确切位置,必须配以智能化图像模式识别等手段,在当前机器人及其传感器的智能化技术还处于发展阶段的条件下,难以实现可靠的焊缝跟踪。因此,对于机器人多层多道焊的条件下,一个较理想的办法,就是在程序中预设各道焊缝的机器人焊接运动轨迹,再辅以传感器作局部焊缝跟踪。然而,在离线编程的情况下,如果不考虑前道焊缝的焊接规范对焊缝成形的影响,就无法确定当前实际的焊缝轨迹位置。因此,所设计的机器人离线编程系统对多层多道焊进行焊缝轨迹规划时引入了焊接规范对后续焊缝位置的影响,尤其是焊丝熔敷速度和焊接速度的影响。而焊丝的熔敷速度与焊接电流、电压、焊丝伸出长度、焊丝直径、焊丝电阻率、焊丝材料等直接相关。

对于多层多道焊焊缝,离线编程系统可以根据不同的焊缝坡口基本形状及有关几何参数计算焊缝

截面,目前支持的主要焊缝坡口基本类型有 I、V、U 和 T 形(见图 1),其它坡口形状可以由它们组合。根据所采用的焊接材料和焊接规范参数,系统将自动估算填满焊缝所需的焊道数和焊层数。这些焊道的机器人运动轨迹及其位置将由系统根据焊缝走向和坡口形状自动规划,而不需要对后续焊道的轨迹位置进行重新示教。图 3 所示为该离线编程系统对各焊道进行自动规划和编程后的机器人轨迹三维造形。这一概念实际上也可用于机器人控制的堆焊快速造形技术的离线编程,即根据造形截面的形状,自动确定在某一焊接规范条件下的堆敷层数和焊道轨迹,然后自动产生机器人工作程序。

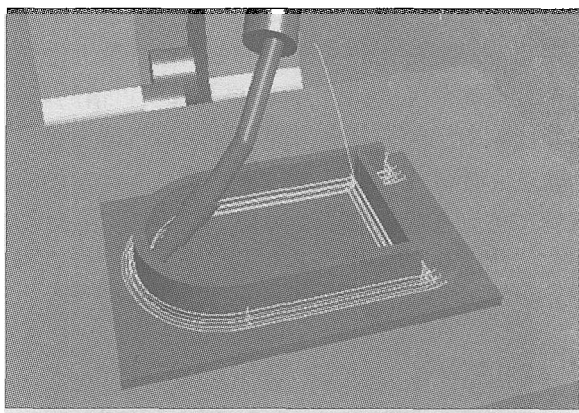


图3 多层多道焊的机器人运动轨迹自动规划

Fig.3 Automatic robot path-planning for multi-pass welding

3.4 机器人焊接过程的动态仿真

任何程序在正式运行之前,必须经过认真的检查和调试,确保其不出任何问题,才能交付使用,机器人程序也不例外。采用在线示教编程的机器人程序,通常直接通过机器人的试运行来当场检验该程序的可行性,有时还要进行示教-编程-调试的多次反复。在离线编程条件下,程序的检查和调试同样可在离线状态下进行,即通过对程序中机器人运动轨迹的三维图形动态仿真来“观察”机器人程序的运行情况,判定是否会出现机器人与工件及其周围环境的碰撞,机器人按直角坐标系移动时各个运动轴是否会出现位置上的奇异点,所确定的位置和速度是否合适,等等。由于机器人三维模型被赋予了与实际机器人同样的运动学规则和同样的几何比例尺寸,因此程序中对机器人运动轨迹的三维图形动态仿真与实际机器人的调试相比具有同样的等效性。但同时又具有如下显著的特点。

(1) 简单直观。仿真过程直接在离线编程系统

中完成,仿真结果通过三维图形化动态描述,直观易懂,能为普通用户所理解和接受。

(2) 成本低廉。除计算机外不需要机器人或其它任何附加的设备,由此而消耗的成本极其低廉。

(3) 安全可靠。程序仿真时操作人员只需在计算机屏幕前观察,无需置身于实际的机器人设备环境乃至嘈杂的生产现场,出现意外安全事故的可能性大大降低。

(4) 高效省时。由于计算机运行速度快,图形功能强,动态仿真本身远比实际的机器人程序调试要快;同时,程序的动态仿真代替机器人调试也节省了机器人本身的时间,提高了它的使用效率。

(5) 真实可信。虽然仿真系统的模型或多或少是对真实系统的抽象、简化或者理想化,仿真结果多少带有一些理想化的成分,但只要这种理想化是在一个合理的范围内,其仿真结果是真实可信的。

图 4 所示为多层多道焊条件下对机器人焊接运动轨迹和焊缝成形的动态仿真结果。所开发的离线编程和仿真系统不仅可以对程序中的机器人运动轨

迹进行动态仿真,对多层多道焊的机器人离线编程,也可以对焊接过程中每道焊缝的成形过程实现仿真。

4 结 论

(1) 所开发的基于普通 PC 的交互式机器人三维可视化离线编程和仿真系统,它具有友好的交互式操作界面,简单明了的图标化编程方法。独具一格的虚拟示教和图标化编程考虑了机器人现场操作人员的工作习惯,尤其适合机器人现场操作人员的使用。程序具有一定的通用性,可通过相应的模块转换为某一特定型号的机器人程序。

(2) 该机器人离线编程系统具有宏编程能力,对一些特征焊缝轨迹或任务单元,可通过定义宏的方法存放于库中,以便随时调用插入程序之中,以提高编程的速度和效率。

(3) 对于复杂形状的多层多道焊焊缝,该系统可以根据不同的焊缝坡口形状和尺寸确定焊道总数,并对每道焊缝的机器人运动轨迹根据所给定的焊接规范参数进行自动规划和编程。

(4) 通过对机器人沿焊缝运动轨迹以及焊缝成形的三维图形动态仿真,对机器人运动过程中可能出现的碰撞、各运动轴位置可能出现的奇异性,以及焊枪位置和手臂姿势的可达性等等进行离线检查,并以此对所编程序的可行性进行检验和优化。

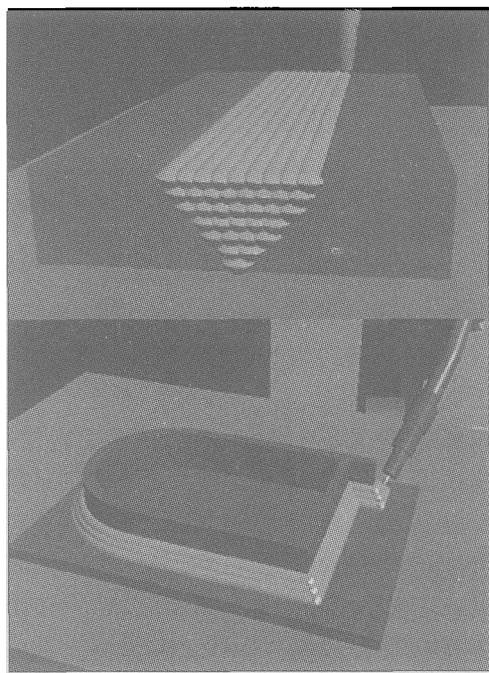


图 4 多层多道焊机器人离线编程的动态仿真结果
Fig.4 Simulation result of robot off-line programming
for multi-pass welding

参考文献:

- [1] Xinhua Tang. Entwicklung eines interaktiven, sensorunterstützten programmier- und simulations - werkzeugs fuer das mehrlagenschweißen mit industrirobotern[D]. Shaker Verlag, 2003.
- [2] John Lapham. RobotScript-the Introduction of a universal robot programming language[J]. Industrial Robot, 1999, 26: 17-19.

作者简介: 唐新华,男,1964年9月出生,工学博士,副教授。长期从事焊接过程自动控制方面的研究。赴德留学期间从事机器人离线编程及仿真系统的研究。现从事机器人、激光焊接及复合加工工艺的研究。发表论文 10 余篇。

Email: xhtang@sjtu.edu.cn

qualification rates of side bend performance are up to 100%.

Key words: vibratory conditioning; electro-slag welding; mechanical properties; residual stress

Image processing method for recognizing position of welding seam

WANG Qing-xiang¹, SUN Bing-da², LI Di³ (1. Guangzhou University of Chinese Traditional Medicine, Guangzhou 510405, China; 2. Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510000, China; 3. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China). p59 - 63 -

Abstract: In automated welding process based on vision method, images containing information of welding seam are obtained in series through vision sensor and processed real time to get central position of welding seam. However, because welding seam images are complicated, it is very important to choose suitable and effective processing algorithm in order to get accurately the information. This paper put forward a series of processing steps for welding seam images which include median filtering, creating binary image by adaptive threshold, acnode filtering, and edge detecting, searching central position of welding seam. Creating binary image by adaptive threshold and acnode filtering are focused. In each processing step four different welding seam images are used for observation and comparison. The result shows these processing algorithms are relatively effective.

Key words: welding seam image; image processing; recognition of welding seam position

3D-visualized offline-programming and simulation system for industrial robots TANG Xin-hua¹, Paul Drews² (1. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China; 2. RWTH Aachen, 52074 Germany). p64 - 68

Abstract: A PC-based, interactive 3D-visualized offline-programming and simulation system was put forward. By use of 3D-graphical functions of OpenGL, which is widely supported by current common PCs and popular operation system such as Windows, the 3D-geometrical model as well as the kinematical model of a robot and its workpiece was constructed in this system. Then the automatic path-planning and programming for robot, as well as the 3D-graphical dynamic simulation for robot movement was studied. With the function of interactive "virtual teach-in" procedure, the path-planning and programming for single-pass robot welding was implemented. For multi-pass welding, the welding path of each weld bead was automatically planned and programmed with "macro" technique. The robot motion path of the program could be verified for its reliability and security by means of 3D-graphical dynamical simulation. At last the program could be automatically converted to the particular language format of a robot when it is transferred to the robot system. Therefore the practicability of the off-line programming for robot was improved greatly.

Key words: robots; offline-programming; 3D visualization; dynamic simulation; virtual teach-in; multi-pass welding

Application of statistical process control in submerged arc welding

WU Feng-shun, LU Zhong-liang, WANG Lei, HU Yan-xiang, XIE

Ming-li (State Key Laboratory of Plastic Forming Simulation & Die Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China). p69 - 72, 76

Abstract: Based on Microsoft Visual C++ 6.0, a system composed of software and hardware was designed to collect, display and back-up the welding current and arc voltage in submerged arc welding. Welding current and arc voltage were analyzed using the theory of statistical process control. The results show that, when the welding process is in abnormal, the related information can be drawn by the system in time, which reflects the stability of submerged arc welding process.

Key words: statistical process control; submerged arc welding; control limits; standard deviation

Selective laser sintering of Ni-CuSn powder mixture SHEN Yifu, WU Peng, GU Dong-dong, ZHAO Jian-feng, HUANG Yin-hui (College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China). p73 - 76

Abstract: Selective laser sintering of a two-component Ni-CuSn powder mixture has been successfully processed based on the mechanism of liquid phase sintering during which partial melting of powder occurred. The effect of laser processing parameters on the sintering mechanism and sintering quality were studied. It shows that controlling the processing parameters, especially laser powder and scan speed in a suitable range can ensure anticipant sintering mechanism and sound densification. The analysis on the microstructural features of the sintered sample demonstrates the conditions for achieving high densification level, that is, the obvious difference in the melting point of Ni and CuSn, and the high mutual solubility.

Key words: selective laser sintering; metal powder; liquid-phase sintering; laser processing parameters

Experimental investigation and bonding mechanism of brazing diamond film

KANG Shi-jiang, CHEN Xue-guang, LÜ Zhi-yong, YANG Li-jun (Institute of Welding Research, Hebei University of Technology, Tianjin 300132, China). p77 - 80

Abstract: Vacuum brazing of diamond and hard alloy were performed using Ag72-Cu28-Ti(1-5) filler alloy. The joint of diamond and hard alloy formed under conditions that pressure was less than 5×10^{-2} Pa, brazing temperature at 850 °C and holding time of 10 min. The interface of the diamond film and the active filler metal was observed by scanning electron microscope - energy dispersive spectroscopy and X-ray to disclose the bonding mechanism. At the brazing temperature, there is greater affinity between active element (β -Ti) in the brazing filler metal and the carbon on the surface of the diamond film. A metal-like layer of TiC formed on the surface of diamond film due to adsorption, diffusion and chemical reaction. The layer and the Ag-Cu alloy based brazing filler metal bond the diamond film and the hard alloy together. Using the technical parameters, the four-point bending strength test shows that the average strength of the brazed joints is higher than 300MPa when the active element is less than 3%.

Key words: diamond film; brazing; active brazing filler metal; joint strength