

焊接机器人技术

吴 林, 张广军, 高洪明

(现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001)

摘 要: 文中对焊接机器人的应用现状、发展趋势、相关技术进行了概述分析。指出随着焊接机器人的性价比提升和我国向制造强国迈进, 焊接机器人在我国的应用将实现跨越式发展; 焊接机器人本身将向着开放式、智能化发展; 遥控焊接成为一个新的研究热点。

关键词: 焊接机器人

中图分类号: TG48;TB21

文献标示码: A

文章编号: 1007-9289-(2006)05⁺-0029-07

Technology of Welding Robot

WU Lin, ZHANG Guang-jun, GAO Hong-ming

(National key laboratory of advanced welding production technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001)

Abstract: In this paper, the history and present conditions of welding robot in domestic and foreign situation were summarized, the latest development in technology was discussed. It was pointed out that the application of welding robot in our country would quickly expand due to the increase of ratio of performance to price and development of national manufacturing; the future welding robot will possess the opening structure, and intelligent behavior; remote welding becomes a new research spotlight.

Key words: Robot, Welding, Remote welding

1 焊接机器人国内外应用现状

机器人是柔性自动化的集中体现^[1]。自从 1959 年美国推出世界上第一台工业机器人 UNIMATE 以来, 机器人技术的研究和发展过程经历了三个阶段: (1) 第一代是示教再现型机器人, 这类机器人不具备外界信息的反馈能力, 很难适应变化的环境。目前这类机器人仍在一些工业生产线上应用着; (2) 第二代是具有一定感知能力的机器人, 它们对外界环境有一定的感知能力, 具备如听觉、视觉、触觉等功能, 根据传感器获得的信息灵活调整自己的工作状态, 保证能够在简单的动态环境中完成预期的任务。(3) 第三代是智能机器人, 它不仅具有很强的感知能力, 而且具有独立的判断、行动、记忆、推理和决策的能力, 甚至具有任务级的编程能力, 因而操作者可以通过非常简单的操作使之完成更加复杂的任务^[2]。

在众多种类的机器人中, 工业机器人数量最多, 而大约一半的工业机器人是焊接机器人, 这点可从

图 1 所示的 2005 年美国新增工业机器人在各个应用领域的大致比例看出。

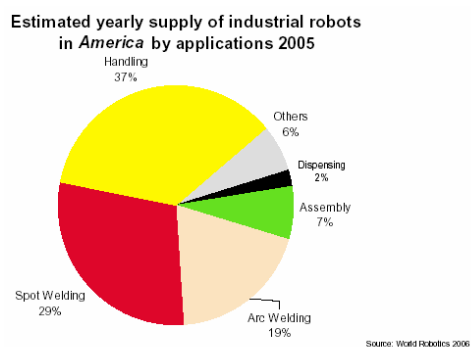


图 1 2005 年美国新增工业机器人用途统计 (来源: IFR 统计报告)

Fig.1 Estimated yearly supply of industrial robots in America in 2005 (Source: IFR report)

截止到 2005 年全世界的在役工业机器人约为 914 000 套, 如图 2 所示。日本装备的工业机器人总量达到了 50 万台以上, 超过了全世界工业机器人总数的 50%, 继续保持“机器人王国”地位, 美

收稿日期: 2006-05-26

作者简介: 吴林(1935-), 男(汉), 教授。

国和德国分列二、三位。尽管美国所拥有的机器人数量不如日本，但其技术水平较高，占有一定的优势。在亚洲，韩国的机器人发展也极其迅速。日本、韩国和新加坡的机器人密度（即制造业中每万名雇员占有的工业机器人数量）居世界前三位。

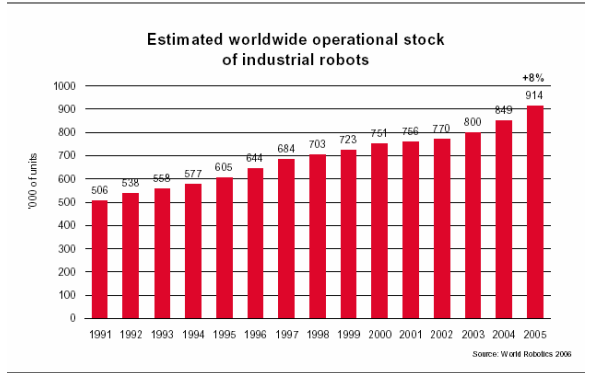


图2 1991~2005 各年全世界在役机器人数量统计(来源：IFR 统计报告)
Fig.2 Estimated worldwide operational stock of industrial robots (Source: IFR report)

图3 示出全世界每年新增机器人情况。近几年，机器人销售保持快速增长，2005 年新增机器人121000 台。

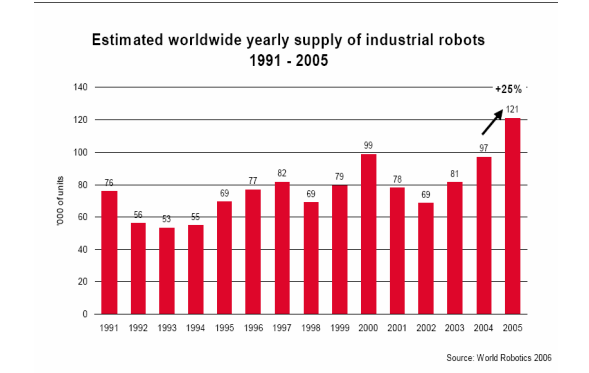


图3 1991~2005 年每年全世界新增机器人数量统计（来源：IFR 统计报告）
Fig.3 Estimated worldwide yearly supply of industrial robots (Source: IFR report)

我国在 20 世纪 70 年代末开始进行工业机器人的研究，经过二十多年的发展，在技术和应用方面都取得了长足的进步，对国民经济以及制造业的发展起到了积极的推动作用。据不完全统计，最近几

年我国工业机器人出现了爆炸式增长，平均每年的增长率都超过 40%，在弧焊和点焊领域的增长率都超过了 60%。2004 年全年国产工业机器人数量（主要指在国内生产和组装的）突破 1400 台，进口机器人数量超过 9000 台。这其中的绝大多数都应用于焊接领域。尽管 2005 年我国新增机器人数量超过了 5000 台，但是仅占亚洲新增数量的 6%，如图 4 所示，仅仅与台湾相当，小于韩国的 15%，更远小于日本的 69%。相对于我国的经济的发展速度以及经济总量来说，这样的速度显然是不匹配的。这也从一个侧面说明我国制造业的自动化程度有待进一步提高。同时也是我国的劳动力成本低廉的一个反映，这也限制了我国制造业自动化水平以及工业机器人应用程度的提高。

当前焊接机器人遇到难得的发展机遇。一方面，焊接机器人的价格不断下降，性能不断提升，性价比大幅度提高，如表一所示^[3]。2003 年一台机器人的平均价格只相当于 1990 年同等性能机器人的四分之一。另一方面，劳动力成本不断上升，在我国这种势头也已出现，

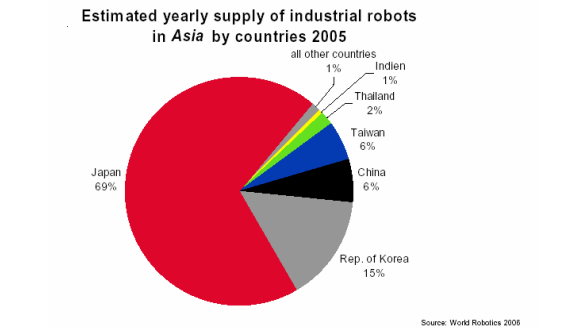


图4 2005 年亚洲各国新增机器人比例
Fig.4 Estimated yearly supply of industrial robots in Asia

表 1 UNECE 及 IFR 对 1990~2000 机器人性价比调查情况^[3]

Table 1 Investigation of ratio of performance to price of robot^[3]

项目	变化	项目	变化
机器人单价	-43%	搬运能力	+26%
重复精度	+61%	6 轴机器人速度	+39%
工作范围	+36%	平均故障间隔时间	+137%
处理器比特率	+117%	最多可控关节数	+45%

图5示出联合国欧洲经济委员会(UNECE)统计的从1990~2000年的机器人价格指数和劳动力成本指数的变化曲线^[4]。再者,我国经济的发展,由制造大国向制造强国迈进,需要提升加工手段,提高产品质量和增加企业竞争力。这一切预示着机器人的应用以及发展的前景将有更大的空间。

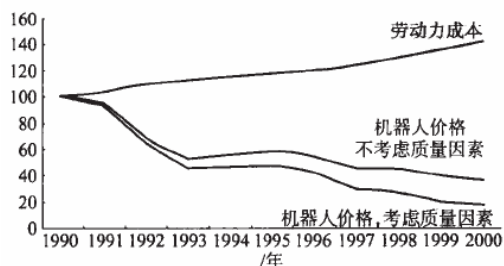


图5 机器人价格指数与劳动力成本指数比较 (来源: UNECE 统计)^[4]

Fig.5 Comparison of robot price index and labour force cost index^[4]

2 机器人相关技术的发展

机器人技术是综合了计算机、控制论、机构学、信息和传感技术、人工智能、仿生学等多学科而形成的高新技术,是当代研究十分活跃的领域。近十几年来,随着计算机技术、微电子技术、网络技术等快速发展,机器人技术也得到了飞速发展。下面介绍机器人相关技术的一些最新进展。

2.1 机器人控制器

机器人控制器是根据指令以及传感信息控制机器人完成一定的动作或作业任务的装置,它是机器人的心脏,决定了机器人性能的优劣。传统的机器人控制器基本上采用专用的计算机、专用的机器人语言和专用的操作系统设计的,结构封闭,表现出开放性差、软件独立性差、扩展性差、缺少网络功能等缺点,它严重的影响了机器人的发展和应用水平。在这种情况下,开发开放式的机器人控制系统显得非常迫切,同时开放式机器人控制器也是当前控制系统的主流和发展趋势。

开放式机器人控制器具有以下特点^[5]:

- (1) 使用基于非专用计算机平台(如 Sun, GUI, PC 等)的开发系统。
- (2) 使用标准的操作系统和标准的控制语言

(如 C, C++)。

(3) 硬件基于标准总线结构,能够与各种外围设备和传感器接口。

(4) 使用网络策略,允许工作单元控制器共享数据库,并允许远程操作。

一些发达国家以设计生产开放式控制系统为目标,对开放式体系结构作了大量的开发研究工作,相继推出了各自的开放式体系结构规范,主要工作集中于定义一个与实现平台无关的抽象模型,如美国的 NGC 和 OMAC 计划、欧盟的 OSACA 计划、日本的 OSEC 计划等。

目前,根据文献的报道,基于 PC 的机器人控制器代表着未来的方向和潮流,是一种必然的趋势。现在应用的比较多,并且以现在的技术手段来说开放性也最彻底的方法就是 PC+基于 DSP 的运动控制卡的方法,如图6所示^[6]。在该结构中,工业计算机配合 Windows2000 操作系统,主要负责具有非实时性特点的任务,包括人机交互、系统管理、系统状态监控。同时由于其良好的通用性和接口能力,可以进行各种传感器以及其它外部设备的集成。PMAC 运动控制卡负责具有实时性要求的相关工作,包括根据电机光电编码器的位置反馈进行位置 PID 伺服控制、轨迹插补等。

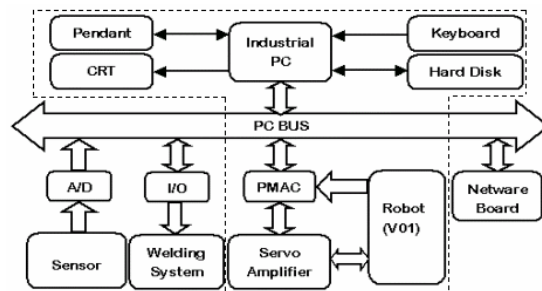


图6 开发式弧焊机器人系统硬件结构图^[6]

Fig.6 Structure of opening arc welding robot system^[6]

基于DSP的运动控制卡是开放式机器人控制器的核心部分,同时控制多达32轴,具有诸如PC、STD和VME等几种总线接口,为用户提供了极大的选择空间,图7是Delta Tau Data Systems公司的PMAC2A-PC/104型多轴运动控制卡。

2.2 传感器

焊接机器人由示教再现型向智能型发展,增强其柔性和适应性,传感器是必不可少的。对于自主

焊接来说, 传感器感知外部环境的变化通知机器人, 机器人实时调整工作状态, 以适应环境的变化。这一点对于焊接来说尤为重要。在实际焊接过程



图7 PMAC2A-PC/104 运动控制卡

Fig.7 PMAC2A-PC/104 motion control card

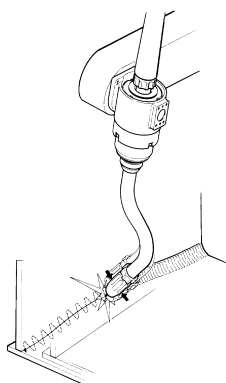


图8 电弧跟踪

Fig.8 Arc seam tracking

电弧跟踪传感优点是简单, 不用附加另外的传感装置, 但它只适用于熔化极焊接场合。目前很多商用机器人已具有电弧跟踪传感功能。

激光跟踪传感由于其优越的性能, 已成为最有前途、发展最快的焊接传感器。英国 META 公司和加拿大 Servorobot 公司有商业化的产品出售。

2.3 离线编程与路径规划技术 [7]

机器人离线编程 (OLP — off-line programming) 系统是机器人编程语言的拓广, 它利用计算机图形学的成果, 建立起机器人及其工作环境的模型, 在利用一些规划算法, 通过对图形的控制和操作, 在不使用实际机器人的情况下进行轨迹规划, 进而产生机器人程序。它是 CAD/CAM/ROBOTICS 一体化的产物。

中, 焊接条件是经常变化的, 如加工和装配上的误差会造成焊缝位置和尺寸的变化, 焊接过程中工件受热及散热条件改变会造成焊道变形和熔透不均。为了克服机器人焊接过程中各种不确定性因素对焊接质量的影响, 提高机器人作业的智能化水平和工作的可靠性, 要求弧焊机器人系统不仅能实现空间焊缝的自动实时跟踪, 而且还能实现焊接参数的在线检测、调整和焊缝质量的实时控制。

目前, 应用比较成熟的传感器主要是焊缝跟踪传感器, 主要有电弧跟踪和激光跟踪两大类, 分别如图 8 和图 9 所示。



图9 激光跟踪传感

Fig.9 Laser seam tracking

离线编程技术的最高目标是全自动编程, 即只需输入工件的模型, 离线编程系统中的专家系统会自动制定相应的工艺过程, 并最终生成整个加工过程的机器人程序, 称之为“傻瓜编程”。目前, 还不能实现全自动编程。自动编程技术是当前研究的重点。自动编程技术的核心是焊接任务、焊接参数、焊接路径和轨迹的规划技术。针对弧焊应用, 自动编程技术可以表述为在编程各阶段中, 能够辅助编程者完成独立的、具有一定实施目的和结果的编程任务的技术, 是为了提高系统的智能, 提高编程的质量和效率而提出来的。主要包括:

- 焊缝信息的自动获取: 焊接特征提取和焊接特征建模技术
- 焊接顺序规划: 规划多条焊缝的焊接顺

- 序
- 焊接参数自动规划：规划焊接过程参数
 - 焊接路径自动规划：规划焊接过程中焊枪位置和姿态
 - 机器人自动放置规划：规划机器人和焊接路径之间的相对放置问题

图 10 是一个典型的离线编程系统应具备的基本功能模块，图 11 是离线编程系统的应用框架，图 12 是一个离线编程应用实例，图 13 是任务级离

线编程结构。表 2 列出目前各国开发的主要离线编程系统。

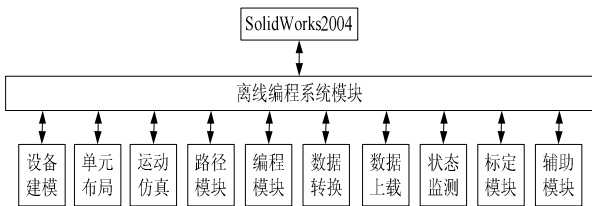


图 10 离线编程基本功能模块划分

Fig.10 Function module of off-line programming

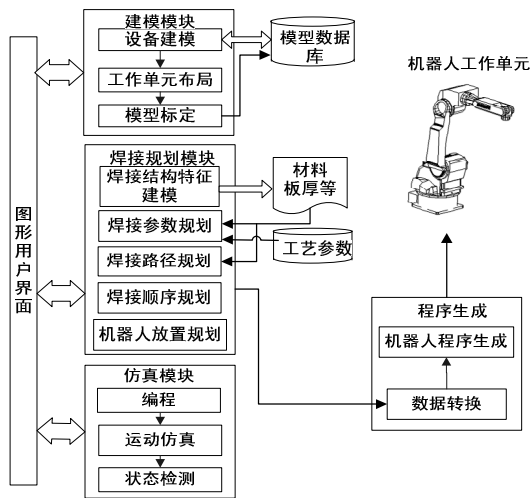


图 11 离线编程系统的应用框架

Fig.11 Frame of off-line programming

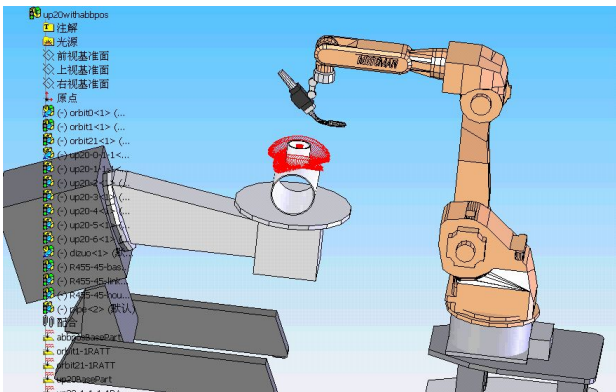


图 12 离线编程应用实例

Fig.12 Example of off-line programming

表 2 国外主要机器人离线编程与仿真系统
Table 2 Main foreign robot off-line programming system

软件包	生产公司或研究机构
ROBEX	Aachen, Germany
GRASP	University of Nottingham, UK
PLACE	McAuto Manufacturing, USA
Robot-SIM	Calma Corp., USA
ROBOGRAPHIX	Computer Vision Corp., USA
AutoMod and AutoGram	Auto Simulation Inc., USA
IGRIP	Deneb Inc., USA
RCODE	SRI, USA
ROFACE	Science Management Corp., USA
XPROBE	IBM Research Center, USA
ROBCAD	Tecnomatix Corp., USA
CimStation	SILMA Inc., USA
Workspace	Robot Simulations Inc., USA

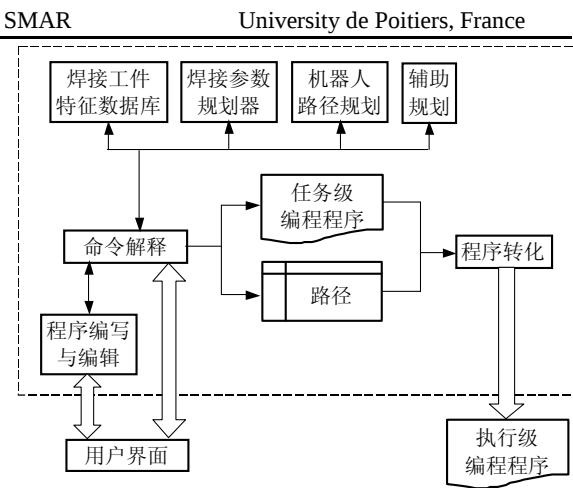


图 13 任务级离线编程器的结构

Fig.13 Structure of task-level off-line programming

2.4 多机器人协调

多机器人焊接，如图 14 所示，目前是一个研究热点问题。

多机器人系统是指若干个机器人通过合作与协调而完成某一任务的系统。它包含两方面的内容,即多机器人合作与多机器人协调。当给定多机器人系统某项任务时,首先面临的问题是如何组织多个机器人去完成任务,如何将总体任务分配给各个成员机器人,即机器人之间怎样进行有效地合作。当以某种机制确定了各自任务与关系后,问题变为如何保持机器人间的运动协调一致,即多机器人协调。对于由紧耦合子任务组成的复杂任务而言,协调问题尤其突出。

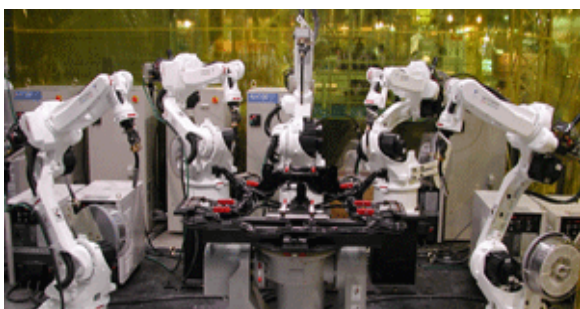


图 14 多机器人焊接
Fig.14 Multi robots welding

智能体技术是解决这一问题的最有力的工具。多智能体系统(Multi-Agent System, MAS)研究在一定的网络环境中,各个分散的、相对独立的智能子系统之间通过合作,共同完成一个或多个控制作业任务的技术。多智能体系统成为一种对复杂系统进行分析、设计的有力思想方法和工具。每个机器人

都被视为一个具有智能行为的 Agent,每个 Agent 只处理与自身相关的局部目标和局部信息,具有自主能力,同时又具合作的能力,即社会行为能力。图 15 示出了一个通过以太网联接的多机器人系统。

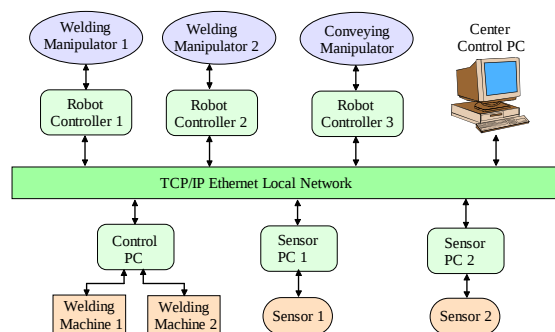


图 15 多机器人系统的硬件网络结构^[8]

Fig.15 Network structure of multi robot system^[8]

3 遥控焊接技术

遥控焊接是指人在离开现场的安全环境中对焊接设备和焊接过程进行远程监视和控制,从而完成完整的焊接工作。在核电站设备的维修,海洋工程建设以及未来的空间站建设中都要用到焊接,这些环境中的焊接工作不适合人类亲临现场,而目前的技术水平还不可能实现完全的自主焊接,因此需要采用遥控焊接技术。目前美国、欧洲、日本等国对遥控焊接进行了深入的研究。图 16 是奥地利学者开发的用于船体舱体内部焊接的遥控机器人^[9]。

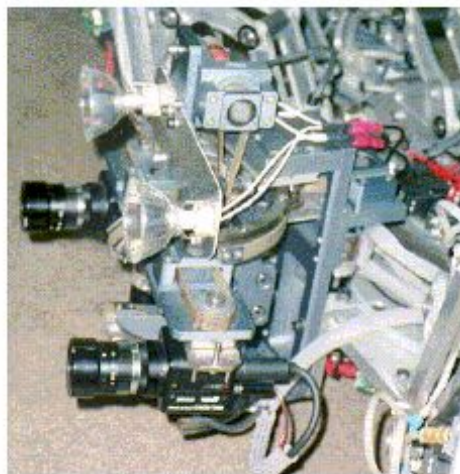


图 16 遥控焊接机器人实例

Fig.16 Example of remote welding robot

目前, 哈尔滨工业大学正在进行这方面的研究工作。由于全自主机器人实现上的困难, 主要是致力于充分发挥操作者和机器人各自的优势以及它们之间的交互, 提出了“宏观遥控, 微观自主”的指导思想, 在此基础上进行机器人遥控焊接系统

(Tele-Robotic Welding System, TRWS) 的研究。图 17 所示为构建的 TRWS 的原理图, 目前该系统可以初步的实现遥控焊接任务。在该系统中, 应用了力觉、视觉、测距、焊缝跟踪等多种传感手段, 并且进行了有效地多传感信息融合。

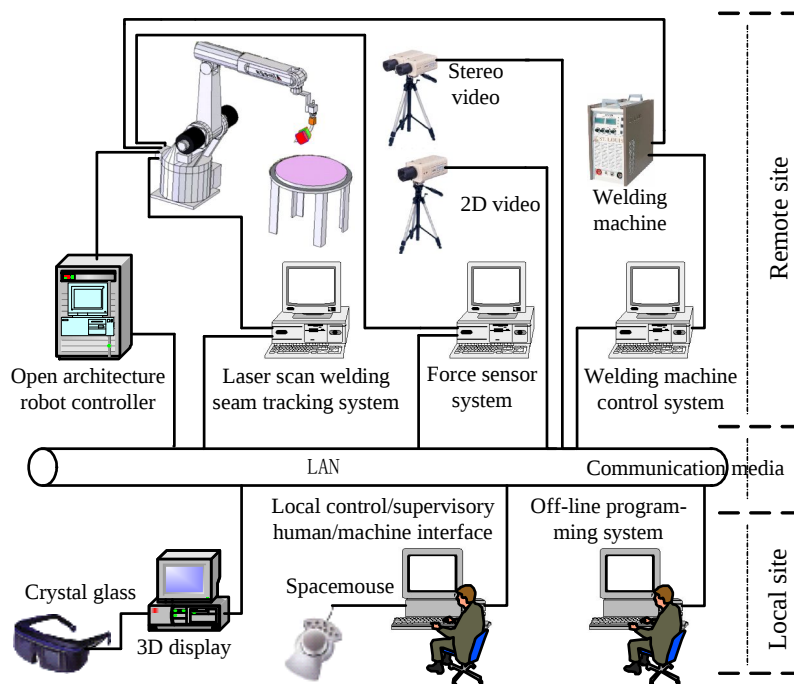


图 17 机器人遥控焊接系统的硬件结构

Fig.17 Structure of TRWS

4 总结与展望

(1) 随着科技的发展, 工业机器人的性能更完善、价格会更低, 其应用将越普遍, 神秘感消失。

(2) 在我国从制造大国向制造强国转变的过程中, 工业机器人的需求将快速增加, 机器人数量将成为衡量一个国家、一个企业加工能力的一个标志。

(3) 未来的工业机器人将集成更多的功能, 具有感知环境变化的适应能力, 智能水平大幅提高。

(4) 随着我国核工业、航天技术等的发展, 以机器人为核心的遥控焊接成为新的研究热点。

参考文献

- [1] 蒋新松. 未来机器人技术发展方向探讨. 机器人. 1996, 18(5): 287-291.
- [2] 林尚扬、陈善本、李成桐. 焊接机器人及其应用. 机械工业出版社. 2000.

- [3] 王伟. 2003 年世界机器人统计数据. 机器人技术与应用. 2005, 1: 8-15
- [4] 唐新华. 焊接机器人现状及发展趋势 (一). 电焊机. 2006, 36 (3): 1-5.
- [5] Ford W E. What is a Open Architecture Robot Controller? 1994 IEEE International Symposium on Intelligent Control, Columbus, Ohio, USA, 1994:16-18.
- [6] 张连新. 开放式弧焊机器人控制器研究. 工学硕士学位论文. 哈尔滨工业大学, 2003.
- [7] 何广忠. 机器人弧焊离线编程系统及其自动编程技术的研究. 工学博士学位论文. 哈尔滨工业大学, 2006.
- [8] 朴永杰. 焊接柔性制造单元多智能体协调控制的研究. 工学博士学位论文. 上海交通大学, 2004.
- [9] Markus Vincze1, Minu Ayromlou1, etc.. A system to navigate a robot into a ship structure. Machine Vision and Applications, 2003, 14: 15-25.

作者地址: 哈尔滨市南岗区 150001
Tel: (0451)86415537