

文章编号 : 1002-0446(2003)06-0548-06

视觉伺服机器人对运动目标操作的研究*

田梦倩¹, 罗翔¹, 黄惟一²

(1. 东南大学机械工程系; 2. 东南大学仪器系, 江苏 南京 210096)

摘要: 机器人视觉伺服系统是机器人领域一重要的研究方向, 它的研究对于开发手眼协调的机器人在工业生产、航空航天等方面的应用有着极其重要的意义。本文着眼于视觉伺服机器人操作运动目标这一问题, 分析了建立此类系统的控制结构并指明其特点; 同时, 详细地阐述了三个组成环节: 视觉图像处理、预测及滤波、视觉控制器的研究方法和现状。最后, 分析了今后的研究趋势。

关键词: 机器人视觉; 视觉伺服; 运动目标; 视觉控制

中图分类号: TP24 文献标识码: B

RESEARCH ON VISUAL SERVOING ROBOT TO MANIPULATE MOVING OBJECTS

TIAN Meng-qian¹, LUO Xiang¹, HUANG Wei-yi²

(1. Department of Mechanical Engineering; 2. Department of Instrument Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: A robotic visual servoing system is one of the most important subjects in the field of robots. Its research is significant for developing visual robots applied to industrial applications, aerospace, etc. Aiming at the research on visual servoing robot to manipulate moving objects, this paper firstly, describes several typical control structures and point out their advantages and drawbacks. Then, three important composing parts including image process, motion prediction and control schemes are analyzed, and their state and achievements are discussed. Finally, the developing trend is presented.

Keywords: robot vision; visual servoing; moving object; visual control

1 引言 (Introduction)

视觉传感器 (CCD 摄像机、TV 摄像机) 是机器人系统中最重要“感官”之一, 它的引入改变了机器人对操作对象及环境必须精确建模的要求, 依靠视觉信息的反馈, 机器人可实现对动态、不确定的场合操作。因此, 机器视觉在航空航天领域、自动化生产、自动检测等方面具有相当重要的研究意义^[1]。

早期, 引入视觉传感器的机器人控制系统多采用静态的 look-then-move 的控制结构, 这是一种开环控制方式, 难以保证操作的精度及控制器的性能, 也难以实现对运动目标的跟踪。20 世纪 80 年代, 随着计算机及图像处理硬件的迅速发展, 使视觉信息可以用于连续反馈, 因此, 有学者^[2]提出了将视觉信息作为反馈环节, 与机器人的运动控制相结合, 实现机

器人的闭环控制, 称为“视觉反馈控制”或“视觉伺服控制”。自此, 机器人视觉伺服控制得到了相当广泛的研究^[3]。

其中, 视觉伺服机器人对运动目标的操作 (跟踪、拦截、抓取、击打), 亦是这方面研究的典型应用。这一研究更能体现视觉的重要性, 是机器人学中具有挑战意义的课题。区别于对静止目标的操作, 视觉伺服机器人对运动目标操作突出的一个特点就是对整个系统实时性的要求提高, 不仅要求系统中各环节高速处理, 而且各环节之间的协调及系统稳定性、动态特性的要求也相应提高。

本文着眼于视觉伺服机器人操作运动目标这一研究领域, 对建立此类系统的控制结构进行分析, 指明了不同控制结构的特点; 同时, 详细地阐述了三个

* 基金项目: 江苏省自然科学基金项目资助 (BK2002405)。

收稿日期: 2003-05-16

重要环节:视觉图像处理、滤波与预测及视觉控制器的研究方法和现状,最后,分析了今后的研究趋势。

2 控制系统的结构 (Control structure)

首先,对于视觉伺服机器人系统,视觉反馈获得的信息可以是 3 维空间坐标,也可以是 2 维图像平面的图像特征,据此可以将系统分为基于位置的视觉伺服系统和基于图像的视觉伺服系统。

在基于位置的控制结构中,视觉处理输出的是运动目标的坐标,并由此估计目标与机器人之间的相对位姿,以控制机器人在直角坐标空间中的运动。它将视觉处理与机器人运动控制分开,可以直观地在直角坐标系中描述期望的相对轨迹。尤其当运动目标的轨迹易于用直角坐标表达时,多采用这种结构。但基于位置的控制系统由于需要求解逆运动学方程,计算量比较大,同时它对机器人及摄像机等的标定误差比较敏感,其控制的精度直接依赖于系统模型、标定误差等方面。因此,不少研究致力于开发未标定视觉情况下对运动目标的操作^[7]。

一般,在基于位置的视觉伺服系统中,对运动目标操作主要完成以下几方面的工作:1)快速进行图像处理,获得运动目标相对于末端执行器的位置;2)分析预测其位置、速度、加速度等信息;3)建立视觉控制算法,控制机器人的运动。围绕这几方面工作,基于位置的控制系统一般由视觉图像处理、预测及

滤波、视觉控制器等模块组成,如图 1 所示。

与基于位置的控制不同,基于图像的控制系统将当前图像特征的集合与理想图像特征集合对比,不需要对三维姿态估计,因而对摄像机标定的要求不高,具有较强的鲁棒性。其控制系统结构如图 2 所示。但基于图像的控制结构需在线计算图像雅可比矩阵(图像特征参数变化量与任务空间位姿变化量的关系矩阵)及其逆阵,计算量也比较大。而图像雅可比矩阵直接依赖于实时变化的摄像机与目标间的距离,加大了计算的难度。

在论文[27]中,通过仿真实验表明,对于 eye-in-hand 系统中,基于图像的控制比基于位置的控制有更好的跟踪性能;当摄像机固定安装,尤其是同时观察机器人与目标,基于图像的控制与基于位置的控制具有相同的跟踪效果。

根据视觉信息是否直接控制关节角,视觉伺服系统又可分为动态的 look-then-move 系统和直接视觉伺服系统(direct visual servoing)。前者将视觉处理后的输出信息作为机器人关节控制器的输入,机器人关节的运动带一位置/速度反馈环节,如图 1、2 所示;而后者没有图 1、2 中的关节反馈环节,视觉伺服控制器直接控制机器人的关节角。实现直接视觉伺服的条件是视频处理部分具有足够高的频率,而一般的视频部分速度有限,因此,大多研究采用图 1、2 的双闭环动态 look-then-move 方式。

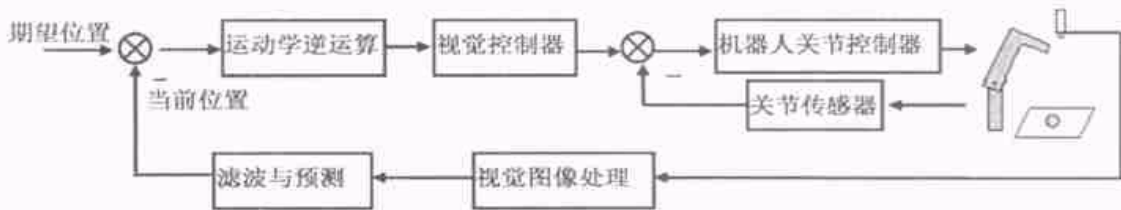


图 1 基于位置的动态 look-then-move 视觉伺服控制系统结构
Fig.1 Position based dynamic look-then-move structure

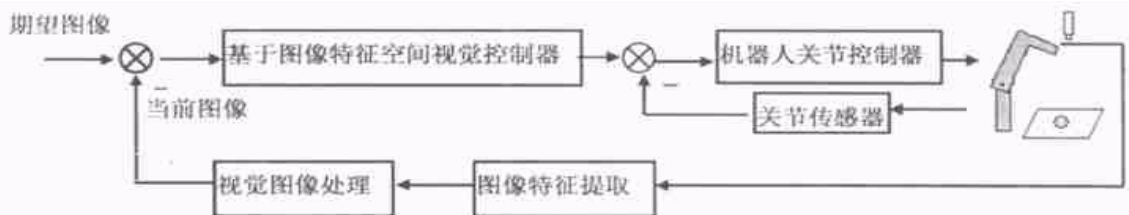


图 2 基于图像的动态 look-then-move 视觉伺服控制系统结构
Fig.2 Image-based dynamic look-then-move structure

在系统结构方面,视觉伺服机器人又可以根据摄像机的安装位置,分为摄像机固定方式和 eye-in-hand 方式,前者的摄像机固定在某个位置,或垂直于工作台上[22],或固定在工作台侧面[4,5,23~25],这种配置方式引入了摄像机与机器人坐标系的转换问题,要求摄像机精确标定,有可能出现末端执行器遮挡目标的情况;后者的摄像机安装在末端执行器上[6,8,9,21,22],对精确标定等要求降低,但摄像机的成像深度随机器人运动在不断变化,增加了图像处理的计算量。

3 视觉图像处理 (Image process)

图像处理的首要任务是选取图像特征点,特征点应对物体运动后位置、姿态的变化具有敏感性。一般取图像几何特征点的数目与机器人的自由度相同[6,9],也可选取更多的特征,即冗余特征。从控制的观点看,用冗余特征可抑制噪声影响,提高视觉伺服的性能[29]。

几何特征是局部特征,而其容易受光照、遮挡等情况的影响,因此,选用全局图像特征,如傅立叶描述子、几何矩、光流等的方法[5,28],鲁棒性更好。

基于位置的控制方式需要由图像处理环节给出目标的空间位置,最简单直接的方法是根据摄像机模型及与目标的投影变换关系求取[4,6,25]。论文[5]中计算图像的光流场,用递推方法估计目标的运动参数,但由于该方法计算量大,文中应用了专用的图像处理硬件。

基于图像的控制方式则需要根据所选的图像特征来构造图像雅可比矩阵,计算图像雅可比矩阵的方法有经验法、在线估计法和学习方法等[19,30]。经验法主要通过标定和先验模型知识得到;在线估计法可以不进行标定,但存在雅可比矩阵的初值选择问题;学习方法主要有离线示教和神经网络方法等。

4 滤波与预测 (Filter and prediction)

对于基于位置控制的视觉伺服系统,从二维图像平面提取得到 3 维的目标位置,必然是带有噪声的;所以系统必须对视觉处理后的信号进行数字滤波;另一方面,视觉采样的速率一般较慢(典型的采样频率是 30 Hz),而机器人的伺服驱动频率一般为 1000 Hz,因此视觉处理造成的时延不可避免;同时,运动目标的位置在时刻变化,因此,对运动目标操作的基于位置控制系统中应有预测器以补偿时延。在选择预测滤波器时,主要的约束是对于运动特性及

噪声特性的了解,同时考虑计算的成本。一般来说,对运动目标拦截、抓取、打击等操作,希望根据已获得的离散时间序列目标位置信息,分析其轨迹、速度、加速度等运动参数,以规划机器人在何时、何地接近目标并实施操作。

对于运动方程易于建模的情况,如目标保持匀速直线运动或抛物运动,可直接求解运动方程参数来实现预测。文[25]中,PUMA 560 机器人拦截并抓取平面直线运动的乒乓球,对视觉图像处理得到的目标的位置信息,采用二阶滤波器进行数字滤波,然后建立一直线运动方程对目标实现运动估计;文[31]中,实现了一机器人打排球的系统,采用递归最小二乘法求解目标(排球)的三次运动方程。

对于运动目标运动方程不易确定的情况,一般,操作分两步进行,首先跟踪目标,在末端执行器接近目标且达到一定精度时,再实施抓取等操作,这样策略下多采用两种预测方法:一种是建立自回归模型 ARM[10,16,17],对位置信息的时间序列进行分析;另一种是采用 Kalman 滤波器,对运动参数估计。

Kalman 滤波器是在一动态系统中定义一线性状态空间模型,然后用输出公式得到系统的最优的状态估计。获得好的预测精度的条件是干扰和测量噪声都是零均值白噪声。在对机器人视觉图像预测时,大多将目标位姿及其导数作为状态向量。由于目标的动态特性不可知,因此选用一常速度模型,即在一个采样周期内速度不变,但速度又是状态向量的一部分,它的值也被估计,每次被更新。

Kalman 滤波器的输出要求是线性的,而视觉处理的输出是目标在图像平面的坐标,它与状态向量(目标在机器人坐标系中位姿、速度)的关系是非线性的,因此,文[5]中采用一固定增益的稳态 $\alpha - \beta - \gamma$ 滤波器,它是一简化的 Kalman 滤波器,可以获得比较优化的结果;文[6,9]选取 5 个图像特征点,采用扩展 Kalman 滤波器,将输出模型线性化,完成对三维位置、姿态及其速度共六维向量的预测估计。

文[18]中通过实验对 AR 模型及 Kalman 预测器的预测误差进行对比,结果表明:Kalman 预测器对速度的变化比较敏感,更适宜运动目标速度变化缓慢(如匀速)的情况。

为使视觉伺服机器人能对速度不连续或运动轨迹变化大的场合,文[21,22]提出建立两个基本的运动模型:直线运动、圆周运动。Kalman 滤波器也基于此模型建立,通过设置合适的阈值误差,在基本模型间进行转换而实现精度更高的运动估计。这种方法

应用到长周期的运动估计中,能明显地提高精度。

5 视觉控制器 (Visual controller)

视觉控制器是机器人视觉伺服系统控制的核心,它根据位置误差或图像误差,采用一定的控制算法,实现对机器人的运动控制。依据机器人和视觉系统的性能及任务的复杂性,可以采用不同的设计方法。

(1) PID 控制器

选择 PID 控制器是最经典的方法^[4,6,16,25]。在图 1 中,误差可以在工作空间、关节空间或图像特征空间(基于图像控制结构)表示,而机器人的控制为直角空间或机器人关节空间的位置或速度运动指令,因此,在进行 PID 控制之前,有必要进行空间转换或机器人逆运动学计算,需用到机器人微分运动雅可比矩阵或图像雅可比矩阵。

(2) 基于图像控制的视觉控制器

在基于图像控制系统中,常用的是任务函数法、状态空间描述的控制器、基于图像差的控制器等^[20]。明尼苏达大学^[11,12]做了许多研究,开发了“明尼苏达视觉跟踪机器人”实验系统,主要采用基于图像的控制方法。

(3) 考虑动态特性的自适应视觉控制器

为完成对运动目标的操作,传统的方法是对目标的三维位置重建,或是对目标图像分析,以控制机器人运动接近目标实施操作。这类方法不可避免地需要一些运动学参数或摄像机焦距等参数,而我们知道,人类完成此类的操作,并不需要位置重建或其它信息,基于此,提出了视觉伺服机器人自适应控制器,以克服模型参数的不确定及摄像机标定误差等引起的问题。

另一方面,由于机器人系统的非线性及动态特性,在执行高速度等任务时,难以达到满意的控制结果。因此,应建立精确的动力学模型,研究其动力学特性对系统的影响^[26]。

自适应视觉控制器正是考虑了模型参数不确定性及系统动态性能两方面的因素而设计的,它通常是结合机器人的动力学方程直接设计机器人的关节力矩控制律。

Liu Hsu 建立一固定摄像机的平面机器人系统,研究其视觉伺服的自适应控制方法。首先建立参数化的动力学方程,同时根据摄像的投影关系,得到目标的特征点的变化与其关节速度的关系。这个关系中隐含着不确定参数:焦距、摄像机与操作平面的距

离、摄像机坐标系与机器人坐标系的夹角等,最终建立一模型参考自适应控制器,并通过递阶控制^[24]或非线性 PI 控制器^[23]求解,使得参考模型与系统模型的误差趋于零。

(4) 视觉阻抗控制

在机器人的操作中,很多时候需要对机器人与目标接触时的力进行控制。柔顺控制、阻抗控制即属于此类。其中,阻抗控制是控制力和位置之间的动力学关系,而不是直接控制力和位置。它通过调整刚度(即阻抗),来达到控制力的目的。传统的阻抗控制,依靠安装在末端执行器上的力传感器,来反馈其与操作对象接触时的力,实现对末端执行器的阻抗进行控制。但在某些操作如装配、击打、避障中,希望在未接触前调整其阻抗,以避免碰撞或接触力过大对机器人或操作对象造成的损坏。

机器人阻抗控制的关系式可以表达为

$$M\ddot{d}x + B\dot{d}x + Kdx = F_{ext} \quad (1)$$

其中, M , B , K 分别相当于惯性、阻尼、刚度矩阵, F_{ext} 是虚拟的作用在末端执行器上的外力, $dx = X - X_d$ 是末端执行器的当前位置与虚拟接触位置的差值。借助于视觉信息的反馈,可获得 dx 值,结合公式(1),可实现非接触情况下对机器人末端执行器的阻抗控制。

Y. Nakabo^[15] 首先提出视觉阻抗 (visual impedance) 概念,并建立了一套视觉阻抗算法。该算法根据视觉信息建立一虚拟接触面,控制目标与操作对象的距离矢量垂直于这一虚拟接触面。将距离矢量以图像雅可比矩阵的形式应用到阻抗中,以控制与虚拟表面接触时末端执行器接触应保持的理想阻抗。

文[15]中只研究末端执行器和目标的距离这一视觉信息与阻抗的关系,而文[14]中考虑了整个机械臂每一关节和目标的距离与阻抗的关系,它对一冗余度机器人进行研究,在机械臂的每个关节上构造一虚拟的球体,一旦目标的位置进入这个球体,目标与球体中心即关节中心的距离矢量便成为调整阻抗的一组重要参数,代入末端执行器的阻抗控制公式中,以控制其与末端执行器的接触力或避障。

对机器人的视觉阻抗控制是视觉与阻抗控制相融合的新的研究方向,主要存在的约束是视觉处理时间较长及通信有时延,制约了阻抗控制器的速度。因此,在[15]中专门设计了高速图像处理硬件,在[14]的实验系统中使用了一超声波位置传感器代替摄像机。

6 研究趋势 (Developing tendency)

虽然视觉伺服机器人的理论研究及实验研究已取得了很大的成绩,但其在工业领域、航空航天领域的应用仍是十分有限的.根据目前的情况,视觉伺服机器人对运动目标操作应在以下方面开展进一步的研究:

(1) 视觉处理的速度及精度.这个问题一直是视觉伺服机器人研究的瓶颈,在对运动目标操作中,这一问题更加突出.因此,视觉处理环节的硬件设计及图像处理算法方面亟待提高.

(2) 提高系统动态特性的研究.视觉伺服机器人系统是一复杂的非线性系统,如何从控制理论方面,对该系统的动力学模型进行理论分析及研究,实现快速稳定的视觉控制算法,是提高视觉伺服机器人动态特性的关键.

(3) 机器人实时运动规划的研究.视觉伺服机器人系统操作运动目标,对系统的实时性提出了更高的要求.目前对机器人视觉伺服系统的研究,大多采用传统的运动规划算法,因此,如何实时规划出动作时间最短、满足边界条件约束、避碰等要求的轨迹亦是一重要的研究内容.

(4) 视觉传感器与力、触觉等传感器相结合的研究.机器人在复杂环境中工作或者完成要求较高的任务时,需要多种传感器反馈更多的信息,因此,对不同采样频率的多传感器的特性及相互关系分析,建立一套多传感器信息融合的控制算法,是机器人能够在动态环境完成操作的关键.

参考文献 (References)

- [1] 郑南宁.计算机视觉与模式识别[M].北京:国防工业出版社,1998.
- [2] Hutchinson S, Hager G, Corke P I. A tutorial introduction to visual servo control[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1996, **12**(5): 651 - 670.
- [3] Corke P I, Good M C. Dynamic effects in visual closed-loop systems[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1996, **12**(5): 671 - 683.
- [4] Allen P K, Billibon Yoshimi. Real-time visual servoing[A]. Proc. IEEE Int. Conf. on robotics and Automation[C], California, USA: 1991, 851 - 856.
- [5] Allen P K, Timcenko A. Automated tracking and grasping of a moving object with a robotic hand-eye system[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1993, **9**(2): 152 - 165.
- [6] Wilson W J, Williams Hulls C C. Relative end-effector control using Cartesian position based visual servoing[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1996, **12**(5): 684 - 696.
- [7] Yoshimi B H, Allen P K. Alignment using an uncalibrated camera system[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1995, **11**(4): 516 - 521.
- [8] Kelly R, Ricardo Carelli. Stable visual servoing of camera-in-hand robotic systems[J]. IEEE/ASME Trans on Mechatronics, 2000, **5**(1): 39 - 48.
- [9] Jiang Wang, Williams J Wilson. 3D relative position and orientation estimation using kalman filter for robot control[A]. Proc IEEE Int Conf on robotics and Automation[C]. Nice, France: 1992. 2638 - 2645.
- [10] Koivo A J, Houshangi N. Real-time vision feedback for servoing robotic manipulator with self-tuning controller[J]. IEEE Trans on System, man and cybernetics, 1991, **21**(1): 134 - 142.
- [11] Nikolaos P. Papanikolopoulos, Nelson B J. Six-degree-of-freedom hand/eye visual tracking with uncertain parameters [J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1995, **11**(5): 725 - 732.
- [12] Smith C E, Nikolaos P Papanikolopoulos. Vision guided robotic grasping: issues and experiments[A]. Proc IEEE Int Conf. on robotics and Automation[C], Minneapolis, USA: 1996. 3203 - 3208.
- [13] Castano A, Hutchinsin S. Visual compliance: task-directed visual servo control[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1994, **10**(3): 334 - 342.
- [14] Tsuji T, Kaneko M. Noncontact impedance control for redundant manipulators using visual information[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1999, **29**(2): 184 - 193.
- [15] Nakabo Y, Ishikawa M. Visual impedance using 1 ms visual feedback system[A]. Proc IEEE Int Conf on Robotics and Automation[C]. 1998. 2333 - 2338.
- [16] Fernandes D G, Lima P U. A testbed for robotic visual servoing and catching of moving objects[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1998, **12**(5): 475 - 478.
- [17] Houshangi N. Control of a robotic manipulator to grasp a moving target using vision[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1990, **18**(3): 604 - 615.
- [18] Garrido R, Gonzalez E. An experimental study of predictors for visual servoing[A]. ISIE[C], 2000: 602 - 606.
- [19] 赵清杰, 连广宇. 机器人视觉伺服综述[J]. 控制与决策, 2001, **16**(6): 849 - 853.
- [20] 林靖, 陈辉堂. 机器人视觉伺服系统的研究[J]. 控制理论与应用, 2000, **17**(4): 476 - 481.
- [21] Hashimoto K, Nagahama K. A mode switching estimator for visual servoing[A]. Proc IEEE Int Conf on robotics and Automation[C], Washington, DC, USA: 2002, 1610 - 1615.
- [22] Nagahama K, Hashimoto K. Visual servoing based on object motion estimation[A]. Proc IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems[C]. 2000. 245 - 250.
- [23] Astolfi A, Liu Hsu. Two solutions to the adaptive visual servoing problem[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 2002, **18**(3): 387 - 392.
- [24] Liu Hsu, Ramon R Costa. Stable adaptive visual servoing for moving targets[A]. Proc. of the American Control Conf[C], Chicago, USA: 2000. 2008 - 2012.
- [25] Giorgio C. Buttazzo, Benedetto Allota. Mousebuster: A robot for real-time catching[J]. IEEE Control System Mag, 1994, **14**(1): 49 - 56.
- [26] Tarek Hamel, Robert Mahony. Visual servoing of an under-actuated

- dynamic rigid - body system: an image - based approach[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 2002, 18(2) : 187 - 198 .
- [27] Hashimoto K, Kimoto T. Manipulator control with imaged - based visual servo[A]. Proc IEEE Int . Conf on robotics and Automation[C]. California, USA: 1991 . 2267 - 2272
- [28] 苏剑波, 李耀通. 一种用于机器人的物体运动参数快速识别方法[J]. 自动化学报, 1994, 20(3) : 286 - 290 .
- [29] Hashimoto K, Noritsugu T. Performace and sensitivity in visual servoing [A]. Proc IEEE Int Conf on robotics and Automation[C]. Belgium, 1998 . 2321 - 2326 .
- [30] 潘且鲁, 苏剑波, 席裕庚. 眼在手上机器人手眼无标定三维视觉

- 跟踪[J]. 自动化学报, 2002, 28(3) : 371 - 377 .
- [31] Hiroaki, Nakai, Yasuhiro Taniguchi. A volleyball playing robot[A]. Proc IEEE Int Conf . on robotics and Automation[C]. Belgium, 1998 , 1083 - 1089 .

作者简介:

- 田梦倩 (1971-), 女, 讲师, 在读博士, 研究领域: 机电控制及自动化, 机器人技术.
- 罗翔 (1968-), 男, 讲师, 研究领域: 机器人技术.
- 黄惟一 (1933-), 男, 教授, 博士生导师, 研究领域: 机器人技术, 测试技术及仪器.

(上接第 538 页)

5 结论 (Conclusion)

这种机器人系统, 经实验验证可达到很好的控制精确度与响应灵敏度, 随着研究的深入, 它一定会在将来的自动焊接中达到满意的效果.

参考文献 (References)

- [1] 林尚扬等. 焊接机器人及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000 .
- [2] J B Wang, Z G Sun M. Intelligent wheeled mobile robot for spherical tank welding[A]. Mobile Robot XVI, SPIE[C]. Vol. 4573 245 - 255 .
- [3] 潘际奎. 现代弧焊控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000 .
- [4] 费跃农. 电弧传感器焊缝自动跟踪系统及电弧传感基础理论研究[D]. 清华大学: 博士论文, 1990 .

- [5] 熊震宇. 旋转电弧传感弧焊机器人焊缝纠偏智能控制系统[D]. 南昌大学: 博士学位论文, 2000 .5 .

作者简介:

- 张华 (1964-), 男, 南昌大学机器人与焊接自动化实验室教授, 博士, 博士生导师. 研究领域: 弧焊机器人智能化, 移动焊机器人, 焊接自动化等, 承担和完成多项国家和省级课题, 获江西省自然科学二等奖, 专利多项, 已发表学术论文六十多篇, 目前主持国家 863 计划, 国家自然科学基金项目.
- 王海东 (1978-), 男, 研究生. 研究领域: 全位置轮式机器人焊缝跟踪技术.

(上接第 547 页)

参考文献 (References)

- [1] 李宏超. 多智能体机器人系统(MARS)若干问题的研究[D]. 南开大学硕士学位论文: 李宏超, 2002 .
- [2] Kavraki L. E. Latombe J. C. Practical Motion Planning in Robotics : Current Approaches and Future Directions[M]. K. Gupta and A. del Pobil : John Wiley, 1998 .
- [3] Kavrak L. E. Svestka P. Latombe J. C. Overmars M. Probabilistic Roadmaps for Path Planning in High-Dimensional Configuration Spaces [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996 , 12(4) : 566 - 580 .
- [4] Song G. Amato N. M. Randomized Motion Planning for Car-like Robots

- with C-PRM[M]. Department of Computer Science Texas AM University, 2001 .
- [5] Shaffer C. A. Data Structures and Algorithm Analysis[M]. Prentice Hall, 1998 .

作者简介:

- 阙嘉岚 (1978-), 女, 硕士研究生. 研究领域: 智能控制.
- 丁贵涛 (1979-), 男, 硕士研究生. 研究领域: 智能信息处理.
- 黄亚楼 (1964-), 男, 博士生导师. 研究领域: 智能信息处理.