

# 检测与修补移动机械手系统的协调控制技术研究\*

李春书<sup>1</sup> 崔根群<sup>1</sup> 庞思红<sup>2</sup>

(1. 河北工业大学机械学院, 天津 300130) (2. 河北化工医药职业技术学院机电系, 石家庄 050026)

**摘要** 针对2自由度轮式移动载体与5自由度机械手组成的检测与修补移动机械手进行了运动分析及其控制技术的研究. 首先分析了移动机械手的结构特点, 描述了移动载体与机械手的动力耦合对机械手系统的性能影响. 其次, 根据移动机械手动力学的复杂性, 提出了移动机械手的运动控制策略, 建立了基于神经网络的移动机械手三层智能控制的体系结构, 底层是执行层, 中间层是处理层, 顶层是决策层. 处理层包括两个RBF神经网络子控制器, 未知的移动载体和机械手的动力学参数分别由各自的RBF神经网络辨识和补偿, 形成闭环逼近的控制. 应用Matlab编程软件对所建立的RBF神经网络进行训练仿真, 最后, 在实验环境中对移动机械手的运动进行了相关的实验验证. 实验结果验证了移动机械手完成相关任务的有效性和可靠性.

**关键词** 移动机械手, 非完整约束, 神经网络, 控制

## 引言

移动机械手系统由于移动载体的运动扩大了机械手的工作空间, 使得其同时具有移动和操作功能, 这使得其优于一般的移动机器人和传统机械手. 但由于移动载体和机械手具有不同的动力学特性, 而且存在强耦合, 因此, 移动机械手的运动协调控制成为许多学者关注的问题<sup>[1-4]</sup>. 如 Yamamoto<sup>[1]</sup> 推导了考虑耦合时系统的动力学模型, 并利用非线性反馈对耦合进行集中补偿, 通过仿真说明车体运动引起的对机械手的补偿力对跟踪精度有较大的影响, 而机械手运动引起的对车体的补偿力不能明显地减小跟踪误差, 这个仿真结果验证了车体的动力学响应比机械手慢的事实. 林义忠<sup>[5]</sup> 通过特定环境下的仿真表明, 无论移动载体是在匀速还是在加速的直线运动过程中, 只要机械手的关节在运动, 车体和机械手的驱动力或者驱动力矩之间就会相互影响, 从而影响移动机械手的轨迹跟踪和定位精度. 目前, 对于移动机械手系统的协调控制研究<sup>[4,6,7]</sup> 主要分为两类: 分散控制和集中控制. 分散控制可以使控制器的设计变得简单, 但由于子系统之间的耦合, 控制精度要受到一定的影响, 因此, 很多学者把移动平台和机械手看成一个整体研究系

统的协调控制问题.

由于轮式移动载体存在着非完整约束, 在集中控制时, 控制器必须考虑运动学约束、以及移动载体和机械手之间不同的动力学特性<sup>[6,7,8]</sup>. 所有这些的考虑会导致控制器变得复杂. 对于多自由度的轮式移动机械手系统, 采用集中控制可能会导致控制器变得异常复杂, 而且由于大量的计算负担也不易于在实际系统上实现.

本文所研究的用于检测与修补的P3-AT型移动机械手系统是由两自由度的轮式移动载体和五自由度的机械手组成, 因此, 为了提高移动机械手的使用性能, 保证其定位精度和轨迹跟踪精度, 本文将轮式移动机械手的运动分为以下两种情况考虑: (1) 在移动载体的运动过程中, 机械手只做适当位姿的调整, 不进行准确的轨迹操作, 当移动载体准确定位后, 机械手再进行精确的操作. 这一过程可将移动机械手简化为由两自由度的移动载体和三自由度机械手组成的系统; (2) 移动载体和机械手的运动是各自独立的, 即移动载体在运动过程中, 机械手始终保持稳定的位姿不变, 当移动载体定位后, 再调整机械手完成相应的操作.

## 1 移动机械手系统及其简化模型

## 1.1 移动机械手系统结构

图1(a)所示为用于检测与修补的P3-AT型移动机械手的侧视图,其由移动载体和机械手组成;图1(b)所示为轮式移动车体的仰视图.移动载体采用4轮形式,车体前面的两轮1、2分别由电机驱动,轮1与轮4、轮2与轮3之间分别由同步带连接,且传动比为1,这样轮1和轮4(轮2和轮3)就可以以相同的角速度转动.五自由度机械手由机座、腰部、大臂、小臂、手腕、末端执行器和驱动装置组成.机械手的五个关节均为转动关节,依次为腰部回转、大臂俯仰、小臂俯仰、手腕回转、手腕俯仰.

在移动机械手系统的运动分析中作如下假设:

- (1) 车轮与路面之间无滑动作纯滚动运动,车轮没有横向滑移;
- (2) 操作臂被刚性地连接在移动载体上;
- (3) 移动载体的运动只限于平面运动.

如图1所示, $O-XYZ$ 为全局坐标系, $O_C-X_C Y_C Z_C$ 是移动载体参考坐标系, $O_C$ 为其质心, $O_C$ 的位姿为 $(X_C, Y_C, \theta_C)$ ,其中 $(X_C, Y_C)$ 为 $O_C$ 在全局坐标系 $O-XYZ$ 的位置, $\theta_C$ 为移动载体的 $X_C$ 轴与 $X$ 轴间的夹角,即方向角.设 $l$ 为两驱动轮间距离, $b$ 为前、后轮间距离, $R$ 为驱动轮半径,车体的运动被限制在 $O-XY$ 平面, $X_C$ 轴为其纵轴. $O_B-X_B Y_B Z_B$ 为五自由度机械手的基座参考坐标系, $O_B$ 为操作手基座安装在移动载体上的位置, $X_B$ 轴、 $Y_B$ 轴、 $Z_B$ 轴分别平行于 $X_C$ 轴、 $Y_C$ 轴、 $Z_C$ 轴;操作手坐标系的建立按照 $D-H$ 规则依次建立,最终建立末端夹持器参考坐标系, $O_E$ 点表示机械手末端夹持器坐标系原点.定义 $q_p$ 、 $q_m$ 分别为移动载体、机械手的位姿向量, $\tau_p$ 为移动载体两前轮驱动力矩向量, $\tau_m$ 为机械手各关节驱动力矩向量.

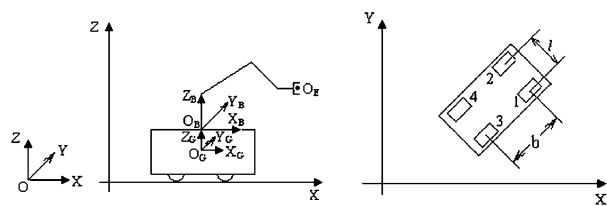


图1 轮式移动机械手系统结构模型

Fig. 1 Structure model of a wheeled mobile manipulator

## 1.2 系统的简化动力学模型

为了提高移动机械手的使用性能,在移动平台

的运动过程中,机械手的运动只考虑腰部的回转运动、大臂和小臂的俯仰运动,而不考虑手腕运动,将手腕看作与小臂一体的运动,即按3R机械手进行运动学和动力学分析.因此,将移动机械手系统简化为由两自由度的移动平台和三自由度机械手组成的系统.定义 $q = [q_p^T \quad q_m^T]^T$ 为移动机械手系统的位置向量, $\tau = [\tau_p^T \quad \tau_m^T]^T$ 为移动机械手系统的驱动力矩向量.

## 2 基于神经网络的移动机械手控制系统设计

### 2.1 移动机械手分层递阶智能控制策略

本文综合了分散控制和集中控制的特点,采用基于神经网络稳定自适应控制方法,将移动机械手的动力学模型分解为移动载体和机械手两个子模型,同时考虑了它们之间的动力学耦合和机器人运动时的运动学约束,如移动载体的非完整约束、机械手末端执行器跟踪特定空间轨迹时的约束.在此基础上,移动机械手控制器被分为两个子控制器,分别控制移动载体和机械手.

基于神经网络的分层递阶智能控制采用三层结构体系.顶层是决策层,它根据移动机械手的运动学模型进行任务规划,其分解了移动载体、机械手末端的期望轨迹.中间层是处理层,它包括两个RBF神经网络子控制器,未知的移动载体和机械手的动力学参数分别由各自的RBF神经网络辨识,然后补偿到输出的转矩中,形成闭环逼近的控制.底层是执行层,由它来独立控制移动载体驱动轮的电机和机械手各关节电机的转动.

### 2.2 基于神经网络的稳定自适应控制方法

移动机械手神经网络的稳定自适应控制方法,包括两个RBF神经网络,分别用来辨识未知的移动载体和机械手动力学的补偿 $\psi_1$ 、 $\psi_2$ . $\psi_1$ 、 $\psi_2$ 包含了移动载体和机械手的动力学耦合,以及来自外界不确定的干扰因素等.辨识后对控制器的输出力矩进行补偿.图2为其结构框图,表示了辨识、补偿的过程.本文采用李雅普诺夫稳定性设计方法,分别建立移动载体、机械手和移动机械手系统的李雅普诺夫方程<sup>[9]</sup>,由第二类李雅普诺夫方法(直接法)求得动力学补偿 $\psi_1$ 、 $\psi_2$ .两个RBF神经网络使用聚类方法训练求得网络的中心,而后使用最小二乘法求得网络的权值.

#### 2.2.1 移动载体的李雅普诺夫方程设计

考虑摩擦及扰动,移动载体的动力学方程可以表示为:

$$\tau_p = M_p(q_p)\dot{q}_p + C_p(q_p, \dot{q}_p)\dot{q}_p + F_1 + \tau_{d1} \quad (1)$$

式中  $M_p$  为移动载体广义质量矩阵,  $C_p$  为相关的位置和速度矩阵,  $F_1$  为包含了摩擦力和重力项向量、车体的扰动,以及机械手对车体的动力学干扰,这其中以机械手对车体的动力学干扰最为重要,对整体的运动学干扰也最大,因此需要补偿.  $\tau_{d1}$  为车体时变的非结构扰动力矩.

定义移动载体的速度跟踪误差  $z$  为:

$$z = \dot{q}_p - \alpha \quad (2)$$

其中  $\dot{q}_p$  为移动载体的速度向量,  $\alpha$  为期望轨迹速度向量. 则速度跟踪误差下的移动载体动力学方程为:

$$\tau_p = M_p\dot{z} + C_pz + F_1 + \tau_{d1} + M_p\dot{\alpha} + C_p\alpha \quad (3)$$

根据李雅普诺夫稳定设计,选择移动平台的李雅普诺夫方程  $V_1$  为:

$$V_1 = \frac{1}{2}z^T M_p z \quad (4)$$

则:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = z^T (\tau_p - F_1 - \tau_{d1} - M_p\dot{\alpha} - C_p\alpha) + \\ \frac{1}{2}z^T (\dot{M}_p - 2C_p)z \end{aligned} \quad (5)$$

### 2.2.2 机械手的李雅普诺夫方程设计

考虑摩擦及扰动,五自由度机械手的动力学方程可以表示为:

$$\tau_m = M_m(q_m)\dot{q}_m + C_m(q_m, \dot{q}_m)\dot{q}_m + G_m(q_m) + F_2 + \tau_{d2} \quad (6)$$

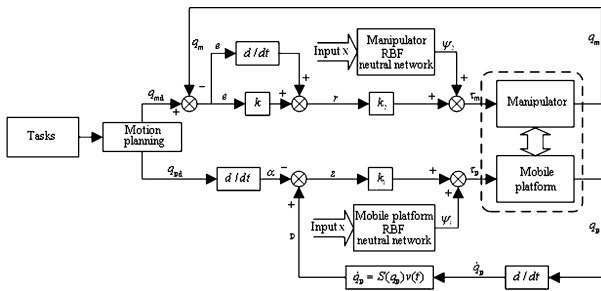


图 2 基于神经网络的移动机械手控制系统结构框图

Fig.2 Control architecture of mobile manipulator based on neural network

式中  $M_m$  为机械手广义质量矩阵,  $C_m$  为向心力及科氏力矩阵,  $G_m$  为重力矩阵,  $F_2$  为包含了摩擦力、机械手的扰动,以及车体对机械手的动力学干扰,  $\tau_{d2}$  为机械手时变的非结构扰动力矩.

定义机械手执行器的轨迹误差  $e$  为:

$$e = q_{md} - q_m \quad (7)$$

其中  $q_{md}$  为期望的位置向量,  $q_m$  为实际位置向量. 则轨迹误差  $e$  的导数为:

$$\dot{e} = \dot{q}_{md} - \dot{q}_m \quad (8)$$

过滤后的轨迹误差为:

$$r = \dot{e} + ke \quad (9)$$

这里  $k$  满足  $k = k^T > 0$ , 是一个对称向量系数矩阵. 可以将上式看作为一个关于  $r$  和  $e$  线性系统. 当  $r \rightarrow 0$  时,  $e \rightarrow 0$ .

选择机械手的李雅普诺夫方程为:

$$V_2 = \frac{1}{2}r^T M_m r \quad (10)$$

则有:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = r^T [ -\tau_m + M_m kr + (C_m - M_m k) ke + \\ F_2 + \tau_{d2} ] \end{aligned} \quad (11)$$

### 2.2.3 移动机械手系统的李雅普诺夫方程设计

选择移动机械手系统动力学的李雅普诺夫方程为:

$$V_3 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} z \\ -r \end{pmatrix}^T M \begin{pmatrix} z \\ -r \end{pmatrix} \quad (12)$$

上式表示了移动机械手系统动力学的特性,包含了车体的速度误差  $z$  和机械手的轨迹误差  $r$ .  $M$  为对称正定的惯性矩阵. 分解后可以写为:

$$V_3 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} z \\ -r \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} M_p & M_{pm} \\ M_{pm}^T & M_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z \\ -r \end{pmatrix}$$

将式(4)和式(10)代入上式得:

$$V_3 = V_1 + V_2 - r^T M_{pm}^T(z) \quad (13)$$

其导数为:

$$\dot{V}_3 = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 - \frac{d}{dt} [ r^T M_{pm}^T(z) ] \quad (14)$$

将式(5)和式(11)代入上式,整理得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 = z^T (\tau_p - \psi_1) + r^T ( -\tau_m + \psi_2 ) - z^T \tau_{d1} + r^T \tau_{d2} \end{aligned} \quad (15)$$

式中:

$$\begin{aligned} \psi_1 = M_p \dot{\alpha} + C_p \alpha + F_1 + (z)^T [ C_{pm} k e + \\ M_{pm} k (r - k e) ] \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \psi_2 = M_m k r + (C_m - M_m k) k e + F_2 + \\ M_{pm}(z) \dot{\alpha} + M_{pm} \dot{z} \alpha + C_{mp}(z) \alpha \end{aligned} \quad (17)$$

$\psi_1$ 、 $\psi_2$  分别表示了未知的移动载体和机械手的动力学项,包括移动载体和机械手的动力学耦

合、未知环境的干扰等。

### 2.3 RBF 神经网络的建立

两个 RBF 神经网络子控制器利用高斯函数作为神经网络的径向基函数,应用聚类方法训练求得网络的中心,应用最小二乘法求得网络的权值。

设  $x$  为 RBF 网络的输入向量:

$$x \equiv [q_{pd}^T \quad \alpha^T \quad \dot{\alpha}^T \quad z^T \quad e^T \quad r^T \quad q_{md}^T \quad \dot{q}_{md}^T \quad \ddot{q}_{md}^T]^T$$

式中  $q_{pd}$ 、 $\alpha$  和  $\dot{\alpha}$  分别表示了移动载体的期望轨迹、期望轨迹速度向量和加速度向量; $q_{md}$ 、 $\dot{q}_{md}$  和  $\ddot{q}_{md}$  分别表示机械手的期望位姿、期望速度和加速度向量矩阵。

选择高斯函数作为两个神经网络的径向基函数,用非监督学习(用 k-means 算法对样本输入进行聚类)确定 RBF 网络的中心,并根据数据中心之间的距离确定宽度,然后用最小二乘法直接计算出网络的权值<sup>[9]</sup>。通过此训练方法就可以得到 RBF 网络较合适的权值  $W$ 、中心  $c$  和宽度  $\sigma$ ,从而获得比较满意的逼近结果。

本文所建立的 RBF 神经网络是一个 9-h-7 的 3 层 RBF 网络,通过两个 RBF 网络辨识出未知的移动载体和机械手动力学补偿项  $\psi_1, \psi_2$ ,考虑移动载体和机械手间的动力耦合、未知环境的干扰等影响因素后,移动载体和机械手的输出力矩为:

$$\tau_p = k_1 z + \psi_1 \tag{18}$$

$$\tau_m = k_2 r + \psi_2 \tag{19}$$

由式(18)可以看出  $\tau_p$  由两部分组成:移动载体速度误差的线性反馈  $k_1 z$  及由 RBF 神经网络求得的未知移动平台动力学补偿项的  $\psi_1$ 。其中  $k_1$  速度误差反馈系数,可在试验中进行调整。

式(19)表明机械手的关节输入转矩向量  $\tau_m$  也由两部分组成:机械手的轨迹跟踪误差线性反馈  $k_2 r$  和由机械手 RBF 神经网络求得的未知的机械手动力学补偿项  $\psi_2$ 。 $k_2$  为轨迹误差反馈系数,也可在试验中进行调整。

## 3 模拟仿真与实验分析

### 3.1 RBF 神经网络仿真

采用 Matlab 对所建立的 RBF 网络进行仿真,如图 3 为输出的仿真结果,横轴表示测试样本,纵轴表示移动机械手关节力矩的值,“\*”是网络的输出。图 (a)、(b)、(c)、(d)、(e) 分别表示五自由度机械手各关节输出力矩,图(f)、(g) 分别表示

移动载体左、右驱动轮的力矩。

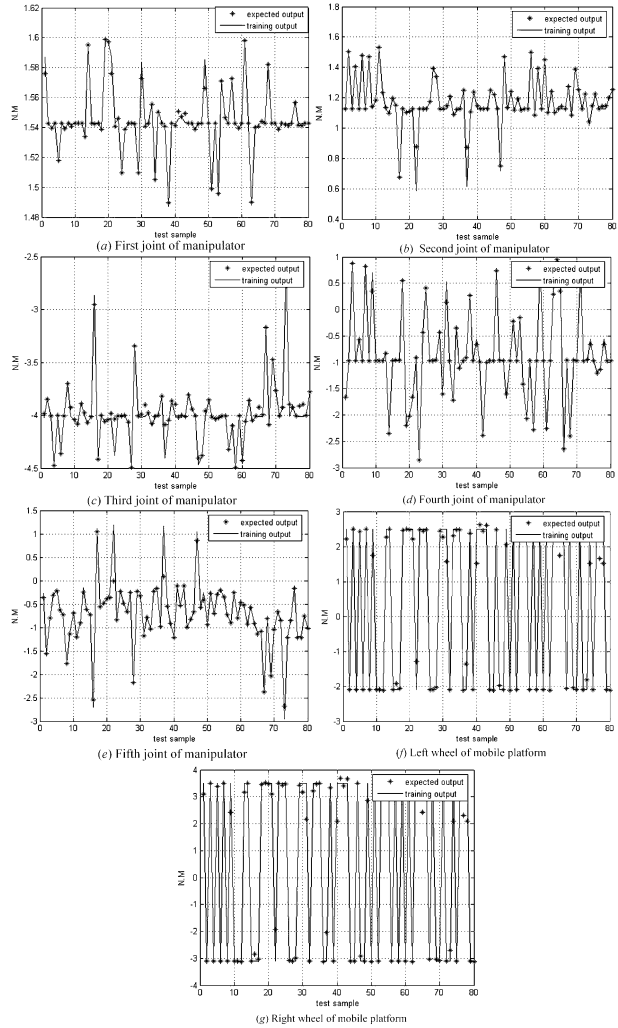


图 3 RBF 神经网络的仿真

Fig. 3 Simulation of RBF neural network

### 3.2 实验分析

本文所考虑的移动机械手实验环境和工作条件如图 4 所示,其中  $A$  点是起始和终止位置; $B$  为移动车体的运动路径和行进方向,它由一条直线和两条圆弧所组成; $C$  为可能发生泄露的圆形观察窗,它可能需要机械手进行喷液封堵; $D$  为紧固螺栓,将半球形化学反应器紧固于基座; $E$  为半球形化学反应器与基座的接缝,它可能发生有毒气体泄露。根据需要封堵部位的形状和位置,要求移动车体能行进直线和圆弧运动,机械手末端执行器能保持某种位姿沿直线、圆弧和圆轨迹进行运动。图 5 为移动机械手进行封堵接缝的任务。

移动机械手系统的运动规划分为三个方面:其一为移动机械手系统的协调运动,即移动载体在作直线行进的过程中,机械手作适当的位姿调整;其

二为机械手保持固定的位姿,移动载体按照一定的路径运动;其三为移动载体保持一定的位姿,而机械手作相应的轨迹运动.当移动载体与机械手作协调运动时,系统的动力学模型按简化的系统动力学模型处理.

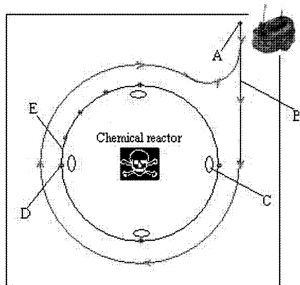


图4 移动机械手工作环境

Fig. 4 Mobile manipulator's workspace

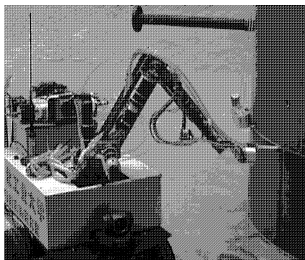


图5 移动机械手封堵接缝

Fig. 5 Mobile manipulator enveloping seam of reactor

实验表明<sup>[10]</sup>,在现场作业环境下,移动载体在全局坐标下各个方向上的自主定位精度小于5cm;机械手对目标的三维定位精度小于 $\pm 10\text{mm}$ ;最大封堵面积小于 $1\text{cm}^2$ ;完成封堵后,保压时间大于2分钟.实验过程中移动机械手运行稳定,封堵的效果良好,达到了预先设计要求.

## 4 结论

本文将移动机械手的运动分为两种形式来考虑:移动载体和机械手的运动是各自独立的;移动载体运动时机械手只作适当位姿的调整.为了提高移动机械手的使用性能和机械手的轨迹跟踪能力,本文提出了基于神经网络的移动机械手三层智能控制的体系结构.顶层是决策层,根据移动机械手的运动规划,提供机械手和移动载体的期望的轨迹;中间层是处理层,其包括两个RBF神经网络子控制器,未知的移动载体和机械手的动力学参数分别由各自的RBF神经网络辨识,然后补偿到输出的转矩中,形成闭环逼近的控制;底层是执行层,控

制移动载体和机械手各关节的电机转动.应用Matlab对所建立的RBF网络进行训练仿真,仿真结果表明了RBF神经网络的有效性和可靠性.在实验环境中对移动机械手的协调运动控制技术进行了相关的实验验证.实验结果验证了移动机械手完成相关任务的有效性和可靠性.

## 参 考 文 献

- 1 Y Yamamoto, X Yun. Effect of the dynamic interaction on coordinated control of mobile manipulators. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1996, 12(5): 816 ~ 824
- 2 Y Yamamoto, X Yun. A modular approach to dynamic modeling of a class of mobile manipulator. *International Journal of Robotic and Automation*, 1997, 12(2): 41 ~ 48
- 3 Yu Qing, Chen I-Ming. Variational-vector calculus formulation for dynamics of nonholonomic mobile manipulator system. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2001, 216 ~ 226
- 4 董文杰,徐文立.不确定非完整移动机械手的鲁棒控制.清华大学学报,2002,42(9): 1261 ~ 1264 (Dong Wenjie, Xu Wenli. Robust control of an uncertain nonholonomic mobile manipulator. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2002, 42(9): 1261 ~ 1264 (in Chinese))
- 5 林义忠.自主轮式移动机器人信号检测与智能控制.西安理工大学博士学位论文,2006,15 ~ 17 (Lin Yizhong. Signal measurement and intelligent control of an autonomous mobile robot. Ph. D. Thesis, Xi'an University of Technology, 2006, 15 ~ 17 (in Chinese))
- 6 Jindong Tan, Ning Xi. Integrated task planning and control for mobile manipulator. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Washington, DC, May 2002: 382 ~ 387
- 7 W S Yoo, J D Kim, S J Na. A study on a mobile platform-manipulator welding system for horizontal fillet joints. *Mechatronics*, 2001, 11: 853 ~ 868
- 8 王耀南,孙炜.机器人鲁棒轨迹跟踪控制系统.动力学与控制学报,2004,2(1): 75 ~ 81 (Wang Yaonan, Sun Wei. A robot robust trajectory tracking control system. *Journal of Dynamics and Control*, 2004, 2(1): 75 ~ 81 (in Chinese))
- 9 崔根群.用于危险品检测的移动机械手的运动性能分析及其控制.河北工业大学博士论文,2007,76 ~ 86 (Cui Genqun. Motion performance analysis and control of mobile manipulator for measurement and maintenance in dangerous

environment. Ph. D. Thesis, Hebei University of Technology, 2007: 76 ~ 86 (in Chinese))

10 Chengjun Ding, Ping Duan, Minglu Zhang. Based on Neu-

ral network for mobile manipulator coordination control. Proceedings of the 7th international conference on frontiers of design and manufacturing. Guangzhou, 2006: 239 ~ 242

## RESEARCH ON COORDINATION CONTROL TECHNOLOGY OF MOBILE MANIPULATOR FOR MEASUREMENT AND MAINTENANCE \*

Li Chunshu<sup>1</sup> Cui Genqun<sup>1</sup> Pang Sihong<sup>2</sup>

(1. The School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

(2. Hebei Chemical and Pharmaceutical college, Shijiazhuang 050026, China)

**Abstract** The mobile manipulator for measurement and maintenance consists of 2 DOF nonholonomic mobile platform and 5 DOF manipulator. The structure of mobile manipulator was described, and the interaction between mobile platform and manipulator was analyzed. Considering the complicated dynamic model of the mobile manipulator, the strategy of coordination-motion control for the mobile manipulator was presented. A hierarchical intelligent controller based on neural network was proposed for the coordinated control of the mobile manipulator, which consists of three levels: decision-making level, processing level and execution level. Processing level includes two RBF neural network controllers, in which unknown dynamic parameters of mobile platform and manipulator were identified and compensated in closed-loop control. Then RBF neural network training was completed by Matlab software. In the end, an experiment of mobile manipulator was accomplished. The experiment and simulation results show that the coordination control is effective and reliable.

**Key words** mobile manipulator, nonholonomic constraints, neural network, control