

# 履带式移动采摘机械手控制算法及仿真研究

张国华<sup>a</sup>,汪木兰<sup>a</sup>,贾茜<sup>a,b</sup>,魏浩然<sup>a</sup>

(南京工程学院 a. 江苏省先进数控技术重点实验室; b. 工业中心,江苏 南京 211167)

**摘要:**机械手的运动空间有限且相对固定,通过增设移动平台的移动机械手可弥补该不足。以履带式移动机械手为研究对象,对移动平台进行建模;推导出履带式移动机械手的运动学方程,针对移动平台和机械手分别设计了自适应模糊控制和 RBF 神经网络控制,利用 MATLAB 进行数字化仿真,并对实验数据进行分析,验证所提出算法的可行性。为农业机械工程化提供依据,也为履带式移动机械手的协调控制奠定基础。

**关键词:**履带式移动平台;采摘机械手;自适应模糊控制;RBF 神经网络控制

**中图分类号:**TP241.2;TP183;TP273+4 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)02-0171-05

## Control Algorithm and Simulation of Tracked Robot

ZHANG Guohua<sup>a</sup>, WANG Mulan<sup>a</sup>, JIA Qian<sup>a,b</sup>, WEI Haoran<sup>a</sup>

(a. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Numerical Control Technology; b. Industrial Center, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

**Abstract:** As the movement space of manipulator is limited and relatively fixed, the tracked manipulator by adding a mobile platform can make up for this deficiency. With the mobile tracked robot as the research object, the kinematic equation of the tracked robot is deduced by modeling the mobile platform. The adaptive fuzzy control and RBF neural network control are designed respectively by digital simulation through MATLAB. The analysis on the experimental data verifies the feasibility of the proposed algorithm, which provides a basis for the engineering of agricultural machinery, and lays the foundation for the coordinated control of tracked robot.

**Keywords:** tracked mobile platform; picking manipulator; fuzzy control; RBF neural network control

## 0 引言

在现代化农业生产中,农业机械化作为中心环节,它凝聚着现代科学技术的最新成果,与农业生物技术等农业技术相结合,可改变生产模式,提高劳动生产率。

农业机器人作为农业机械化的产物,在农业生产中起着关键性的作用。在当今老龄化加剧的社会背景下,单纯的手工水果采摘已不能满足需求,为解决农业采摘中的实际问题,采摘机器人的研究与应用已成为一种迫切需要。

为更好地实现农业采摘工作,研制了一种多用途履带式移动平台采摘机械手,将履带车与机械手结合起来。机械手进行一定的操作,履带车辆用于搬运和支撑机械手,这种组合极大地扩展了整个机器人的工作空间和应用范围<sup>[1-2]</sup>。但是由于履带车辆与机械手之间的相互作用,建立这种集成结构的运动学模型是一项具有挑战性的任务<sup>[3]</sup>。轮式移动机械手的建模、仿真和控制方面已有大量的研究报道,但对履带式移动机械手的研究较少<sup>[4]</sup>。PENG J Z 等人提出了一种自适应滑模跟踪控制器来处理位置跟踪的问题<sup>[5]</sup>,YAMAMOTO Y 等人将移动机械手的跟踪任务进行分解,分别完成移动平台的跟踪任务和机械手的跟踪任务,设计解耦控制器对移动机械手分别进行控制<sup>[6]</sup>。

本文主要介绍了履带式移动机械手的硬件结构组成,对履带式移动机械手模型进行了简化,对履带式移动机械手的运动控制进行设计与验证,实现履带式移动机械手的精确控制。

## 1 履带式移动平台采摘机械手结构及其建模

### 1.1 履带式移动平台采摘机械手系统结构

本文分析的履带式移动平台采摘机械手的车体为轻型履带车辆,由底盘、两条履带、两个驱动轮、两个支承轮和两个行星轮组成,如图 1(a)所示。两个驱动轮可以独立控制实现转向,两个行星轮由同一个电机驱动,保证两条轨道在配置变化时同步通过障碍物。本文研究的是履带式移动机械手在刚性水平面上的运动,因此行星轮被延长和锁定,它们可以被模拟成支撑轮。由于未研究移动平台的卸载问题,因此可以假定左右履带的横向滑移保持一致。此外,假设履带不能伸展,驱动轮和履带之间没有滑动。

为了方便将履带式移动平台采摘机械手的模型建立运动学模型,故将图 1(a)中埃夫特履带式移动机械手模型简化如图 1(b)所示。

**基金项目:**基础研究计划(自然科学基金)青年基金项目(BK20170766);南京市科技发展计划(农业科技攻关)资助项目(201505057)

**第一作者简介:**张国华(1995—),男,江苏盐城人,硕士研究生,研究方向为先进装备与智能制造技术。

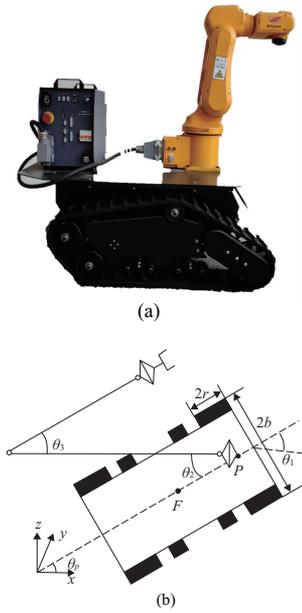


图1 履带式移动机械手及简化模型

### 1.2 运动学建模

履带式移动平台简化模型如图2所示,相关参数定义见表1。

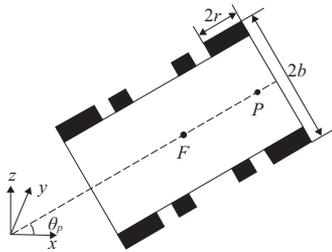


图2 移动平台简化模型

表1 履带式移动平台参数定义表

符号	名称
$F$	移动平台几何中心
$P$	驱动轮中心
$2b$	两个驱动轮距离
$r$	驱动轮半径
$\theta_p$	移动平台航向角
$\theta_1, \theta_2$	左、右轮转角
$v_1, v_2$	左、右轮速度
$v_p$	$P$ 的移动速度
$k_1, k_2$	左、右轮的滑动系数
$\omega$	平台角速度

根据表1中定义的参数得到履带式移动平台的速度为:

$$\begin{cases} v_1 = k_1 v_2 = k_1 r \dot{\theta}_l \\ v_2 = k_2 v_1 = k_2 r \dot{\theta}_r \end{cases} \quad (1)$$

$$v_p = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (2)$$

$$\omega = \dot{\theta}_p = \frac{-v_1 + v_2}{2b} \quad (3)$$

由式(3)可得履带式移动平台的运动模型为

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \\ \dot{\theta}_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{rk_1}{2} \cos\theta_p & \frac{rk_2}{2} \cos\theta_p \\ \frac{rk_1}{2} \sin\theta_p & \frac{rk_2}{2} \sin\theta_p \\ -\frac{rk_1}{2b} & \frac{rk_2}{2b} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta}_l \\ \dot{\theta}_r \end{pmatrix} \quad (4)$$

履带式移动平台的姿态由  $x_p, y_p, \theta_p$  控制。

机械手简化坐标图如图3所示,根据机械手坐标系建立机械手矩阵参数表如表2所示。

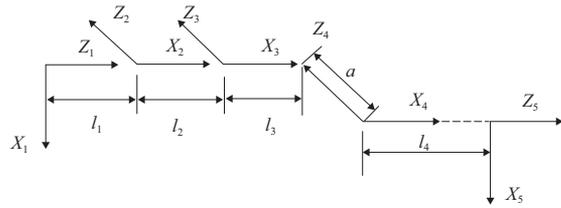


图3 机械手简化坐标图

表2 机械手矩阵参数表

关节臂序号	关节变量	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\alpha_i$	$a_i$
1	$\theta_1$	0	0	0	90	0
2	$\theta_2$	90	0	0	0	$l_2$
3	$\theta_3$	0	$l_2$	0	0	$l_3$
4	$\theta_4$	0	$l_3$	$-a$	-90	0
5	$\theta_5$	-90	0	0	0	0

将矩阵参数表中的参数代入得到每两个关节之间的变换矩阵  $R_i$ ,将各个  $R_i$  依次相乘,得到移动机械手的固定端和末端执行器的总变换齐次矩阵  $R$ 。各个变换矩阵和齐次矩阵如下:

$$R_1 = \begin{pmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R_2 = \begin{pmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R_3 = \begin{pmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & \alpha_2 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R_4 = \begin{pmatrix} \cos\theta_4 & -\sin\theta_4 & 0 & \alpha_3 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin\theta_4 & \cos\theta_4 & 0 & l_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R_5 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$${}^R A = \begin{pmatrix} U_x & V_x & W_x & P_x \\ U_y & V_y & W_y & P_y \\ U_z & V_z & W_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

其中:

$$l_1 = 0.01 \text{ m}, l_2 = 0.53 \text{ m}, l_3 = 0.5 \text{ m}, l_4 = 0.07 \text{ m}$$

$$U_x = \frac{1}{2} \times \cos(-\theta_5 - \theta_4 - \theta_3 - \theta_2 + \theta_1) + \frac{1}{2} \times \cos(\theta_5 + \theta_4 + \theta_3 + \theta_2 + \theta_1)$$

$$U_y = \frac{1}{2} \times \sin(\theta_5 + \theta_4 + \theta_3 + \theta_2 + \theta_1) + \frac{1}{2} \times \sin(-\theta_5 - \theta_4 - \theta_3 - \theta_2 + \theta_1)$$

$$U_z = \sin(\theta_5 + \theta_4 + \theta_3 + \theta_2)$$

$$V_x = \frac{1}{2} \times \sin(-\theta_5 - \theta_4 - \theta_3 - \theta_2 + \theta_1) + \frac{1}{2} \times \sin(\theta_5 + \theta_4 + \theta_3 + \theta_2 + \theta_1)$$

$$V_y = \frac{1}{2} \times \cos(\theta_5 + \theta_4 + \theta_3 + \theta_2 + \theta_1) + \frac{1}{2} \times \cos(-\theta_5 - \theta_4 - \theta_3 - \theta_2 + \theta_1)$$

$$V_z = \cos(\theta_5 + \theta_4 + \theta_3 + \theta_2)$$

$$W_x = \sin\theta_1, W_y = -\cos\theta_1, W_z = 0$$

$$P_x = 0.09 \times \sin\theta_1 + 0.25 \times \cos(-\theta_4 - \theta_3 - \theta_2 + \theta_1) + 0.25 \times \cos(\theta_4 + \theta_3 + \theta_2 + \theta_1) + 0.25 \times \cos(-\theta_3 - \theta_2 + \theta_1) + 0.25 \times \cos(\theta_3 + \theta_2 + \theta_1) + 0.2615 \times \cos(\theta_1 - \theta_2) + 0.2615 \times \cos(\theta_2 + \theta_1)$$

$$P_y = -0.09 \times \cos\theta_1 + 0.25 \times \sin(\theta_4 + \theta_3 + \theta_2 + \theta_1) + 0.25 \times \sin(-\theta_4 - \theta_3 - \theta_2 + \theta_1) + 0.25 \times \sin(\theta_3 + \theta_2 + \theta_1) + 0.25 \times \sin(-\theta_3 - \theta_2 + \theta_1) + 0.2615 \times \sin(\theta_1 + \theta_2) + 0.2615 \times \sin(\theta_1 - \theta_2)$$

$$P_z = 0.5\sin(\theta_4 + \theta_3 + \theta_2) + 0.5 \times \sin(\theta_3 + \theta_2) + 0.523 \times \sin\theta_2$$

由于关节 5 中  $\theta_5$  的运动只影响机械手的姿态,不影响其位置,故此处将其省略。该关节的长度加至关节 4 中,由上述公式推算可得机械手的空间位置由  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$  控制。

## 2 履带式移动平台的自适应模糊运动控制

### 2.1 模糊控制基本介绍

首先根据经验编写模糊控制规则,将测量控制对象的状态模糊化,得到的模糊值完成模糊推理后,将推理后的值进行非模糊化处理转化为非模糊值控制输出。基于模

糊集理论和人工经验,不需要数学模型,易于理解,鲁棒性好<sup>[7-8]</sup>。

### 2.2 履带式移动平台的自适应模糊运动控制策略

在平台控制中,分解为平台位置和姿态变量的控制。履带平台运动控制系统设计如图 4 所示。

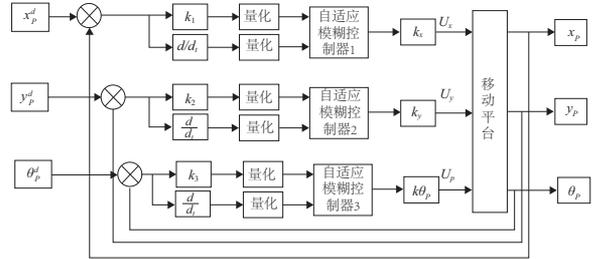


图 4 履带移动平台模糊控制示意图

为了实现了移动平台 3 个位置和姿态变量 ( $x_p, y_p, \theta_p$ ) 的控制内容,将二维自适应模糊控制器应用于该移动平台的控制系统。其中,  $U_x, U_y, U_p$  为 3 个控制器的输出,  $k_1, k_2, k_3$  为各变量的量化因子, ( $x_p^d, y_p^d, \theta_p^d$ ) 为履带式移动平台的理想期望位姿, ( $x_p, y_p, \theta_p$ ) 控制着履带移动平台的实际输出位姿。其中控制器采用直接自适应模糊控制,控制规则如图 5 所示。

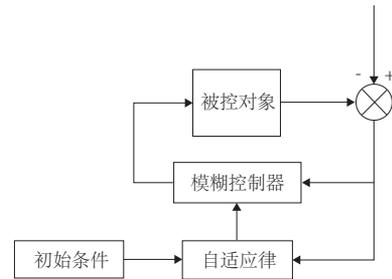


图 5 直接自适应模糊控制

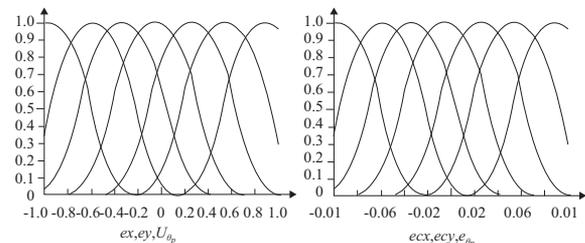
在控制器 1 中,  $e_x$  的论域是  $[-1, 1]$ ,  $ec_x$  的论域是  $[-0.1, 0.1]$ ,  $U_x$  的论域为  $[-3, 3]$ 。

在控制器 2 中,  $e_y$  的论域是  $[-1, 1]$ ,  $ec_y$  的论域是  $[-0.1, 0.1]$ ,  $U_y$  的论域为  $[-3, 3]$ 。

对于控制器 3 来说:  $e_{\theta_p}$  的论域是  $[-0.1, 0.1]$ ,  $ec_{\theta_p}$  的论域是  $[-0.01, 0.01]$ ,  $U_{\theta_p}$  的论域为  $[-1, 1]$ 。

考虑到系统的精度要求,各语言变量的量化水平设置为 11。每个语言变量域的模糊子集数为 7,分别为 NB、NM、NS、ZE、PS、PM、PB。

所选变量的具体隶属度函数如图 6 所示。



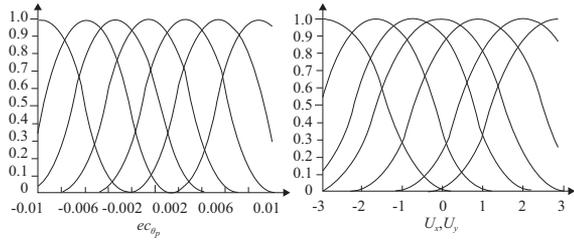


图6  $e_x, e_y, e_{\theta_p}, e_{c_x}, e_{c_y}, e_{c_{\theta_p}}, U_x, U_y, U_{\theta_p}$  隶属度函数图

为了提高系统稳态精度,增加模糊控制的分辨率,根据模糊控制的规则,通过对履带移动平台全部输入变量量化后的全部组合,根据特定的一些模糊推理进行具体计算,得出各个状态的输出<sup>[9]</sup>。模糊控制规则表如表3所示。

表3 履带移动平台自适应模糊控制规则表

输出变量	误差变化										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
-5	-5	-4	-4	-4	-4	-4	-3	-3	-3	-2	0
-4	-4	-4	-4	-4	-4	-3	-3	-2	-2	0	0
-3	-4	-4	-4	-4	-4	-3	-3	-2	0	0	1
-2	-4	-4	-3	-3	-3	-2	-2	0	1	1	2
-1	-4	-3	-3	-2	-2	-2	0	0	2	2	3
0	-4	-3	-3	-2	0	0	1	2	3	3	4
1	-3	-2	-2	0	0	1	2	3	3	4	4
2	-2	-1	0	1	2	2	3	4	4	4	4
3	-1	0	1	2	3	3	4	4	4	4	4
4	0	1	2	3	3	4	4	4	4	4	4
5	0	2	3	3	3	4	4	4	4	4	4

### 3 机械手的 RBF 神经网络自适应运动控制

#### 3.1 RBF 神经网络

RBF 神经网络是一种性能好、全局逼近且不受局部极小问题的前向网络模型。它分为三层:输入层、具有非线性 PBF 激活函数的隐层和线性输出层<sup>[10]</sup>。

利用 RBF 作为隐单元的“基”,形成隐层空间使输入向量直接映射到隐空间是 RBF 网络的基本思想。在确定 RBF 中心的同时也能够确定映射关系。神经网络的线性输出加权是和网络可调参数。可以看出,一般情况下,对于可调参数而言,网络的输出是线性的,但是网络从输入到输出的映射又是非线性的。利用线性方程组直接求解网络的权值,同时提升了学习的效率和速度,并且避免出现局部极小化问题。

#### 3.2 履带式移动平台的机械手 RBF 神经网络运动控制策略

机械手的控制器的设计如图7所示,其中  $\theta_{1d}, \theta_{2d}, \theta_{3d}, \theta_{4d}$  分别为关节1、2、3、4的转角期望值;  $e_1, e_2, e_3, e_4$  为各个关节的转角误差;  $u_1, u_2, u_3, u_4$  分别为神经网络控制器的输出;  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$  为4个关节的实际转角。

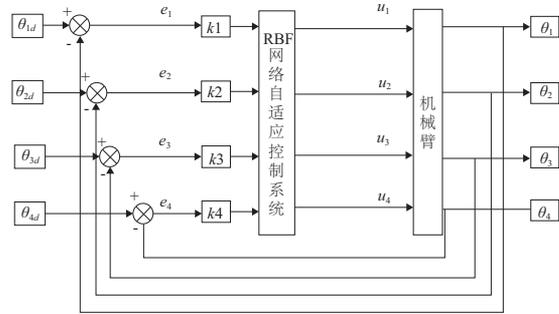


图7 机械手臂的控制器

RBF 神经网络的学习过程分为两个部分,一部分为无教师学习过程,另一部分为有教师学习过程。其过程如下:

a) 无教师学习:  $k$ -均值聚类算法在这一阶段,用于适当调整隐层的中心向量,即在训练过程中,对所有的向量进行分组,找到最佳的中心向量,使每个样本与中心的距离最小化。

1) 机械手关节角度跟踪误差:

$$e_i = \theta_{id} - \theta_i, i = 1, 2, 3, 4 \quad (5)$$

2) 控制器的目标函数:

$$E = \sum E_p = \frac{1}{2} \sum (q_d - q)^2 \quad (6)$$

3) 控制律设计:

$$\tau = \hat{f}_d(q) + k_e e_i + \gamma \quad (7)$$

其中:  $\hat{f}_d(q)$  为  $f(q)$  的逼近值;  $k_e$  为控制参数;  $\gamma$  为鲁棒项。

4) 在隐藏层设置初始值和学习率  $\eta(0)$ , ( $0 < \eta(0) < 1$ ) 和每个节点的阈值  $\varepsilon$ , 中心向量  $c_i(0)$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ )。

5) 欧氏距离确定, 求出最小距离节点

$$d_i(k) = \|x(k) - c_i(k-1)\|, \quad 1 \leq i \leq 4 \quad (8)$$

$$d_{\min}(k) = \min d_i(k) = d_r(k)$$

其中  $k$  是样本序数。

6) 调整中心

$$c_i(k) = c_i(k-1), \quad 1 \leq i \leq 4, i \neq r \quad (9)$$

$$c_r(k) = c_r(k-1) + \eta(k) [x(k) - c_r(k-1)]$$

其中  $\eta(k) = \eta(k-1) / [1 + \text{int}(k/q)]^{\frac{1}{2}}$ , 即每4个样本后, 学习率下降1次, 直至降为0。

7) 聚类质心判定

将所有样本重复进行上述过程, 直到样本满足  $J_e =$

$$\sum_{i=1}^4 \|x(k) - c_i(k)\| \leq \varepsilon \text{ 为止。}$$

b) 有教师学习: 确定中心向量  $c_i$  后, 对训练后的两层之间进行加权。权值  $w_{ki}$  的学习算法:

$$w_{ki}(k+1) = w_{ki}(k) + \eta(t_k - y_k) h_i(x) / H^T H$$

其中  $H = [h_1(x), h_2(x), h_3(x), h_4(x)]^T$ ,  $h_i(x)$  为高斯

基函数。

确定隐层参数后,对照样本,确定隐层和输出层的网络权值。

### 4 履带式移动平台采摘机械手的运动控制仿真分析

#### 4.1 履带式移动平台的运动控制仿真

选择通用性履带移动平台的车体尺寸,长度为 680 mm,宽度 405 mm,高度 270 m。规定移动平台只在水平面上运动,即  $Z_M(0) = 0$ 。以移动平台和机械臂连接点的轨迹作为参考点进行跟踪。事先设置一定的初始条件,才能有效地进行实验验证,此处的初始条件设置为:

$$x_p(0) = 0, y_p(0) = 0, \theta_p(0) = 0.014。$$

设置期望轨迹为:

$$x_p^d = \cos(\omega t), y_p^d = \sin(\omega t)。$$

实际跟踪控制轨迹运行结果如图 8 所示。图 9 为  $x$  方向和  $y$  方向的位置跟踪情况。其中,实线为  $x$  轴位置跟踪情况,虚线为  $y$  轴位置跟踪情况。

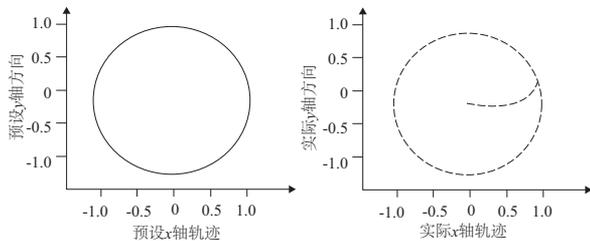


图 8 移动平台圆形轨迹的控制跟踪效果图

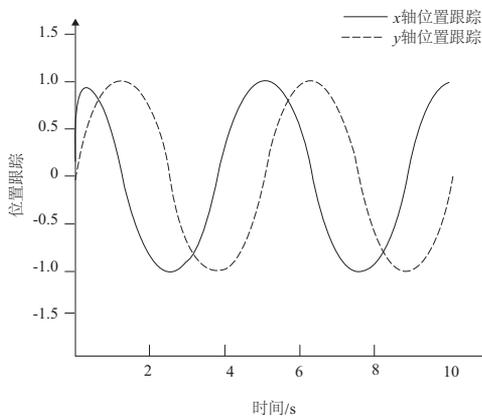


图 9 x、y 方向的位置跟踪情况

#### 4.2 机械手运动控制仿真

预先设定各关节角初始条件:  $q_{ov} = [1, 1]^T$ ,

$$\theta_1 = 0.2638, \theta_2 = 0.2572, \theta_3 = 0.7645, \theta_4 = 0.5122。$$

末端执行器初始位置,设置期望轨迹:  $x_e = \cos t, y_e = \sin t, z_e = 1$ 。机械手的 RBF 神经网络仿真结果如图 10 所示。图 11 为仿真过程中机械手  $x$  方向运动的位置误差,  $y、z$  方向的误差与  $x$  方向近乎相同。

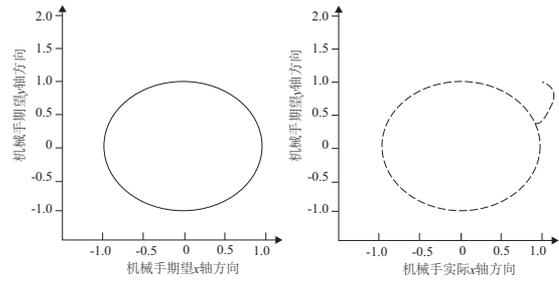


图 10 机械手的 RBF 神经网络仿真结果

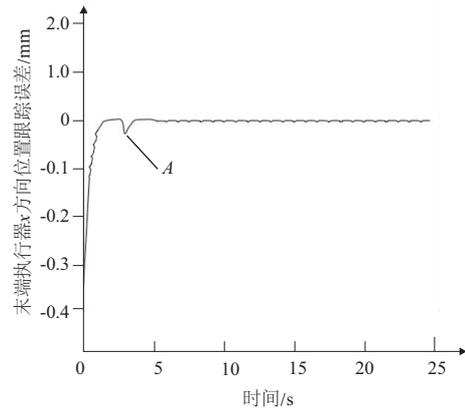


图 11 手臂 x 方向的位置误差

#### 4.3 履带移动平台及机械手的仿真数据分析

在  $x$  方向预期的理想情况为标准的余弦函数,在  $y$  方向预期的理想情况为标准的正弦函数。由图 8 看出,平台的实际运行路径基本上可以遵循预先设定的路径,过了起始位置,正常运行后运动误差在可控的波动范围内,满足系统的可控性。由此可见,基于自适应模糊控制器对履带移动平台的设计能够满足预定的控制要求,并完成相应的控制功能,是一种合理的设计方法。

由图 10 可以看到在初始位置之后机械手基本按照设定的预期轨迹进行运动。图 11 中,在 A 点之后,机械手的运动趋于稳定的预定轨迹中,且误差范围较小,基本可以满足预设的运动操作需求。由此可见,该算法是合理可行的,经过验证是有效的。

### 5 结语

使用 MATLAB 软件对履带式移动平台采摘机械手的运动控制问题进行了模拟验证分析。研究发现:自适应模糊控制和 RBF 神经网络控制算法可以对履带式移动平台和机械手进行精确控制,对履带式移动机械手模型进行了简化后,先计算履带式移动平台采摘机械手的运动学方程,再对履带式移动平台和机械手分别提出模糊控制和 RBF 神经网络控制,运用 MATLAB 对其进行了实验数据模拟仿真,最后对实验数据进行分析,分别验证了所提算法的可行性。该方法为农业机械工程化提供依据,也可为坦克等军用车辆的控制提供帮助。

(下转第 209 页)

## 4 结语

本文针对系统方程含有未知输入的情况,讨论了同时估计未知输入和状态的问题,针对经典滤波器的不足,提出一种新的三步迭代滤波器,其可以解决系统方程中未知输入系数矩阵不满秩时,经典滤波器无法使用的问题。仿真结果表明,新滤波器能够有效估计未知输入及系统状态。

### 参考文献:

- [1] KALMAN R E. A new approach to linear filtering and prediction problems[J]. Journal of Basic Engineering, 1960, 82(1): 35-45.
- [2] GAO Z Q. On the centrality of disturbance rejection in automatic control[J]. ISA Transactions, 2014, 53(4): 850-857.
- [3] GUO L, CAO S Y. Anti-disturbance control theory for systems with multiple disturbances: a survey[J]. ISA Transactions, 2014, 53(4): 846-849.
- [4] CHEN J, PATTON R J. Optimal filtering and robust fault diagnosis of stochastic systems with unknown disturbances[J]. IEE Proceedings-Control Theory and Applications, 1996, 143(1): 31-36.
- [5] 邹峰, 陈则王. 基于改进扩展卡尔曼滤波算法的锂离子电池荷电状态估计[J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(5): 130-133.
- [6] LI W, PAN J, LI Y, et al. A kalman filtering for linear discrete-time system with unknown inputs[C]. Proceedings of the 30th China Control and Decision Conference, 2018.
- [7] YONG S Z, ZHU M H, FRAZZOLI E. A unified filter for simultaneous input and state estimation of linear discrete-time stochastic systems[J]. Automatica, 2016, 63: 321-329.
- [8] SUNDARAM S, HADJICOSTIS C N. Optimal state estimators for linear systems with unknown inputs[C]// Proceedings of the 45th IEEE on Decision and Control, San Diego, CA, USA; IEEE, 2006: 4763-4768.

- [9] PAN S W, SU H Y, WANG H, et al. The study of joint input and state estimation with Kalman filtering[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2011, 33(8): 901-918.
- [10] YONG S Z, ZHU M H, FRAZZOLI E. Simultaneous input and state estimation for linear discrete-time stochastic systems with direct feedthrough[C]// 52nd IEEE Conference on Decision and Control. Firenze, Italy; IEEE, 2013: 7034-7039.
- [11] WANG H K, ZHAO J, XU Z H, et al. Input and state estimation for linear systems with a rank-deficient direct feedthrough matrix[J]. ISA Transactions, 2015, 57: 57-62.
- [12] GILLIJNS S, DE MOOR B. Unbiased minimum-variance input and state estimation for linear discrete-time systems[J]. Automatica, 2007, 43(1): 111-116.
- [13] KITANIDIS P K. Unbiased minimum-variance linear state estimation[J]. Automatica, 1987, 23(6): 775-778.
- [14] DAROUACH M, ZASADZINSKI M. Unbiased minimum variance estimation for systems with unknown exogenous inputs[J]. Automatica, 1997, 33(4): 717-719.
- [15] KERWIN W S, PRINCE J L. On the optimality of recursive unbiased state estimation with unknown inputs[J]. Automatica, 2000, 36(9): 1381-1383.
- [16] HSIEH C S. Robust two-stage Kalman filters for systems with unknown inputs[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2000, 45(12): 2374-2378.
- [17] GILLIJNS S, DE MOOR B. Unbiased minimum-variance input and state estimation for linear discrete-time systems[J]. Automatica, 2007, 43(1): 111-116.
- [18] KELLER J Y, DAROUACH M, CARMELLE L. Kalman filter with unknown inputs and robust two-stage filter[J]. International Journal of Systems Science, 1998, 29(1): 41-47.
- [19] 杜涛. 抗干扰滤波方法及在偏振组合导航系统的应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.

收稿日期: 2020-09-16

(上接第 175 页)

### 参考文献:

- [1] 王甲甲, 程志强, 张伏, 等. 果园采摘机械手研究现状综述[J]. 农机化研究, 2020, 42(5): 258-262.
- [2] 黄思姬, 欧屹, 陶卫军, 等. 履带式地面移动机器人动力学模型分析[J]. 机电工程, 2011, 28(3): 280-285.
- [3] LIU Y G, LIU G J. Modeling of tracked mobile manipulators with consideration of track terrain and vehicle manipulator interactions[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2009, 57(11): 1065-1074.
- [4] 辛洪兵, 乔绪维, 陈美钰, 等. 网络机器人控制系统中异构机器人接入技术的研究[J]. 制造业自动化, 2009, 31(7): 19-21, 24.
- [5] PENG J Z, YANG Z Q, WANG Y N, et al. Robust adaptive motion/force control scheme for crawler-type mobile manipulator with nonholonomic constraint based on sliding mode control

- approach[J]. ISA Transactions, 2019, 92: 166-179.
- [6] YAMAMOTO Y, YUN X P. Coordinating locomotion and manipulation of a mobile manipulator[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1994, 39(6): 1326-1332.
- [7] 卞永明, 杨濛, 刘宇超, 等. 履带式移动机器人轨迹跟踪控制技术[J]. 中国工程机械学报, 2018, 16(3): 189-193, 206.
- [8] 刘庆雪, 刘宁, 公茂法. 控制感应加热电源功率稳定的模糊控制方法[J]. 制造技术与机床, 2007(10): 56-59.
- [9] 董芃梅. 履带式移动机械手路径规划与运动控制[D]. 天津: 天津理工大学, 2012.
- [10] 罗进生, 袁喜林, 赵凯, 等. 模糊 PID 控制在伺服系统中的应用[J]. 机械设计与制造, 2013(5): 229-231, 234.

收稿日期: 2020-09-28