

PSS3-2-1 正交并联机构动平台的鲁棒快速跟踪控制

王洪瑞^{1,2}, 杨 毅^{1,3}, 李志强⁴, 王跃灵¹, 王洪斌¹

(1. 燕山大学工业计算机控制工程河北省重点实验室, 河北秦皇岛 066004; 2. 河北大学, 河北保定 071000;
3. 天津天大求实电力新技术股份有限公司, 天津 300384; 4. 河北科技师范学院, 河北秦皇岛 066004)

摘 要: 针对一种新型的六自由度的正交并联机构动平台, 设计一种应用于此运动平台的以闭环系统的鲁棒性作为目标的控制算法, 当平台在运动过程中受到一定程度的干扰时, 它可以使平台自主达到动态平衡, 并且该算法具有一定的实时性. 运用该控制算法对此运动平台的轨迹进行跟踪控制, 仿真实验结果证明, 所设计的这种控制算法对模型不精确或者外部干扰对该动平台产生最坏的影响有很好的抑制作用, 对 PSS 3-2-1 正交并联机构动平台轨迹跟踪具有响应速度快, 鲁棒稳定性好等优点.

关键词: 正交并联机构; 动力学模型; 稳定性; 鲁棒控制; 轨迹跟踪

中图分类号: TP 242

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2014)03-0517-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.03.015

Robust Fast Tracking Control of Moving Platform of PSS 3-2-1 Orthogonal Parallel Mechanism

WANG Hong-rui^{1,2}, YANG Yi^{1,3}, LI Zhi-qiang⁴, WANG Yue-ling¹, WANG Hong-bin¹

(1. Key Lab of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

2. College of Electronic and Information Engineering, Hebei University, Baoding, Hebei 071000, China;

3. Tianjin Great Realistic Power Technology Co., LTD, Tianjin 300384, China;

4. Hebei Normal University of Science and Technology, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract: According to a novel 6-DOF moving platform of orthogonal parallel mechanism, a control algorithm, which is aimed at the robustness of the closed loop system, is proposed to apply to that moving platform of PSS 3-2-1 orthogonal parallel mechanism. The platform can keep up with an independent dynamic equilibrium when it suffers the interference in a certain degree, and this algorithm is focused on being in real time. With the mentioned algorithm we tried to track and controll the track of the moving platform, the simulation experimental results certify that the presented algorithm has good inhibitory effect on the impact of inaccurate model and the external interference of this moving platform, and it has much more responsive and better robustness on tracking the track of PSS 3-2-1 moving platform of orthogonal parallel mechanism.

Key words: orthogonal parallel mechanism; dynamics model; stability; robust control; trajectory tracking

1 引言

PSS 3-2-1 正交并联机构动平台, 具有较好的刚性和定位能力, 强耦合, 非线性, 不确定性等特性. 而鲁棒控制是针对一种不确定性而被提出来的现代自动控制理论, 其基本特征是用一个结构和参数都固定不变的控制器, 来保证即使在不确定性对系统的性能品质影响处于最恶劣的状态时也能够满足设计要求. 近 20 年来正交并联机构动平台开始备受人们的关注, 越来越多的国内外学者开始从不同

的方向从事动平台技术的研究工作^[1,2]. 此平台具有灵活, 快捷等特点, 可以广泛运用到工业生产、医疗保健和文体娱乐等多个领域, 应用前景广阔.

本文以 PSS 3-2-1 正交并联机构动平台作为研究对象, 此机构已经建立了移动平台广义坐标 $X, Y, Z, \alpha, \beta, \gamma$ 与相应广义力之间的动力学模型, 并且给出了广义力与螺杆型运动转换机构驱动力之间的函数关系^[3-6], 从工程应用角度出发, 设计一种鲁棒控制器, 对动平台的运动过程进行跟踪, 提高动态跟踪精度.

2 动力学模型

图1为正交并联平台为 PSS 3-2-1 型平台.平台中的每个 PSS 运动链都构成一个分支,六个分支按照平台结构运动链数量 3,2,1 分为第一,第二,第三组,分别于动平台的 3 个相互垂直的平面相连.

平台结构如图 2 所示,第一组支链的球铰中心(B_1)位于平面的中心,第二组支链的球铰中心(B_2, B_3)分布在过平面中心,以平面上下两边平行的线段端点上.第三组支链的球铰中心(B_4, B_5, B_6)分布在以平面中心为中心的等腰三角形的三个顶点上.

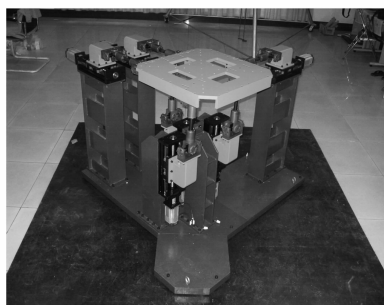


图1 PSS 3-2-1型正交并联平台

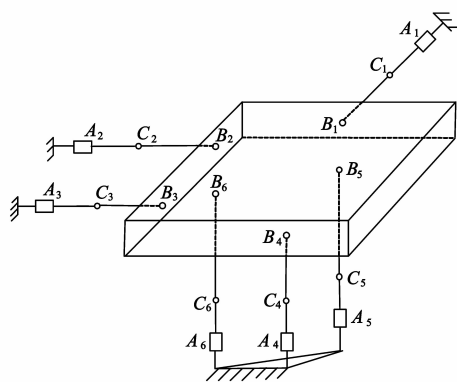


图2 PSS 3-2-1型平台图解

基于拉格朗日动力学所建立的运动平台的动态模型一般可以改写成如下形式:

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (1)$$

其中, $q, \dot{q}, \ddot{q} \in R^n$ 为机器人各关节的位置、速度和和加速度向量; τ 为广义力矩向量; $M(q) \in R^{n \times n}$ 为惯性矩阵; $V(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$ 为离心力和哥氏力矩阵; $G(q) \in R^n$ 为重力项矩阵.

在位于上平台质心的坐标系 $Cxyz$ 中将原点 C 的相对于基座标 X_C, Y_C, Z_C 和绕各坐标轴转动的角度 γ, β, α , 定义为广义坐标, 即:

$$\begin{aligned} q_1 &= X_C, q_2 = Y_C, q_3 = Z_C, \\ q_4 &= \gamma, q_5 = \beta, q_6 = \alpha \end{aligned} \quad (2)$$

第二类拉格朗日方程^[4]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i \quad (i = 1, \dots, s) \quad (3)$$

式中, T 为系统的动能, q_i 和 $\dot{q}_i$ 分别为广义坐标和速度, Q_i 为广义力.

动能表达式为:

$$T = \frac{1}{2} (M\dot{X}_C^2 + M\dot{Y}_C^2 + M\dot{Z}_C^2 + J_x\dot{w}_x^2 + J_y\dot{w}_y^2 + J_z\dot{w}_z^2) \quad (4)$$

根据动平台动能和势能表达式, 可以确定方程中的系数.

$$M(q) = \begin{bmatrix} m_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_{44} & M_{45} & M_{46} \\ 0 & 0 & 0 & M_{54} & M_{55} & M_{56} \\ 0 & 0 & 0 & M_{64} & M_{65} & M_{66} \end{bmatrix}$$

其中:

$$\begin{aligned} M_{44} &= J_x \cos \beta \sin \alpha \\ M_{45} &= -J_y \cos \beta \sin \alpha \\ M_{46} &= J_z \sin \beta \\ M_{54} &= -J_x \sin \alpha \\ M_{55} &= J_y \cos \alpha \\ M_{56} &= 0 \\ M_{64} &= 0 \\ M_{65} &= 0 \\ M_{66} &= J_z \end{aligned}$$

$$V(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & V_{44} & V_{45} & V_{46} \\ 0 & 0 & 0 & V_{54} & V_{55} & V_{56} \\ 0 & 0 & 0 & V_{64} & V_{65} & V_{66} \end{bmatrix}$$

其中:

$$\begin{aligned} V_{44} &= (J_z - J_x) \cos \beta \sin \alpha \dot{\alpha} \\ V_{45} &= -(J_y - J_z) \cos \alpha \dot{\alpha} \\ V_{46} &= 0 \\ V_{54} &= -(J_z - J_y) \cos \alpha \dot{\alpha} \\ V_{55} &= -(J_y - J_x) \sin \alpha \dot{\alpha} \\ V_{56} &= 0 \\ V_{64} &= 0 \\ V_{65} &= -(J_x - J_y) \dot{\gamma} \\ V_{66} &= 0 \end{aligned}$$

$$G(q) = [0 \ 0 \ Mg \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

3 鲁棒控制器设计与稳定性分析

3.1 鲁棒控制器的设计

运动平台的动态模型如式(1), 一般具有以下物理

特征^[7,8]:

(1) 正定性

对于任意的 q , 惯性矩阵 M 都是正定的.

(2) 有界性

M 和 V 对于所有的 $q, \dot{q}$ 都是一致有界的, 就是说存在正数 λ_m, λ_M 和正定函数 $\xi(\dot{q})$, 使得:

$$0 < \lambda_m I \leq M(q) \leq \lambda_M I \quad (5)$$

$$V^T(q, \dot{q}) V(q, \dot{q}) \leq \xi(\dot{q}) I \quad (6)$$

对于任意的 $q, \dot{q}$ 成立.

(3) 斜对称性

矩阵函数 $\dot{M}(q) - 2V(q, \dot{q})$ 对于任意的 q 和 $\dot{q}$ 是斜对称的, 即对于任意向量 ζ , 有

$$\zeta^T \{ \dot{M}(q) - 2V(q, \dot{q}) \} \zeta = 0 \quad (7)$$

(4) 线性特征

机器人的数学模型对于物理参数是线性的, 即如果将矩阵函数 M, V, G 中的定常系数表示为一个向量 Θ , 那么可以定义适当的矩阵 $\varphi(q, \dot{q}, v, a)$, 使得:

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \varphi(q, \dot{q}, v, a)\Theta \quad (8)$$

设计运动平台的期望运动轨迹由时间函数 $\ddot{q}_d, \dot{q}_d, q_d$ 描述. 机器人的轨迹跟踪控制问题要求设计反馈控制器, 使得机器人的运动渐进的趋近于期望轨迹, 即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \{ q(t) - q_d(t) \} = 0 \quad (9)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \{ \dot{q}(t) - \dot{q}_d(t) \} = 0$$

考虑机器人系统中的模型误差和外部干扰来设计机器人的鲁棒轨迹跟踪控制器^[9]. 考虑了模型误差和外部干扰的机器人的动态模型为

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + \Delta(q, \dot{q}) + d = \tau \quad (10)$$

式中, d 表示外界干扰信号, 未知非线性函数向量 $\Delta(q, \dot{q})$ 表示模型误差^[10].

定义跟踪误差为 $e = q - q_d$. 首先进行非线性补偿, 令

$$\tau = u + M(q)\ddot{q}_d + V(q, \dot{q})\dot{q}_d + G(q) \quad (11)$$

式中, u 为控制器的输出.

将式(10)代入式(11)可得到系统的误差动态方程为

$$M(q)\ddot{e} + V(q, \dot{q})\dot{e} + \Delta(q, \dot{q}) + d = u \quad (12)$$

鲁棒控制方法采用如图 3 所示的控制系统结构:

由于机器人的内部模型误差和受到的外界干扰一般都是有界的, 因此可以将它们统一看作一个有界的不确定性因素 Δf , 然后设计控制器 u 来消除其影响^[11~13].

对于式(12)中描述机器人误差动态方程, 令 $\Delta f(q, \dot{q}) = \Delta(q, \dot{q}) + d$, 则式(12)可改写成

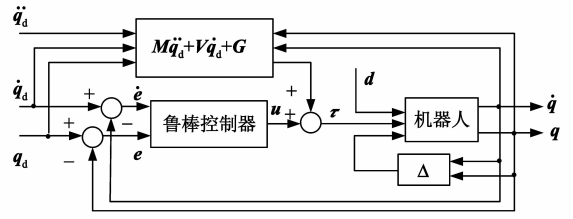


图3 运动平台的鲁棒控制系统

$$M(q)\ddot{e} + V(q, \dot{q})\dot{e} + \Delta f(q, \dot{q}) = u \quad (13)$$

则机器人的鲁棒跟踪控制器问题可以描述为通过设计反馈控制器

$$u = \alpha(q_d, \dot{q}_d, e, \dot{e}) \quad (14)$$

使式(13)和式(14)构成的误差反馈闭环系统满足稳定性要求.

3.2 系统稳定性分析

定理 1 设存在正定函数 $v(q, \dot{q})$, 使得对于任意 $\Delta f(q, \dot{q})$ 下式成立:

$$\| \Delta f(q, \dot{q}) \| \leq v(q, \dot{q}) \quad (15)$$

令反馈控制器为

$$u = -K\xi - \omega - v \quad (16)$$

其中:

$$\xi = \dot{e} + \varsigma e \quad (\varsigma > 0 \text{ 为给定常数})$$

$$\omega = M(q)\varsigma \dot{e} + V(q, \dot{q})\varsigma e$$

$$v = \frac{\xi v^2(q, \dot{q})}{\| \xi \| v(q, \dot{q}) + \varsigma} \quad (\varsigma > 0 \text{ 为给定常数})$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_6 \end{bmatrix}$$

($k_1 > 0, k_2 > 0, k_3 > 0, k_4 > 0, k_5 > 0, k_6 > 0$ 为给定常数)

则对任意初始误差 $e(0)$, 闭环系统式(13)、式(16)的解 $e(t)$ 是一致终值有界的, 即该系统是稳定的.

证明: 令 $\xi = \dot{e} + \varsigma e, \dot{\xi} = \ddot{e} + \varsigma \dot{e}$, 则式(13)可描述为

$$M(q)(\dot{\xi} - \varsigma \dot{e}) + V(q, \dot{q})(\xi - \varsigma e) + \Delta f(q, \dot{q}) = u$$

令 $\omega = M(q)\varsigma \dot{e} + V(q, \dot{q})\varsigma e$, 则

$$M(q)\dot{\xi} = -V(q, \dot{q})\xi + \omega - \Delta f(q, \dot{q}) + u \quad (17)$$

定义正定函数

$$H(t, \xi) = \frac{1}{2} \xi^T M(q) \xi \quad (18)$$

由惯性矩阵的有界性, 可知

$$0 < \lambda_m J \leq M(q) \leq \lambda_M J$$

则

$$\frac{\lambda_m}{2} \|\xi\|^2 \leq \frac{1}{2} \xi^T M(q) \xi \leq \frac{\lambda_M}{2} \|\xi\|^2$$

令 $\lambda_a = \frac{\lambda_m}{2}$, $\lambda_b = \frac{\lambda_M}{2}$, 有

$$\lambda_a \|\xi\|^2 \leq H(\xi) \leq \lambda_b \|\xi\|^2 \quad (19)$$

沿方程式(18)求 $H(t, \xi)$ 对时间 t 的微分, 得

$$\begin{aligned} \dot{H}(t, \xi) &= \xi^T M \dot{\xi} + \frac{1}{2} \xi^T \dot{M} \xi \\ &= \xi^T \{\omega - \Delta f(q, \dot{q}) + u\} + \frac{1}{2} \xi^T \{\dot{M} - 2V(q, \dot{q})\} \xi \end{aligned}$$

由机器人动态特性的斜对称性, 式(7)可知:

$$\xi^T \{\dot{M} - 2V(q, \dot{q})\} \xi = 0$$

因此

$$\begin{aligned} \dot{H}(t, \xi) &= \xi^T \{\omega + u\} - \xi^T \Delta f(q, \dot{q}) \\ &\leq \xi^T \{\omega + u\} + \|\xi^T \Delta f(q, \dot{q})\| \end{aligned}$$

由式(9)和柯西不等式

$$|x^T y| \leq \|x\| \cdot \|y\|$$

可得

$$\begin{aligned} \dot{H}(t, \xi) &\leq \xi^T \{\omega + u\} + \|\xi\| \cdot \|\Delta f(q, \dot{q})\| \\ &\leq \xi^T \{\omega + u\} + \|\xi\| v(q, \dot{q}) \end{aligned}$$

将式(10)代入上式, 则

$$\begin{aligned} \dot{H}(t, \xi) &\leq -\xi^T K \xi - \xi^T v + \|\xi\| \cdot v(q, \dot{q}) \\ &= -\xi^T K \xi + \frac{\xi v(q, \dot{q})}{\|\xi\| \cdot v(q, \dot{q}) + \sigma} \cdot \sigma \end{aligned}$$

令 $\lambda_c = \min(k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6)$

$$\dot{H}(t, \xi) \leq -\lambda_c \|\xi\|^2 + \sigma \quad (20)$$

根据式(19)和式(20)可知, 系统式(16)、式(17)满足

$$\|\xi(t)\|^2 \leq \frac{\lambda_b}{\lambda_a} \|\xi(0)\|^2 e^{-\lambda t} + \frac{\sigma}{\lambda_a \lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (21)$$

其中

$$\lambda = \frac{\lambda_c}{\lambda_b}$$

下面由式(21)证明跟踪误差的终值有界性. 因为 $\xi = \dot{e} + \zeta e$, 所以

$$e(t) = e(0)e^{-\zeta t} + \int_0^t e^{-\zeta(t-s)} \xi(s) ds$$

假设 $e(t)$ 的各分量为 $e_i(t)$ $i \in [1, 6]$, 则上式等价于

$$e_i(t) = e_i(0)e^{-\zeta t} + \int_0^t e^{-\zeta(t-s)} \xi_i(s) ds$$

上式两边取绝对值, 得

$$|e_i(t)| = |e_i(0)| e^{-\zeta t} + \int_0^t e^{-\zeta(t-s)} |\xi_i(s)| ds$$

将跟踪误差求和, 并利用范数的性质

$$\|e(t)\| \leq \sum_{i=1}^6 |e_i(t)| \quad (i = 1, 2, \dots, 6)$$

$$|e_i(t)| \leq \|e(t)\| \quad (i = 1, 2, \dots, 6)$$

$$|\xi_i(t)| \leq \|\xi(t)\| \quad (i = 1, 2, \dots, 6)$$

得

$$\|e(t)\| \leq 6 \|e(t)\| e^{-\zeta t} + 6 \int_0^t e^{-\zeta(t-s)} \|\xi(s)\| ds \quad (22)$$

根据式(21)得

$$\begin{aligned} \|\xi(t)\| &\leq A + B e^{-\lambda t} \\ \|\xi(t)\| &\leq \sqrt{A + B e^{-\lambda t}} \leq \sqrt{A} + \sqrt{|B|} e^{-\lambda \frac{t}{2}} \quad (23) \end{aligned}$$

其中

$$A = \frac{\sigma}{\lambda_a \lambda}$$

$$B = \frac{\lambda_b}{\lambda_a} \|\xi(0)\|^2 - \frac{\sigma}{\lambda_a \lambda}$$

将式(23)代入式(22), 得

$$\begin{aligned} \|e(t)\| &\leq \|e(0)\| e^{-\zeta t} \\ &+ 6 \int_0^t e^{-\zeta(t-s)} (\sqrt{A} + \sqrt{|B|} e^{-\lambda \frac{s}{2}}) ds \\ &= 6 \|e(0)\| e^{-\zeta t} + 6 \sqrt{A} \int_0^t e^{-\zeta(t-s)} ds + \\ &6 \sqrt{|B|} \int_0^t e^{-\zeta(t-s)} \cdot e^{-\lambda \frac{s}{2}} ds \\ &= 6 \|e(0)\| e^{-\zeta t} + \frac{6 \sqrt{A}}{\zeta} (1 - e^{-\zeta t}) + \\ &\frac{12 \sqrt{|B|}}{2\zeta - \lambda} (e^{-\frac{\lambda}{2}t} - e^{-\zeta t}) \end{aligned}$$

即

$$\|e(t)\| \leq e^{-\zeta t} + N e^{-\frac{\lambda}{2}t} + C \quad (24)$$

从式(24)可知, t 充分大后, 跟踪误差的范数将小于等于 C , 定理 1 得证.

在式(23)中,

$$C = \frac{6 \sqrt{A}}{\zeta} = 6 \frac{1}{\zeta} \sqrt{\frac{\sigma}{\lambda_a \lambda}} \quad (25)$$

因此, 为了获得较好的控制效果, 在设计鲁棒控制率式(10)时, 应选择较大的 ζ , $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ 和较小的 σ .

另外, 由式(20)的推导过程可知, 若系统的不确定性为零, 即 $v(q, \dot{q}) = 0$, 则 $v = 0$, 此时, 式(20)便成为

$$\dot{H}(t, \xi) \leq -\lambda_c \|\xi\|^2 \quad (26)$$

而 $\sigma = 0$, 相应的 $C = 0$. 这意味着对于机器人标称模型, 在控制率式(10)的作用下, 跟踪误差是一致渐进趋近零的.

4 仿真研究

为了证明鲁棒控制方法的有效性, 对此正交并联机构动平台进行仿真实验.

令此平台的运动初始条件为:

$$q(0) = [0.5 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5]^T \text{ rad}$$

$$\dot{q}(0) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \text{ rad/s}$$

$$\ddot{\mathbf{q}}(0) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \text{rad/s}^2$$

期望轨迹为:

$$\mathbf{q}_d(t) = [\cos\pi t, \sin\pi t, -\cos\pi t, -\sin\pi t, \cos\pi t, \sin\pi t]^T$$

$$\dot{\mathbf{q}}_d(t) = [-\pi\sin\pi t, \pi\cos\pi t, \pi\sin\pi t, -\pi\cos\pi t, -\pi\sin\pi t, \pi\cos\pi t]^T$$

$$\ddot{\mathbf{q}}_d(t) = [-\pi^2\cos\pi t, -\pi^2\sin\pi t, \pi^2\cos\pi t, \pi^2\sin\pi t, -\pi^2\cos\pi t, -\pi^2\sin\pi t]^T$$

鲁棒控制律增益取 $k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = k_5 = k_6 = 60$ 并取 $\zeta = 120, \sigma = 0.01$, 模型误差的界函数取 $\nu(\mathbf{e}, \dot{\mathbf{e}}) = 2.5 \tanh(1.8 \|\dot{\xi}\|)$.

图 4~图 9 分别为六个轴的轨迹跟踪仿真曲线图. 由图可知, 当被控系统受到外部干扰、不确定性影响以及当自身模型测量存在误差时, 采用本文所提方案能够实现较好的鲁棒控制性能. 该方案对提高系统的动态性能和提高整个控制系统的效率起到了很好的作用, 满足了工程应用的需要.

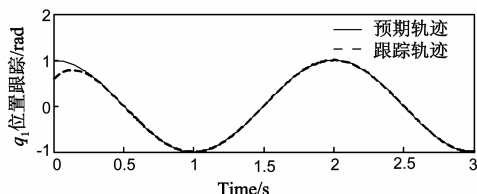


图4 第1轴的轨迹跟踪

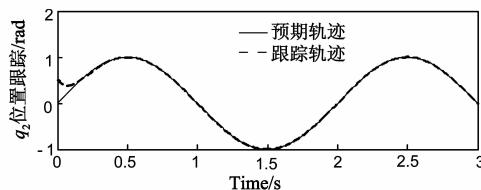


图5 第2轴的轨迹跟踪

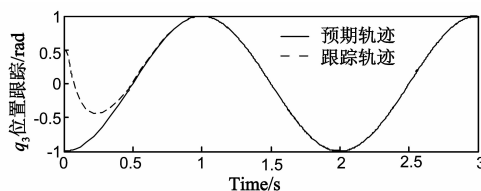


图6 第3轴的轨迹跟踪

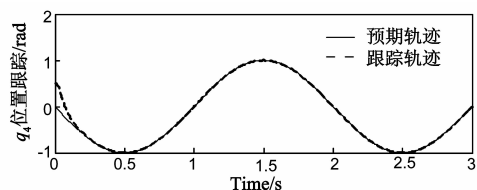


图7 第4轴的轨迹跟踪

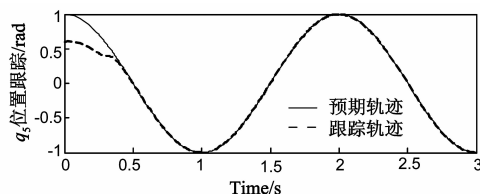


图8 第5轴的轨迹跟踪

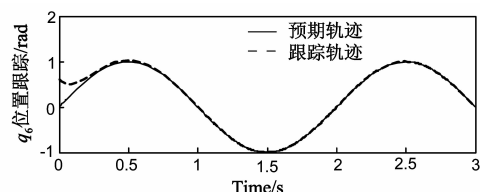


图9 第6轴的轨迹跟踪

5 结论

本文基于 PSS 3-2-1 正交并联机构动平台提出了一种鲁棒跟踪控制算法, 这种算法可以大大降低系统的不确定性, 提高系统的暂态性能, 通过对六个轴在任意时间变化的快速跟踪, 证明了该控制算法的有效性. 该控制算法可以广泛应用于飞行模拟器、天文望远镜跟踪定位系统以及动感娱乐平台等系统.

参考文献

- [1] Jun P, Zhen L, Jianbin W. Dynamic analysis of planar parallel robot based on multi-agent [A]. Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 2011 Third International Conference [C]. Shanghai: IEEE, 2011. 1108 - 1111.
- [2] 李允明. 国外仿人机器人发展概况[J]. 机器人, 2005, 27(6): 561 - 568
- [3] 曹政才, 赵应涛, 吴启迪. 基于 Backstepping 和神经动力学的非完整移动机器人点镇定[J]. 电子学报, 2011, 39(3): 591-595.
- Cao Zhengcai, Zhao Yingtao, Wu Qidi. Point stabilization of a nonholonomic mobile robot based on backstepping and neural dynamics[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(3): 591 - 595. (in Chinese)
- [4] 王洪瑞. 载人六自由度并联机器人与虚拟环境的智能交互控制研究[R]. 保定: 河北大学, 2011.
- [5] Jian ming Ma, Dacheng Cong, Qitao Huang, Junwei Han. Accurate tracking control strategy of harmonic motion of 6-DOF motion simulator [A]. Integration Technology, 2007. ICIT '07. IEEE International Conference on [C]. Shenzhen: IEEE, 2007, 534 - 537.
- [6] Yang min Li, Qing song Xu. Design and development of a medical parallel robot for cardiopulmonary resuscitation [J]. IEEE Robotics and Automation Society, 2007, 12(3): 265 - 273
- [7] 王德进. 一类非线性不确定时滞系统时滞依赖鲁棒干扰抑制[J]. 控制与决策, 2004, 19(6): 675 - 679.
- [8] Li feng MA, Zi dong WANG, Xue min CHEN, Zhi GUO. Robust control for a class of nonlinear networked systems with

- stochastic communication delays via sliding mode conception [J]. Journal of Control Theory and Applications, 2010, 8(1): 34 – 39
- [9] Kang Yu, Xi Hongsheng, Zhang Dali, Ji Haibo. Robust and nonfragile H_∞ control for a class of uncertain jump linear systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2006, 32(3): 438 – 443
- [10] 谢仑, 王志良, 王冲. 一种类人机器人步行鲁棒控制器[J]. 机器人, 2010, 32(4): 484 – 490
- [11] 陈 ■, 刘飞. 时变不确定系统鲁棒控制器设计的新方法[J]. 控制与决策, 2009, 24(4): 583 – 586.
- [12] Duan Guangren, Zhang Biao. Robust control system design using proportional plus partial derivative state feedback[J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(5): 506 – 510
- [13] P Seiler, R Sengupta. An H_∞ approach to networked control [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(3): 356 – 364

作者简介

王洪瑞 男, 1956 出生, 博士, 教授. 主要研究方向为冶金自动化、机器人控制技术.

E-mail: 1006300202@qq.com

杨 毅 女, 1986 出生, 硕士, 主要研究方向为并联机器人控制技术及新能源发电技术.

E-mail: tdqs_yy@sina.com

李志强 男, 1977 出生, 硕士, 助理研究员. 主要研究方向智能控制技术.

E-mail: lzqwork@163.com

王跃灵 男, 1979 出生, 博士, 讲师. 机器人控制技术、主要研究方向为智能控制.

E-mail: yuelingw@ysu.edu.cn

王洪斌 男, 1966 出生, 博士, 主要研究方向为生产过程自动化、机器人控制技术、鲁棒控制、视觉伺服等.

E-mail: hb_wang@ysu.edu.cn