

文章编号: 1000-8152(2008)05-0867-06

六自由度并联机器人分散鲁棒非线性控制

赵东亚^{1,3}, 李少远¹, 高峰²

(1. 上海交通大学自动化系, 上海 200240; 2. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240;
3. 中国石油大学机电工程学院, 山东 东营 257061)

摘要: 针对六自由度并联机器人动力学特点, 提出了一种新型分散鲁棒非线性控制方法. 与传统PD控制策略和已有分散鲁棒非线性控制方法相比, 由于控制律中增加了广义误差的小数幂项, 改进后的方法除保持原方法的优点外, 还具有较强的终端收敛能力, 能够保证跟踪误差以更快的速度全局一致收敛到一个更小的剩余集. 通过选择合适的控制器参数, 可使剩余集趋于0. 运用Lyapunov方法分析了系统稳定性, 给出了系统稳定性条件. 最后, 仿真结果验证了该方法的有效性.

关键词: 鲁棒控制; 分散控制; 非线性控制; 机器人控制
中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Decentralized robust nonlinear control for six-degrees-of-freedom parallel robots

ZHAO Dong-ya^{1,3}, LI Shao-yuan¹, GAO Feng²

(1. Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
3. College of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum, Dongying Shandong 257061, China)

Abstract: A new decentralized robust nonlinear control approach is proposed for the six-degrees-of-freedom parallel robot. In comparison with the proportional-differential (PD) and existing robust nonlinear control schemes, the proposed approach shows the strong terminal convergence ability in addition to the advantages of the existing robust nonlinear control scheme. This approach guarantees faster convergence and higher tracking precision than the existing ones. By selecting appropriate parameters of the controller, the residual set will approach to zero. The stabilized conditions and corresponding proof are also presented. Simulation results are demonstrated in support of the proposed control scheme.

Key words: robust control; decentralized control; nonlinear control; robot control

1 引言(Introduction)

并联机器人是学术界研究的热点问题之一^[1], 与串联机器人相比, 并联机器人具有刚度大、承载能力高、精度高、结构紧凑、速度和加速度高等优点, 特别适合作为超大型构件和超大载荷的执行机构^[2,3]. 作为一个结构复杂、多变量、多自由度、多参数耦合的非线性系统, 并联机器人控制策略、控制方法的研究极其复杂^[4]. 由于PD控制器结构简单、计算量小, 多为工业机器人采用. 可以证明, 当反馈增益足够大时, PD控制律可以保证 L_∞ 稳定^[5~7]. 然而机器人PD控制只能实现局部稳定, 控制器设计不够灵活, 过大的反馈增益易激发系统高频动态^[8~10]. 分散控制器计算简单, 硬件成本低, 是现代工业机器人

采用的主要控制手段^[11]. 针对串联机器人, 文献[8, 9]在PD控制的基础上提出了一种分散鲁棒非线性控制方法, 该方法可以保证跟踪误差全局一致收敛到一个较小的剩余集. 六自由度并联机器人结构是并联机构中最一般的形式, 集中了绝大多数并联机器人运动学和动力学特点, 针对六自由度并联机器人提出的控制算法可以推广应用于其他各种类型并联机器人. 在文献[8, 9]的启发下, 根据并联机器人多输入多输出特点, 本文提出了一种新型分散鲁棒非线性控制方法. 与PD控制方法和文献[8, 9]提出的分散鲁棒非线性控制方法相比, 改进后的方法除保持原方法的优点外, 还具有较强的终端收敛能力, 能够保证更快的收敛速率和更高的跟踪精度. 通过选择

收稿日期: 2007-03-12; 收修改稿日期: 2007-12-28.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60534020, 60774015); 高校博士点基金资助项目(20060248001); 上海市科委资助项目(07JC14016, 06ZR14044).

合适的控制器参数,可使剩余集趋于0.该方法结构简单,计算效率高,能够在不改变控制系统硬件的前提下应用于其他类型工业并联机器人.

2 六自由度并联机器人动力学模型 (Dynamic model of six-degrees-of-freedom parallel robot)

六自由度并联机器人是由6根支腿将上下两个平台连接而成的一种机构,6根支腿可以独立自由伸缩,结构见图1.使用自然正交补方法建立六自由度并联机器人动力学模型.经简化,可得到与串联机器人相似的动力学模型^[12,13]:

$$M(q)\ddot{q} + H_m(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + f(\dot{q}) = \tau, \quad (1)$$

其中: $M(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是正定对称惯性矩阵; $H_m(q, \dot{q})\dot{q} \in \mathbb{R}^n$ 是哥氏力和向心力向量; $g(q) \in \mathbb{R}^n$ 是重力向量; $f(\dot{q}) \in \mathbb{R}^n$ 是摩擦力向量; $q \in \mathbb{R}^n$ 是广义坐标向量(杆长); $\tau \in \mathbb{R}^n$ 是广义力向量(杆力).式中 $H_m(q, \dot{q})\dot{q}$ 可表示为:

$$H_m(q, \dot{q})\dot{q} = (I_n \otimes \dot{q}^T) H_v(q)\dot{q}, \quad (2)$$

式中: $H_m(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $H_v(q) = [H_1^T(q), \dots, H_n^T(q)]^T \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $H_i(q) = H_i^T(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$, \otimes 代表Kronecker积.对于六自由度并联机器人 $n = 6$.

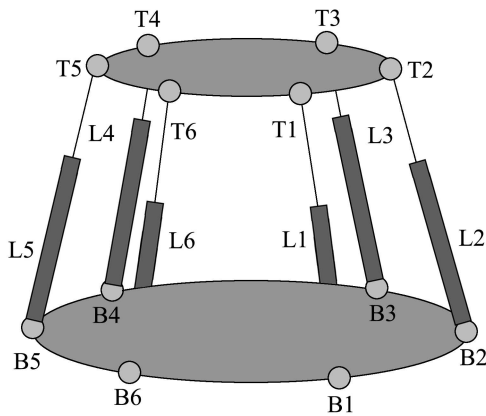


图1 并联机器人结构简图

Fig. 1 Configuration diagram of parallel robot

设 $q_d \in \mathbb{R}^n$ 是期望轨迹向量,则位置误差向量定义为:

$$e = q_d - q. \quad (3)$$

定义广义误差向量^[14]:

$$r = \dot{e} + \Lambda e, \quad (4)$$

其中 $\Lambda = \text{diag}\{\lambda_1, \dots, \lambda_n\}$ 是常数矩阵, $\lambda_i > 0$. 利用 r 的定义,式(1)可以写成如下误差动力学方程:

$$M(q)\dot{r} + H_m(q, \dot{q})r = -\tau + \xi, \quad (5)$$

式中:

$$\begin{aligned} \xi &= M(q)(\ddot{q}_d + \Lambda \dot{e}) + \\ &H_m(q, \dot{q})(\dot{q}_d + \Lambda e) + g(q) + f(\dot{q}). \end{aligned} \quad (6)$$

根据并联机器人动力学特点作如下假设^[11~13]:

假设 1 存在 $\mu_{\min}, \mu_{\max} > 0$, 使得 $\mu_{\min}I \leq M(q) \leq \mu_{\max}I$.

假设 2 存在 $c_H > 0$, 使得 $\|H_v(q)\| \leq c_H$.

假设 3 存在 $c_g > 0$, 使得 $\|g(q)\| \leq c_g$.

假设 4 存在 $f_{\max} = \max_{i \in n} \{f_i\}$, 使得 $\|f(\dot{q})\| \leq f_{\max}(\dot{q})$.

假设 5 $\frac{1}{2}\dot{M}(q) - H_m$ 是斜对称矩阵, 即:

$$x^T \left[\frac{1}{2}\dot{M}(q) - H_m \right] x = 0, x = [x_1, \dots, x_n]^T.$$

为明确表达分散控制系统结构,定义式(5)第 i 部分为误差动力学方程的第 i 个子系统:

$$\sum_{j=1}^n m_{ij}(q)\dot{r}_j + \dot{q}^T H_i(q)r = -\tau_i + \xi_i, \quad (7)$$

式中 m_{ij} 是惯性矩阵 $M(q)$ 的第 ij 个元素, $i, j = 1, \dots, n$, ξ_i 表示子系统之间的干涉,其表达式如下:

$$\begin{aligned} \xi_i &= \sum_{j=1}^n m_{ij}(\ddot{q}_{dj} + \lambda_j \dot{e}_j) + \\ &\dot{q}^T H_i(q)(\dot{q}_d + \Lambda e) + g_i + f_i. \end{aligned} \quad (8)$$

注 1 各子系统控制输入 τ_i 相互独立. 子系统之间的广义误差 r_i 相互耦合. 稳定性证明中,使用假设5可以处理 r_i 间的紧耦合.

注 2 本文中, $\|\cdot\|$ 对向量表示2-范数,对矩阵表示诱导范数, $\|\cdot\|_{\infty}$ 表示 ∞ -范数.

3 分散鲁棒非线性控制 (Decentralized robust nonlinear control)

针对闭环系统(5) (6)设计如下分散鲁棒非线性控制器:

$$\tau_i = u_i + \gamma_i r_i^{\alpha}, \quad (9a)$$

$$u_i = k_i r_i + v_i r_i + \rho_i r_i^3, \quad (9b)$$

式中: $k_i, v_i, \rho_i, \gamma_i > 0, 1 > \alpha > 0, i = 1, \dots, n$.

当 $r_i < 0$ 时, $r_i^{\alpha} \notin \mathbb{R}$, 取 $|r_i|^{\alpha} \text{sign } r_i$ 代替式(9a)中的 r_i^{α} , 式(9a)可写为:

$$\tau_i = u_i + \gamma_i |r_i|^{\alpha} \text{sign } r_i. \quad (9c)$$

定义 Truncated L_{∞} 范数^[8,9]:

$$\|x\|_{T_{\infty}} = \max_{i \in n} \sup_{t \in [0, T]} |x_i|. \quad (10)$$

引理 1 ^[8,9] 对式(6)中的 ξ , 存在

$$\begin{cases} \beta_1 = a_1 + a_2 \|e_0\|_\infty + a_3 \|A\|_\infty \|e_0\|_\infty + \\ \quad a_4 \|A\|_\infty \|e_0\|_\infty^2, \\ \beta_2 = a_2 \|A\|_\infty^{-1} + a_3 + 2a_4 \|e_0\|_\infty, \\ \beta_3 = a_4 \|A\|_\infty^{-1}, \end{cases} \quad (11a)$$

$$\begin{cases} a_1 = c_H \|\dot{q}_d\|_{T_\infty}^2 + f_{\max} \|\dot{q}_d\|_{T_\infty} + \\ \quad \mu_{\max} \|\ddot{q}_d\|_{T_\infty} + c_g, \\ a_2 = c_H \|\dot{q}_d\|_{T_\infty} \|A\|_\infty, \\ a_3 = c_H \|\dot{q}_d\|_{T_\infty} + \mu_{\max} \|A\|_\infty + f_{\max}, \\ a_4 = c_H \|A\|_\infty, \end{cases} \quad (11b)$$

使得 $\|\xi\|_{T_\infty} \leq \beta_1 + \beta_2 \|r\|_{T_\infty} + \beta_3 \|r\|_{T_\infty}^2$, 式中 e_0 为系统有界 0 输入响应, 即 $e_0 = e(t_0)$.

引理 2 [8,9] 考虑向量函数 $x, y \in C^n [t_0, T]$, 下列不等式成立:

$$\left| \sum_{i=1}^n x_i^{2k} \right|_{T_\infty} \geq \|x\|_{T_\infty}^{2k}, \quad (12a)$$

$$|x^T y|_{T_\infty} \leq n \|x\|_{T_\infty} \|y\|_{T_\infty}, \quad (12b)$$

式中 $k = 1, 2, \dots$.

定理 1 考虑误差动力学方程(5)(6), 选择控制律(9a)~(9c), 如果 $k_{\min} > 0, v_{\min} > 0, \rho_{\min} > n\beta_3/2, \gamma_{\min} > 0, 1 > \alpha > 0$, 那么跟踪误差以不低于 $\exp(-\zeta_c t)$ 的速度全局一致收敛到一个剩余集:

$$\Omega_{fc} = \left\{ r : \|r\|^2 \leq 2\eta_c / (\zeta_c \lambda_{\min}(M)) \right\}, \quad (13a)$$

$$\zeta_c = \frac{2(k_{\min} + N\gamma_{\min})}{\|M\|_\infty}, \quad (13b)$$

$$\eta_c = \frac{n^2(2\beta_2 + \beta_3)^2}{8(2\rho_{\min} - n\beta_3)} + \frac{n\beta_1^2}{4v_{\min}},$$

如果控制器参数选取合适, 可使剩余集 $\Omega_{fc} \rightarrow 0$.

证 分两步进行.

第 1 步 证明 $r_i(t)$ 有界.

选取 Lyapunov 函数为:

$$V_1(r) = \frac{1}{2} r^T M(q) r. \quad (14)$$

沿闭环系统(5)对时间 t 求导, 代入控制律(9b), 使用假设 5 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(r) &= -r^T K r - \sum_{i=1}^n (v_i r_i^2 + \rho_i r_i^4) + r^T \xi \leq \\ &-r^T K r - \sum_{i=1}^n (v_{\min} r_i^2 + \rho_{\min} r_i^4) + r^T \xi. \end{aligned} \quad (15)$$

运用 Truncated L_∞ 范数, 虑引理 1 和引理 2, 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(r_T) &\leq -k_{\min} \|r\|_{T_\infty}^2 - v_{\min} \|r\|_{T_\infty}^2 - \frac{\rho_{\min}}{n} \|r\|_{T_\infty}^4 + \\ &n\beta_1 \|r\|_{T_\infty} + n\beta_2 \|r\|_{T_\infty}^2 + n\beta_3 \|r\|_{T_\infty}^3. \end{aligned} \quad (16)$$

由于

$$\begin{aligned} 2\|r\|_{T_\infty} &< 1 + \|r\|_{T_\infty}^2, \\ \beta_3 \|r\|_{T_\infty}^3 &\leq \beta_3 (\|r\|_{T_\infty}^2 + \|r\|_{T_\infty}^4) / 2, \end{aligned}$$

则(16)满足下式:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(r_T) &\leq \\ &-k_{\min} \|r\|_{T_\infty}^2 + (n\beta_2 + \frac{n\beta_3}{2}) \|r\|_{T_\infty}^2 - \\ &v_{\min} \|r\|_{T_\infty}^2 + n\beta_1 \|r\|_{T_\infty} - (\rho_{\min} - \frac{n\beta_3}{2}) \|r\|_{T_\infty}^4. \end{aligned} \quad (17)$$

分别对式(17)中的第 2 项和第 5 项、第 3 项和第 4 项配方, 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(r_T) &\leq \\ &-k_{\min} \|r\|_{T_\infty}^2 - (\sqrt{v_{\min}} \|r\|_{T_\infty} - \frac{n\beta_1}{2\sqrt{v_{\min}}})^2 - \\ &(\sqrt{\rho_{\min} - n\beta_3} \|r\|_{T_\infty} - \frac{\sqrt{2n}(2\beta_2 + \beta_3)}{4\sqrt{2\rho_{\min} - n\beta_3}})^2 + \\ &\frac{n^2(2\beta_2 + \beta_3)^2}{8(2\rho_{\min} - n\beta_3)} + \frac{n^2\beta_1^2}{4v_{\min}} \leq \\ &-k_{\min} \|r\|_{T_\infty}^2 + \frac{n^2(2\beta_2 + \beta_3)^2}{8(2\rho_{\min} - n\beta_3)} + \frac{n^2\beta_1^2}{4v_{\min}} \leq \\ &-\tilde{\zeta}_c V_1(r_T) + \eta_c, \end{aligned} \quad (18)$$

式中:

$$\begin{aligned} \tilde{\zeta}_c &= \frac{2k_{\min}}{\|M\|_\infty}, \\ \eta_c &= \frac{n^2(2\beta_2 + \beta_3)^2}{8(2\rho_{\min} - n\beta_3)} + \frac{n\beta_1^2}{4v_{\min}}. \end{aligned}$$

该式表明当 $t > T$ 后, $\lambda_{\min}(M) \|r\|^2 \leq 2V_1(r) \leq 2\eta_c / \tilde{\zeta}_c$, 即 $\|r\|^2 \leq 2\eta_c / (\tilde{\zeta}_c \lambda_{\min}(M))$, r 有界.

第 2 步 证明 r 收敛到一个更小的剩余集内, 通过选择合适的控制器参数, 可使剩余集趋于 0.

选取 Lyapunov 函数为:

$$V_2(r) = \frac{1}{2} r^T M(q) r, \quad (19)$$

当 $\|r\|_{T_\infty} > 1$ 时, $|r_i|^\alpha \ll |r_i|^3$, 控制律(9c)中第 1 项起作用. 当 $\|r\|_{T_\infty} < 1$ 时, $|r_i|^\alpha \gg |r_i|^3$, 控制律(9c)中第 2 项起主要作用. 选取合适的控制器参数 k_{\min}, v_{\min} 和 ρ_{\min} , 使 $\|r\|_{T_\infty} < 1$, 沿闭环系统(5)对时间 t 求导, 代入控制律(9c), 在第 1 步的基础上, 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(r) &= \\ &-r^T K r - \sum_{i=1}^n (v_i r_i^2 + \rho_i r_i^4) - \\ &\sum_{i=1}^n \gamma_i r_i |r_i|^\alpha \text{sign}(r_i) + r^T \xi = \\ &-r^T K r - \sum_{i=1}^n (v_i r_i^2 + \rho_i r_i^4) - \sum_{i=1}^n \gamma_i |r_i|^{1+\alpha} + r^T \xi \leq \end{aligned}$$

$$-\sum_{i=1}^n |r_i| (k_{\min} |r_i| + \gamma_{\min} |r_i|^\alpha) - \sum_{i=1}^n (v_{\min} r_i^2 + \rho_{\min} r_i^4) + r^T \xi. \quad (20)$$

设 $N = |r_i|^\alpha / |r_i|$, 式(20)可写为:

$$\dot{V}_2(r) \leq -\sum_{i=1}^n (k_{\min} + N\gamma_{\min}) |r_i|^2 - \sum_{i=1}^n (v_{\min} r_i^2 + \rho_{\min} r_i^4) + r^T \xi. \quad (21)$$

运用Truncated L_∞ 范数, 引理1和引理2, 经过与第1步类似的推导可得:

$$\dot{V}_2(r) \leq -(k_{\min} + N\gamma_{\min}) \|r\|_{T_\infty}^2 - \sum_{i=1}^n (v_{\min} r_i^2 + \rho_{\min} r_i^4) + r^T \xi \leq -\varsigma_c V_2(r_T) + \eta_c, \quad (22)$$

当 $t > T$ 后, $\lambda_{\min}(M) \|r\|^2 \leq 2V_2(r) \leq 2\eta_c / \varsigma_c$, 即: $\|r\|^2 \leq 2\eta_c / (\varsigma_c \lambda_{\min}(M))$, 式(13a)满足. 当 $|r_i| \rightarrow 0$ 时, $N \rightarrow \infty$, 即选择合适的 k_{\min} , v_{\min} , ρ_{\min} , γ_{\min} 和 α , 可使 $2\eta_c / (\varsigma_c \lambda_{\min}(M)) \rightarrow 0$.

证毕.

文献[8, 9]提出的分散鲁棒非线性控制器为:

$$\tilde{\tau}_i = \tilde{k}_i r_i + \tilde{v}_i r_i + \tilde{\rho}_i r_i^3, \quad (23)$$

式中 \tilde{k}_i , \tilde{v}_i 和 $\tilde{\rho}_i$ 意义同式(9b)中 k_i , v_i 和 ρ_i .

注3 文献[8, 9]提出的分散鲁棒非线性控制方法可保证广义误差 r 全局一致收敛到一个较小的剩余集: $\tilde{\Omega}_{fc} = \{r : \|r\|^2 \leq 2\eta_c / (\varsigma_c \lambda_{\min}(M))\}$. 在第2步证明中可看到, 改进后的方法能够保证广义误差 r 全局一致收敛到一个更小的剩余集: $\Omega_{fc} = \{r : \|r\|^2 \leq 2\eta_c / (\varsigma_c \lambda_{\min}(M))\}$. 通过选取适当的控制器参数, 可保证 $\Omega_{fc} \rightarrow 0$.

注4 当 $\|r\|_{T_\infty} < 1$ 时, $\varsigma_c \gg \zeta_c > 0$, 因此改进后的方法在终端具有更快的收敛速度.

注5 控制律式(9b)中的 $\rho_i r_i^3$ 项保证了闭环系统具有全局稳定性和鲁棒性[8,9].

注6 控制律式(9c)中的 $\gamma_i |r_i|^\alpha \text{sign } r_i$ 项使闭环系统具有较强的终端收敛能力, 保证了更快的收敛速度和更高的跟踪精度.

注7 如果要求改进前后两种方法收敛到相同的剩余集, 即: $\tilde{\Omega}_{fc} = \Omega_{fc}$. 势必要求控制器参数 $\tilde{k}_{\min} \gg k_{\min} + \gamma_{\min}$. 大的 \tilde{k}_{\min} 易激发系统高频动态, 导致控制器初始输出过大.

注8 控制律 τ_i 中 $\gamma_i |r_i|^\alpha \text{sign } r_i$ 为连续函数[15,16], 因此不会引起系统抖振.

4 仿真研究(Simulation study)

为验证控制算法的有效性, 本文采用MathWorks

公司提供的SimMechanics六自由度并联机器人动力学模型作为被控对象, 具体参为: 上平台质量 $m = 1219.6 \text{ kg}$, 上平台惯性张量 $I_X, I_Y, I_Z = 304.48 (608.46) \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 上(下)支腿质量 $m_u (m_d) = 51.81 (92.11) \text{ kg}$, 上支腿惯性张量 $I_{uX}, I_{uY}, I_{uZ} = 24.17 (0.023) \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 下支腿惯性张量 $I_{dX}, I_{dY}, I_{dZ} = 43.02 (0.156) \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.

控制器参数分别为:

$$\tilde{k}_i + \tilde{v}_i = k_i + v_i = 50000,$$

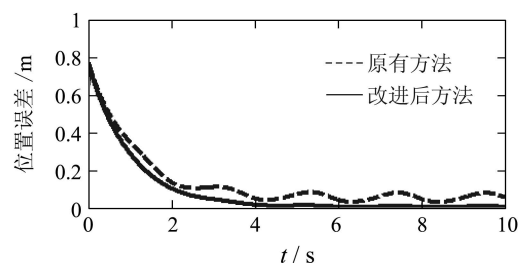
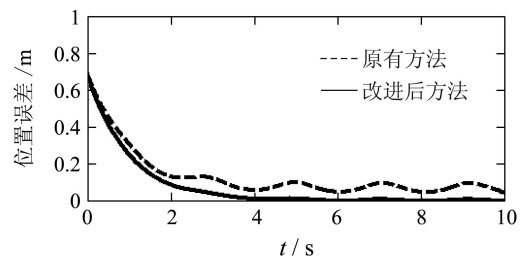
$$\tilde{\rho}_i = \rho_i = 10000,$$

$$\gamma_i = 50000,$$

$$\alpha = 0.6, i = 1, \dots, 6.$$

图2表示六自由度并联机器人各支腿位置误差, 双划线表示在控制律 τ 作用下的位置误差, 实线表示在控制律 τ 作用下的位置误差. 图3表示各支腿输入力矩. 从图2可以看出, 在选择相同控制器参数条件下, 本文提出的控制策略可以保证各支腿跟踪误差以更快的速率全局一致收敛到一个更小的剩余集, 通过选取合适的控制器参数可使剩余集趋于0. 从图3可以看出, 本文提出的控制策略在保证更好跟踪效果的前提下, 能够保证控制器输出与原有方法相似, 甚至更小.

时间乘误差平方积分(ITSE)是一种评价控制系统性能的综合指标. 为进一步比较两种方法的性能, 表1分别给出了整个响应过程的ITSE, 进入稳态后的ITSE和最大稳态误差绝对值. 从图2可以看出当 $t > 5 \text{ s}$ 后系统进入稳态. 比较表1中的数据, 可以看出本文提出的方法具有更高的跟踪精度和更快的响应速度. 尤其进入终端后, 该方法具有更好的控制品质.



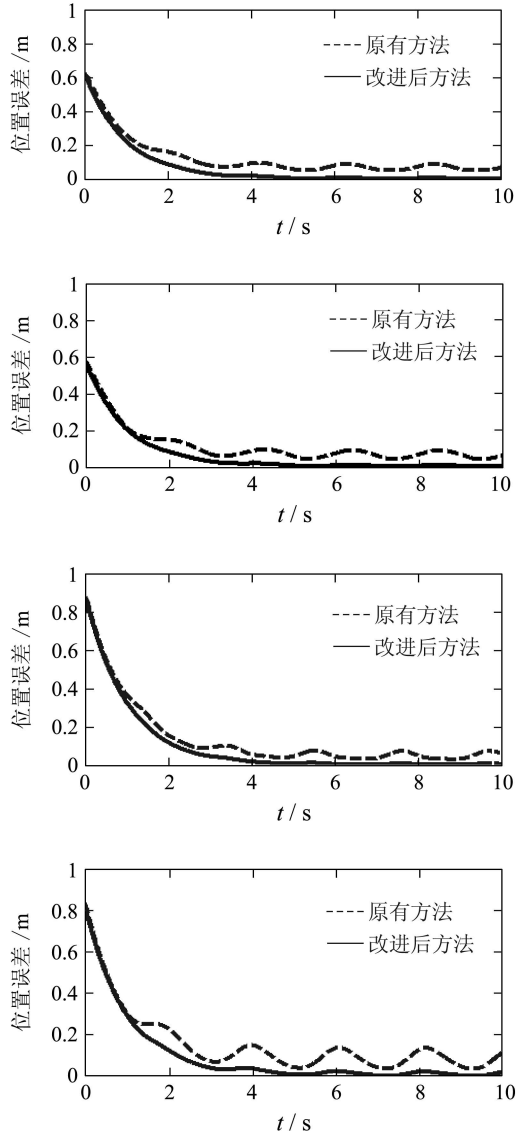


图 2 各支腿位置误差

Fig. 2 Position error of each leg

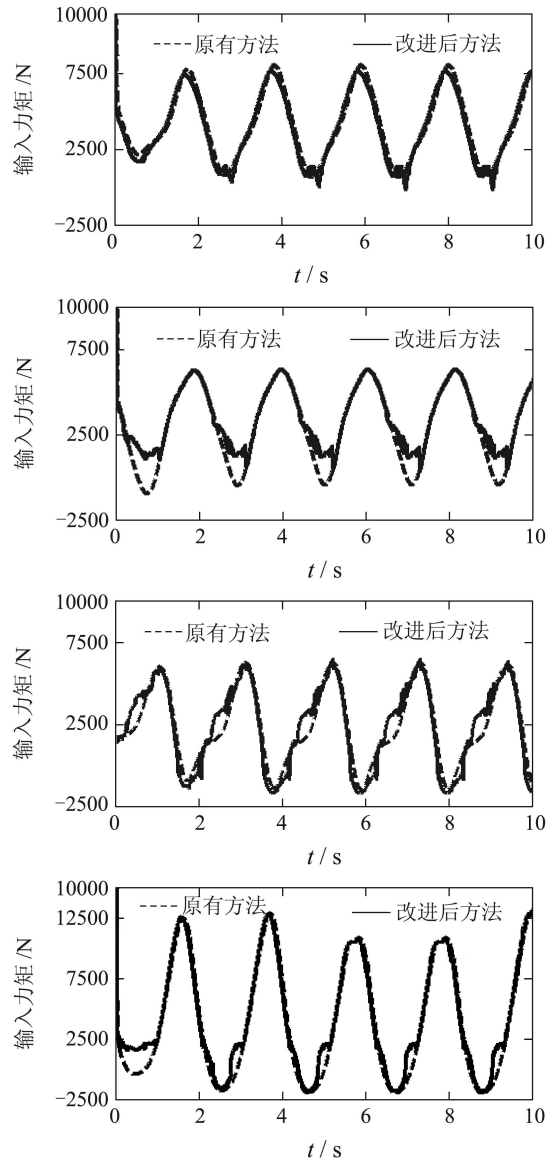


图 3 各支腿输入力矩

Fig. 3 Input torque of each leg

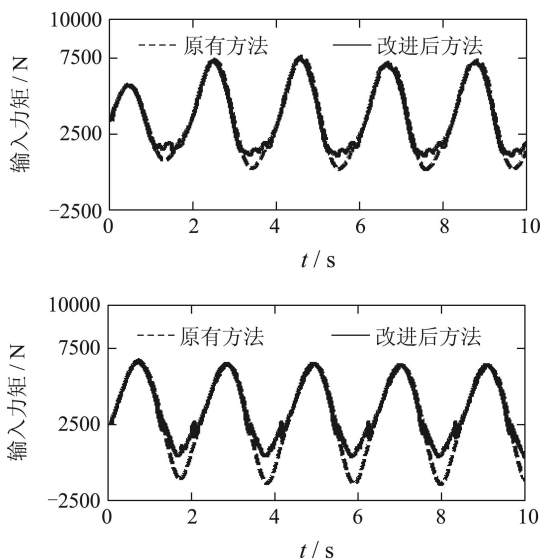


表 1 ITSE与最大稳态误差绝对值

Table 1 ITSE and maximum absolute steady state errors

方法	0~10 sITSE /(s · m ²)	5~10 sITSE /(s · m ²)	5~10 s最大误差绝对值/m	
原有方法	支腿-1	0.4614	0.2517	0.1018
	支腿-2	0.3920	0.1362	0.0830
	支腿-3	0.3831	0.1718	0.0897
	支腿-4	0.3310	0.1575	0.0896
	支腿-5	0.3864	0.0997	0.0757
	支腿-6	0.6335	0.2792	0.1396
改进后方法	支腿-1	0.1365	0.0073	0.0223
	支腿-2	0.1644	0.0051	0.0184
	支腿-3	0.1100	0.0050	0.0161
	支腿-4	0.0961	0.0052	0.0170
	支腿-5	0.2073	0.0036	0.0162
	支腿-6	0.2173	0.0160	0.0339

5 结论(Conclusion)

针对六自由度并联机器人动力学特点,提出了一种新型分散鲁棒非线性控制方法.与PD控制策略和已有方法相比,该方法具有较强的终端收敛能力,能够保证更快的收敛速度和更高的跟踪精度.使用Lyapunov方法分析了系统稳定性,给出了稳定性条件.该方法结构简单,计算效率高,可以在不改变控制系统硬件的前提下应用于其他类型工业并联机器人.仿真结果验证了该方法的有效性.

参考文献(References):

- [1] HAG S K, YOUNG M C, KYO-II L. Robust nonlinear task space control for 6 DOF parallel manipulator[J]. *Automatica*, 2006, 41(9): 1591 – 1600.
- [2] DASGUPTA B, MRUTHYUNJAYA T S. The stewart platform manipulator: a review[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2000, 35(1): 15 – 40.
- [3] MERLET J. *Parallel Robots*[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [4] FU S W, YAO Y, SHEN T L. Non-linear robust control with partial inverse dynamic compensation for a Stewart Platform manipulator[J]. *Internet Journal Modelling, Identification and Control*, 2006, 1(1): 44 – 51.
- [5] KELLY R. Global position of robot manipulators via PD control plus a class of nonlinear integral actions[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1998, 43(7): 934 – 938.
- [6] YAZAREL H, CHEAH C C, LIAW H C. Adaptive SP-D control of a robotic manipulator in the presence of modeling error in a gravity regressor matrix: theory and experiment[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, 18(3): 373 – 379.
- [7] JOSE A R, RAFAEL K, ILSE C. Semiglobal stability of saturated linear PID control for robot manipulators[J]. *Automatica*, 2003, 39(6): 989 – 995.
- [8] LIU M. Decentralized PD and robust nonlinear control for robot manipulators[J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 1997, 20(2): 319 – 332.
- [9] LIU M. Decentralized control of robot manipulators: nonlinear and adaptive approaches[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1999, 44(2): 357 – 363.
- [10] KASAC J, NOVAKOVIC B, MAJETIC D, et al. Global positioning of robot manipulators with mixed revolute and prismatic joints[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, 51(6): 1035 – 1040.
- [11] HSU S H, FU L C. A fully adaptive decentralized control of robot manipulators[J]. *Automatica*, 2006, 42(10): 1761 – 1767.
- [12] SU Y X, SUN D, LU R, et al. Integration of saturated PI synchronous control and PD feedback for control of parallel manipulators[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, 22(1): 202 – 207.
- [13] SUN D, LU R, MILLS J K, et al. Synchronous tracking control of parallel manipulators using cross-coupling approach[J]. *Internet Journal Robotics Research*, 2006, 25(11): 1137 – 1147.
- [14] SLOTINE J J, LI W. On the adaptive control of robot manipulators[J]. *Internet Journal Robotics Research*, 1987, 6(3): 49 – 59.
- [15] BHAT S P, BERNSTEIN D S. Continuous, finite-time stabilization of the translational and rotational double integrators[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1998, 43(5): 678 – 682.
- [16] BHAT S P, BERNSTEIN D S. Finite-time stability of continuous, autonomous systems[J]. *SIAM Journal of Control and Optimization*, 2000, 38(3): 751 – 766.

作者简介:

赵东亚 (1975—), 男, 上海交通大学博士研究生, 中国石油大学讲师, 研究兴趣为非线性控制、机器人控制, E-mail: zhaodongya@hdpu.edu.cn;

李少远 (1965—), 男, 上海交通大学教授, 博士生导师, 研究领域为预测控制、模糊控制、非线性控制、机器人控制, E-mail: syli@sjtu.edu.cn;

高峰 (1956—), 男, 上海交通大学教授, 博士生导师, 研究领域为并联机器人及其应用关键技术等, E-mail: fenggg@sjtu.edu.cn.