

文章编号: 1001-0920(2003)04-0490-04

并联机器人的非线性 PD 控制

苏玉鑫, 段宝岩, 张永芳, 陈光达, 米建伟
(西安电子科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 采用分散控制策略和非线性 PD 控制算法, 实现 6 自由度并联机器人的高精度轨迹跟踪控制。该非线性 PD 控制器由两个二阶非线性微分跟踪器提供高质量的微分信号, 并采用非线性组合形成控制作用, 从而确保了高控制性能的实现。实验结果验证了非线性控制方案的有效性。

关键词: 并联机器人; 非线性控制; PD; 机电一体化

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A

Nonlinear PD control of a parallel manipulator

SU Yu-xin, DUAN Bao-yan, ZHANG Yong-fang, CHEN Guang-da, MI Jian-wei
(School of Electromechanical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A decentralized control strategy and a nonlinear PD (N-PD) algorithm in joint space are proposed to realize the high precision tracking control of a 6 DOF parallel manipulator. The proposed N-PD consists of two nonlinear tracking differentiators to provide high quality differentiate signals under unknown disturbance and measurement noise. And a nonlinear combination of the three elements is used to give the control action so that the superior performance can be guaranteed. The effectiveness of this method is validated by the experimental results.

Key words: Parallel manipulator; Nonlinear control; PD; Mechatronics

1 引言

并联机器人作为机器人的一个分支, 以其具有刚度大、负载能力强、精度高、结构紧凑和控制容易等优点, 广泛应用于某些工作空间受限制或工作空间要求不高的场合。并联机器人的理论探讨和实际研制均取得了一定的成果^[1-3]。

人们为了提高并联机器人轨迹跟踪的控制性能, 提出了各种控制算法。Nguyen 等提出了自适应 PD 控制算法, 实现 6 自由度并联机器人的高精度轨迹跟踪, 但其算法过于复杂^[4]。Kim 等采用 Lyapunov 方法设计自适应控制器, 实现 6 自由度并

联机器人的高精度轨迹跟踪, 取得了较为理想的效果, 但该方法不仅算法复杂, 而且需要基于关节的速度测量^[5]。

本文基于机器人关节位置测量, 采用非线性 PD 控制算法, 实现 6 自由度并联机器人轨迹跟踪控制。具体设计了非线性 PD 控制器, 并进行了实验研究, 证明该轨迹跟踪控制具有较高的精度。

2 运动控制模型

并联机器人的机械结构由不动上平台、可动下平台和 6 条滚珠丝杠执行机构组成。滚珠丝杠执行机构分别通过虎克铰和球铰与上下平台相联。滚珠

收稿日期: 2002-03-26; 修回日期: 2002-09-19。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50075065); 陕西省自然科学基金资助项目(2000C22); 中科院机器人学开放研究实验室基金资助项目(RL200104)。

作者简介: 苏玉鑫(1969—), 男, 辽宁建昌人, 副教授, 博士, 从事机电一体化、机器人技术的研究; 段宝岩(1955—), 男, 河北冀县人, 教授, 博士生导师, 从事电子机械的理论与方法、机电一体化的研究。

丝杠由伺服电机驱动, 通过改变本身的长度实现动平台的空间期望轨迹. 系统相关结构参数如下

$$R_a = 800 \text{ mm}, \quad R_b = 200 \text{ mm}$$

$$h = 1\,200 \text{ mm}, \quad \alpha = 30^\circ, \quad \beta = 120^\circ$$

其中: R_a 和 R_b 分别为上下圆形平台的半径, α 为同组铰接点之间的夹角, β 为相邻两组铰接点之间的夹角.

在上平台和下平台上分别建立固定坐标系 $X_0-Y_0-Z_0$ 和可动坐标系 $x_p-y_p-z_p$, 其坐标原点分别位于上下平台的中心 O 和 p . 上下平台铰接点中心 A_i 和 B_i 在各自坐标系的坐标分别为 a_i 和 b_i . 根据坐标变换关系^[2], 下平台坐标点 B_i 在固定坐标系 $X_0-Y_0-Z_0$ 中的坐标可表示为

$$c_i = R \times b_i \quad (1)$$

其中 R 为如下的坐标旋转变换矩阵

$$R = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & & & & & \\ \sin \psi \cos \phi + \cos \psi \sin \theta \sin \phi & & & & & \\ \sin \psi \sin \phi - \cos \psi \sin \theta \cos \phi & & & & & \\ & -\sin \psi \cos \theta & & \sin \theta & & \\ \cos \psi \cos \phi - \sin \psi \sin \theta \sin \phi - \cos \theta \sin \phi & & & & & \\ \cos \psi \sin \phi + \sin \psi \sin \theta \cos \phi & \cos \theta \cos \phi & & & & \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 ψ , θ 和 ϕ 为描述动平台运动姿态的偏转、俯仰和横滚角度.

根据位置几何关系, 杆长矢量可表示为

$$l_{wi} = p + c_i - a_i, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (3)$$

其中 p 为惯性坐标原点 O 到可动坐标原点 p 的位置矢量.

由式(1) ~ (3) 可以看出, 只要实时给出动平台的位置和姿态(位姿), 便可计算出各杆的长度. 从而可采用有效的控制策略保证各杆的跟踪误差足够小, 以保证动平台具有较高的轨迹跟踪精度.

3 非线性 PD 控制器

非线性 PD 控制器的结构如图 1 所示, 它由非线性跟踪微分器 TD I, TD II 和非线性 PD 环节三部分组成^[6], 图中 G 表示被控对象.

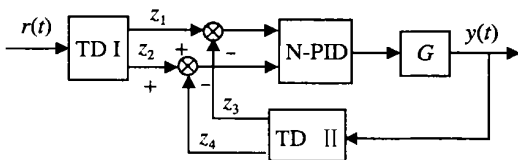


图 1 非线性 PD 控制器结构

TD I 根据参考输入 $r(t)$ 提取两个信号 $r_{11}(t)$ 和 $r_{12}(t)$, $r_{11}(t)$ 跟踪参考输入 $r(t)$, $r_{12}(t) = \dot{r}_{11}(t)$;

TD II 根据被调量 $y(t)$ 提取两个信号 $z_{21}(t)$ 和 $z_{22}(t)$, $z_{21}(t)$ 跟踪 $y(t)$, $z_{22}(t) = \dot{z}_{21}(t)$.

TD I 和 TD II 的方程可分别表示为^[7]

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ A_1 = z_1 - r(t) + \frac{z_2 |z_2|}{2R_1} \\ \dot{z}_2 = -R_1 \text{sat}(A_1, \delta_1) \\ z_3 = z_4 \\ A_2 = z_3 - y(t) + \frac{z_4 |z_4|}{2R_2} \\ \dot{z}_4 = -R_2 \text{sat}(A_2, \delta_2) \end{cases} \quad (4)$$

式中

$$\text{sat}(A, \delta) = \begin{cases} \text{sgn}(A), & |A| > \delta \\ A/\delta, & |A| \leq \delta \end{cases} \quad (6)$$

获得上述参量后, 便可采用式(7) 的 3 个量来代替经典 PD 控制器中的基本要素, 构成如式(8) 所示的非线性 PD 控制器.

$$\begin{cases} \Theta_0(t) = \int_0^t \Theta_1(\tau) d\tau \\ \Theta_1(t) = z_1(t) - z_3(t) \\ \Theta_2(t) = z_2(t) - z_4(t) \\ \dot{z}_5 = z_1 - z_3 \\ \Theta_3 = z_5, \quad \Theta_4 = z_1 - z_3 \\ \Theta_5 = z_2 - z_4 \\ u_1 = \beta_0 \text{fal}(\Theta_0, \alpha, \delta) + \beta_1 \text{fal}(\Theta_1, \alpha, \delta) + \beta_2 \text{fal}(\Theta_2, \alpha, \delta) \\ \dot{z}_6 = -\rho_0(z_6 - u_1) \end{cases} \quad (8)$$

其中

$$\text{fal}(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \text{sgn}(e), & |e| > \delta \\ e/\delta^{1-\alpha}, & |e| \leq \delta \end{cases} \quad (9)$$

以上诸式中, $R_1, \delta_1, R_2, \delta_2, \alpha, \delta, \rho_0, \beta_0, \beta_1, \beta_2$ 共 10 个参数为控制器的设计参数. 其中: R_1 根据过渡过程要求来确定, δ_1 根据跟踪微分器 DT I 的单独仿真来确定, R_2 通常取较大的值, $\delta_2 = \frac{R_2}{R_1} \delta_1$, α 取 0.5 ~ 1.0 之间的值, δ 取适当小的值, ρ_0 用比较 $u = u_1$ 和 $u = u_6$ 的效果来确定; 非线性相关参数 $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ 通过数值仿真来确定^[6,7].

4 实验结果

采用改造的 6 自由度变轴数控机作为实验机构. 控制系统硬件结构如图 2 所示. 其中: PCL-726 为 6 路 D/A 输出卡, PCL-833 为 3 轴编码器读数卡, HY-6220 定时卡产生外部中断信号作为采样周期,

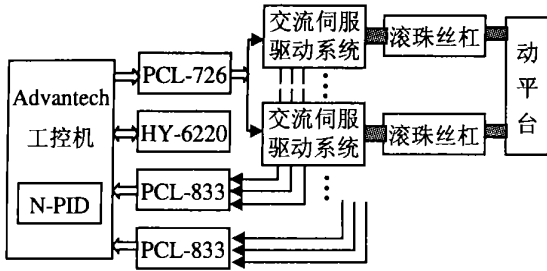


图 2 并联机器人控制系统硬件结构

采样周期 $T = 10 \text{ ms}$

变位执行器由交流伺服电机驱动系统、带轮减速机构和滚珠丝杠组成。交流伺服驱动系统由 Panasonic M SM 系列(小惯量)O42A 1F 交流伺服电机和相匹配的伺服驱动器 M SD O43A 1XX 组成。

根据上述分析和多次仿真试验,控制器的参数确定如下

$$\begin{aligned}
 R_1 &= 250, & \delta_1 &= 0.001, & R_2 &= 150 \\
 \delta_2 &= 0.0006, & \alpha &= 0.5, & \delta &= 0.02 \\
 \beta_0 &= 0.001, & \beta_1 &= 1.000 \\
 \beta_2 &= 0.5, & \rho_0 &= 0.1
 \end{aligned}$$

在上述参数条件下,让动平台以 30 mm/s 的运动速度跟踪一平面圆。其第 2 条腿和第 6 条腿的腿长增量跟踪分别如图 3 和图 4 所示。借助于 Leica 激光全站仪检测动平台的中心位置。动平台的轨迹跟踪如图 5 所示,平面圆轨迹 X 和 Y 坐标跟踪误差如

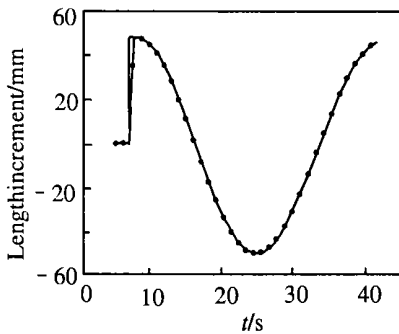


图 3 第 2 条腿的腿长增量跟踪

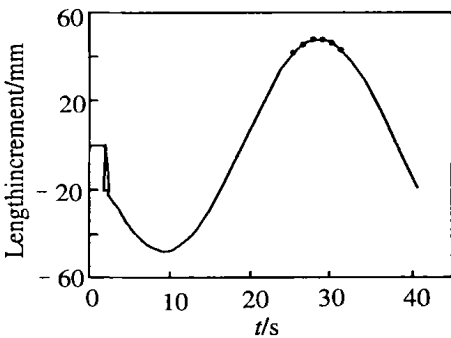


图 4 第 6 条腿的腿长增量跟踪

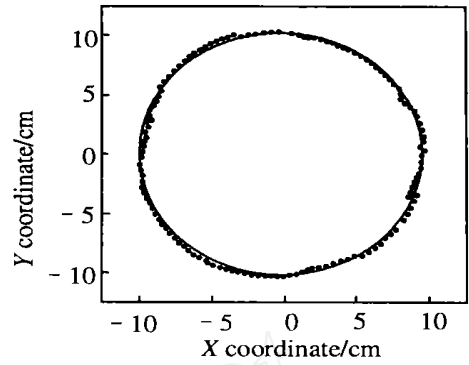
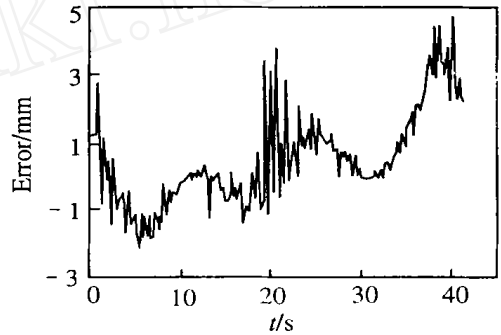
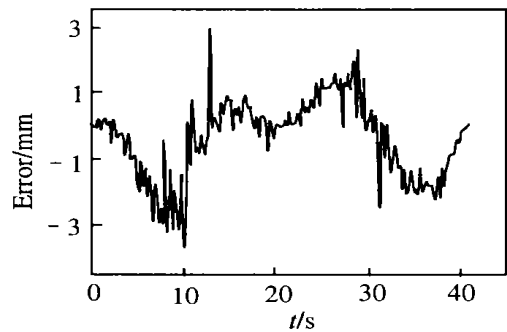


图 5 动平台的圆轨迹跟踪



(a) X 坐标跟踪误差



(b) Y 坐标跟踪误差

图 6 平面圆轨迹各坐标跟踪误差

图 6 所示。

值得指出的是:在实验过程中,由于动平台不在期望的起始位置上,因此各腿的腿长增量在起始时有一个较大的误差,但进入稳定跟踪后,腿长的误差基本保持在 1 mm 左右,动平台各坐标的跟踪误差基本在 4 mm 以内,极个别的最大误差在 5 mm 左右,具有很高的轨迹跟踪精度。

5 结 论

本文针对 6 自由度并联机器人系统,采用分散控制策略设计了非线性 PD 控制器,实现只基于关节位置测量的高精度轨迹跟踪控制。该非线性 PD 控制器采用两个非线性跟踪微分器提取高质量的微分信号,并采用误差的非线性组合进一步提高系统

的控制性能。实验结果表明, 该非线性PD控制的6自由度并联机器人具有很高的轨迹跟踪精度。该控制器结构简单, 易于工程实现, 可应用于其他精度要求较高的伺服系统控制。

鸣谢衷心感谢中国科学院数学与系统科学研究院韩京清研究员在控制器参数确定过程中的精心指导。感谢北京理工大学丁洪生教授、郝娟博士、李成刚博士生在实验方面的帮助。感谢解放军信息工程大学郑勇教授、夏治国副教授、骆亚波硕士生、Leica测试中提供的帮助。

参考文献(References):

- [1] Ronen Ben Horin, Moshe Shoham, Shlomo Djerassi Kinematics, dynamics and construction of a planarly actuated parallel robot[J] *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, 1998, 14: 163-172
- [2] Su Y X, Duan B Y. The application of Stewart platform in the large spherical radio telescope [J] *J of*

Robotic Systems, 2000, 17(7): 375-383

- [3] 黄真, 孔令富, 方跃法 并联机器人机构学理论及控制[M] 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [4] Charles C Nguyen, Sami S Antrazi, Zhou Zhenlei Adaptive control of a Stewart platform-based manipulator[J] *J of Robotic Systems*, 1993, 10(5): 657-687.
- [5] Dong Hwan Kim, Jiyoung Kang, Kyoil Lee Robust tracking control design for a 6 DOF parallel manipulator[J] *J of Robotic Systems*, 2000, 17(10): 527-547.
- [6] 韩京清 非线性PD控制器[J] 自动化学报, 1994, 20(4): 487-490
(Han Jingqing Nonlinear PD controller [J] *Acta Automatica Sinica*, 1994, 20(4): 487-490)
- [7] 韩京清, 王伟 非线性跟踪-微分器[J] 系统科学与数学, 1994, 14(2): 177-183
(Han Jingqing, Wang Wei Nonlinear tracking-differentiator [J] *J Syst Sci Math Sci*, 1994, 14(2): 177-183)

(上接第489页)

4 结论

本文研究具有不确定量的奇异摄动系统的稳定鲁棒控制问题, 在较弱的条件下, 给出了理想奇异摄动系统的稳定控制, 也是不确定奇异摄动系统具有一定鲁棒界的稳定控制, 并分析了稳定鲁棒界及相应参数的变化范围。本文结果是文献[6]结论在奇异摄动系统中的推广。

参考文献(References):

- [1] Rohrs C E, Valavani L, Athans M, et al Robustness of continuous-time adaptive control algorithms in the presence of unmodelled dynamics [J] *IEEE Trans Automat Contr*, 1985, 30(9): 881-889
- [2] Zhou K, Khargonekar P P. Stability robustness bounds for linear state-space model with structured uncertainty [J] *IEEE Trans Automat Contr*, 1987, 32(7): 621-623
- [3] Sobel K M, Banda S S, Yeh H H. Robust control for linear systems with structured state space uncertainty

[J] *Int J Contr*, 1989, 50(5): 1991-2004

- [4] Kim J H, Jeung E T, Park H B. Robust control for parameter uncertain delay systems in state and control input [J] *Automatic*, 1996, 32(9): 1337-1339
- [5] Mao L N, Meng J E. Comment on "A new robust control for a class of uncertain discrete-time systems" [J] *IEEE Trans Automat Contr*, 2001, 46(3): 509-511.
- [6] 贾新春, 王素格 线性不确定系统的稳定控制鲁棒界和高级稳定鲁棒控制[J] 系统科学与数学, 2000, 20(2): 155-159
(Jia Xinchun, Wang Suge Robust bounds of stable controllers and multilevel stable robust controllers for linear uncertain systems [J] *Syst Sci Math Sci*, 2000, 20(2): 155-159)
- [7] 袁震东 自适应控制理论及其应用[M] 上海: 华东师范大学出版社, 1988
- [8] Loannou P A, Kokotovic P V. *Adaptive Systems with Reduced Models* [M] Berlin: Springer-Verlag, 1983