

基于自适应阻抗控制的轴孔装配方法

芦俊¹, 颜景平¹, 陈俊杰²

(1. 东南大学 机械工程系, 江苏 南京 210018; 2. 东南大学 仪器科学与工程系, 江苏 南京 210018)

摘要: 提出了一种基于自适应阻抗控制的轴孔装配方法, 它根据得到的力信息, 按照自适应调整律对机器人末端的参考位置进行修正, 使得轴始终朝着减小卡阻力的方向运动, 最终完成插轴入孔的动作. 其算法简单, 计算量小, 修正量的计算可以在线进行, 故能满足实时控制的要求. 仿真结果表明了这种方法的有效性.

关键词: 机器人; 插轴入孔; 自适应阻抗控制; 位置调整

中图分类号: TP242.6 **文献标识码:** A

Peg-in-hole insertion method based on adaptive impedance control

LU Jun¹, YAN Jing-ping¹, CHEN Jun-jie²

(1. Department of Mechanical Engineering, Southeast University, Jiangsu Nanjing 210018, China;

2. Department of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Jiangsu Nanjing 210018, China)

Abstract: A peg-in-hole insertion method based on adaptive impedance control is presented. The reference position of robot end-effector is modified according to force information through adaptation law, which makes the peg move in the direction that reduces jamming forces, and finally the insertion is accomplished. This method is simple and the modification can be computed on-line, so it satisfies the requirement of real-time control. Simulation results are given to verify its effectiveness.

Key words: robot; peg-in-hole insertion; adaptive impedance control; position modification

1 引言(Introduction)

机器人在轴孔装配过程中, 由于各种原因, 常会导致卡阻的发生. 消除装配卡阻的方法一般可分为两类: 被动柔顺控制和主动柔顺控制. 但被动控制方法有适应性差, 且只能修正较小的运动误差的缺点, 因此人们越来越多的研究主动柔顺控制. 阻抗控制作为主动柔顺控制方法的一种, 得到了广泛的应用^[1]. 阻抗控制不直接控制机器人与环境的作用力, 而是根据机器人端部的位置(或速度)和端部作用力之间的关系(注: 本文中的位置指位置与姿态), 通过调整反馈位置误差、速度误差或刚度来达到控制力的目的. Chan 和 Liaw^[2]采用力矩控制的阻抗控制方法进行机器人装配, 通过反馈的力、位置和速度调节关节力矩, 来维持机器人末端的阻抗关系, 但这需要机器人精确的数学模型. Kaiji 和 Kazuaki^[3]等人利用人手先进行装配示范, 从中辨识轴孔装配的阻抗参数来设计控制器, 但在机器人重现阶段容易受到扰动或噪音的干扰. Babaci 和 Amirat^[4]采用模糊控制规则来调整阻抗控制中参考位置与命令位置的变动

量, 达到调节机器人末端位置以减小装配误差力的目的, 但该方法要求对装配过程有足够的先验知识. 除了阻抗控制方法外, 还有一些采用智能控制方法进行轴孔装配, 如 Vijayakumar 和 Andrew^[5]用神经网络在力误差信息和机器人末端位置误差信息之间建立起非线性映射, 从而根据力误差来找到末端位置的调整量, 该法的缺点在于需在正式装配前进行大量的学习训练.

消除卡阻的关键在于能根据检测到的力信息及实时地调整机器人末端的位置, 上述文献也是基于这样的思路. 本文提出了一种消除装配卡阻力的自适应阻抗控制方法, 该方法根据模型参考自适应控制(MRAC)的思想, 用 Lyapunov 稳定性设计方法导出一种渐近稳定条件下的自适应策略, 由力误差信息寻找到末端位置的调整规律, 使得机器人的末端位置始终朝着减小卡阻力的方向运动. 这种控制方法与其他控制方法相比计算量小, 而且修正量可以在线计算. 仿真结果表明了这种方法的有效性.

2 轴孔装配卡阻 (Peg-in-hole insertion jamming)

机器人进行轴孔主动装配作业时,轴在插入孔的过程中,由于多种因素,使得轴与孔的轴线不在一条直线上,从而出现卡阻现象,如图1所示.轴的空间位置与姿态可以用夹具中心 P 处的坐标值 x, y, z 和轴的轴线坐标 ψ, θ 来表示.其中 ψ 为轴线的方位角, θ 为轴线的侧倾角.轴插入孔的过程中,装配于手爪上的六维腕力传感器可测出3个力分量(f_x, f_y, f_z)和3个力矩分量(M_x, M_y, M_z),其中 f_x, f_y, f_z 分别为轴在 X, Y, Z 方向所受的3个力分量, M_x, M_y, M_z 分别为轴绕 X, Y, Z 方向所受的3个力矩分量.当轴处于卡阻位置时, f_z 和 M_z 骤然增至很大,使得轴向下运动困难.如果 f_x, f_y 和 M_x, M_y 能减为0,表明轴与孔的轴线在一条直线上,此时 f_z 和 M_z 也减为0,轴可顺利插入.因此作者关心的是 f_x, f_y 和 M_x, M_y 4个力信息,希望通过这4个方向上的力信息来找到机器人末端位置的调整量,从而调整机器人的末端位置,使得 f_x, f_y 和 M_x, M_y 减为0.下面本文将利用一种自适应阻抗控制方法来求这种调整量.

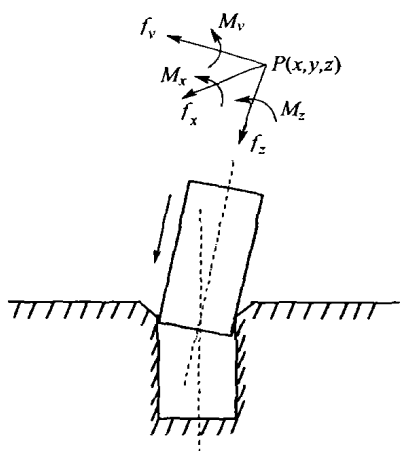


图1 轴孔装配的卡阻现象

Fig. 1 Peg-in-hole insertion jamming

3 自适应阻抗控制策略 (Adaptive impedance control method)

3.1 阻抗控制 (Impedance control)

阻抗控制是通过实现位置误差和力误差之间的某种理想的动态关系而实现的,当机器人末端所持的轴与孔相接触时,可在二者之间建立如下的二阶模型来表达这种阻抗关系

$$M\ddot{X} + B\dot{X} + K(X - X_r) = E, \quad (1)$$

其中 M, B 和 K 是人为设定的实数非奇异系数矩阵,分别相当于惯性、阻尼和刚度矩阵,它们可以是对角

矩阵,也可以不是对角矩阵,为解耦起见,目标阻抗关系中的系数矩阵 M, B 和 K 取为对角矩阵的形式; X 为操作空间中轴的末端位置, X_r 为参考位置, $E = F_r - F$ 为接触力误差, F_r 为参考输入力, F 为轴与孔的实际接触力.

将与轴作用的孔环境建模为线性弹簧,即它满足如下的力与位移关系

$$F = K_e(X - X_e) \quad (X \geq X_e). \quad (2)$$

其中 F, X 和 X_e 都是 4×1 矢量,分别表示轴与孔的作用力、轴末端的实际位置矢量和孔的位置矢量, K_e 为 4×4 维的孔刚度矩阵,这里取为正的对角阵,即孔在各个方向上是解耦的.由于式(1)和式(2)是解耦的,因此,为表达清楚起见,可以先考虑操作空间某一维的情况,它可以代表空间任一维.在下面的描述中,将用小写字母代替前面的大写字母.

由式(2)可得到轴与孔的接触力为 f 时,力误差的表达式

$$e = f_r - f = f_r - k_e(x - x_e). \quad (3)$$

将式(3)与式(1)结合并化简,得到力误差动态方程如下(孔的刚度和位置都为常量)

$$m\ddot{e} + b\dot{e} + (k + k_e)e = k(f_r + k_e x_e) - k k_e x_r. \quad (4)$$

由式(4)注意到可以用参考位置 x_r 来控制力误差轨迹.到达稳态时(这时 x_r 是常数),静态力误差为

$$e_{ss} = \frac{k}{k + k_e} [(f_r + k_e x_e) - k - k_e x_r]. \quad (5)$$

从上式看到,静态力误差是参考力 f_r 和参考位置 x_r 的函数;只有在参考位置满足

$$x_r = \frac{f_r}{k_e} + x_e \quad (6)$$

时,才有 $e_{ss} = 0$.即只有根据精确的孔的位置和刚度来提供参考位置才能使得控制力 f 在有限时间内准确的跟踪参考力 f_r .但是在实际装配中,由于各种误差的原因,孔的刚度和位置是很难精确得到的,因此必须设计一种算法尽可能地减少对孔的刚度和位置的依赖,自适应算法便是这些算法中的一种.

3.2 自适应算法 (Adaptive algorithm)

当轴与孔稳定接触后,给参考位置加入一个修正量 Δx_r ,即

$$x_r = x_{r,0} + \Delta x_r. \quad (7)$$

其中 $x_{r,0}$ 为轴从自由空间进入与孔稳定接触时的参考位置值,它的作用是保证参考位置的连续性,使得不会因 x_r 的大变化导致机器人夹具的不稳定, Δx_r 修正 x_r 使实际接触力能跟踪期望的参考力.

本文将修正量取为下面的形式

$$\Delta x_r = g(t) + k_p(t)e + k_d(t)\dot{e}. \quad (8)$$

其中 $e = e(t)$ 为力控制误差, $k_p(t)$ 和 $k_d(t)$ 分别是比例和微分因子, $g(t)$ 是辅助项, 用来补偿静态误差. 将式(7), (8)代入式(4)中得到带有调节因子的系统误差方程.

$$\ddot{e} + \left(\frac{b + kk_e k_d(t)}{m} \right) \dot{e} + \left(\frac{k + k_e + kk_e k_p(t)}{m} \right) e = \frac{k(f_r + k_e x_e - k_e g(t) - k_e x_{i0})}{m}. \quad (9)$$

上式也就是模型参考自适应控制(MRAC)中的可调节系统, 调整系数 $g(t)$, $k_p(t)$ 和 $k_d(t)$ 的目的是要缩小实际力误差 $e(t)$ 与期望力误差 $e_m(t)$ 的差距, 使得实际系统的响应跟随参考模型的响应. 期望力误差 $e_m(t)$ 的轨迹由参考模型决定, 参考模型设计为如下的理想二阶线性系统

$$\ddot{e}_m + 2\zeta\omega\dot{e}_m + \omega^2 e_m = 0. \quad (10)$$

参数 ω, ζ 分别是无阻尼自然频率和阻尼比.

下面用 Lyapunov 稳定性设计方法来导出 $g(t)$, $k_p(t)$ 和 $k_d(t)$ 的调整规律.

令

$$\begin{cases} \frac{b + kk_e k_d(t)}{m} = a_1, & \frac{k + k_e + kk_e k_p(t)}{m} = a_2, \\ \frac{k(f_r + k_e x_e - k_e g(t) - k_e x_{i0})}{m} = \beta_0. \end{cases} \quad (11)$$

重写误差方程式(9)为

$$\ddot{e} + a_1 \dot{e} + a_2 e = \beta_0. \quad (12)$$

将式(12)与式(10)相减得

$$(\ddot{e} - \ddot{e}_m) + a_1 \dot{e} - 2\zeta\omega\dot{e}_m + a_2 e - \omega^2 e_m = \beta_0. \quad (13)$$

令

$$\begin{cases} \delta_0 = \beta_0, & \delta_1 = a_1 - 2\zeta\omega, \\ \delta_2 = a_2 - 2\omega^2, & \epsilon = e - e_m. \end{cases} \quad (14)$$

改写式(13)为

$$\ddot{\epsilon} = -2\zeta\omega\dot{\epsilon} - \omega^2\epsilon - \delta_1\dot{e} - \delta_2 e + \delta_0. \quad (15)$$

构造 Lyapunov 函数为

$$V = (\omega^2 + 2w_p\zeta\omega - w_p^2)\epsilon^2 + q^2 + \frac{1}{\lambda_0}(\delta_0 + \gamma_0 q)^2 + \frac{1}{\lambda_1}(-\delta_1 + \gamma_1 q\dot{e})^2 + \frac{1}{\lambda_2}(-\delta_2 + \gamma_2 qe)^2. \quad (16)$$

其中 $q = w_p\epsilon + \dot{\epsilon}$, $w_p, \lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$ 和 $\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2$ 为正的常数. 当 w_p 满足 $0 \leq w_p \leq 2\zeta\omega$ 时, 式(16)为一正定函数.

对 V 函数求导, 并经变形简化后得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & 2\dot{\epsilon}^2(w_p - 2\zeta\omega) - 2w_p\omega^2\epsilon^2 - 2\gamma_0 q^2 - 2\gamma_1(q\dot{e})^2 - \\ & 2\gamma_2(qe)^2 + 2(\delta_0 + \gamma_0 q)\left\{q + \frac{1}{\lambda_0}(\delta_0 + \gamma_0(q)')\right\} + \\ & 2(-\delta_1 + \gamma_1 q\dot{e})\left\{q\dot{e} + \frac{1}{\lambda_1}(-\delta_1 + \gamma_1(q\dot{e})')\right\} + \\ & 2(-\delta_2 + \gamma_2 qe)\left\{qe + \frac{1}{\lambda_2}(-\delta_2 + \gamma_2(qe)')\right\}. \end{aligned} \quad (17)$$

按照 Lyapunov 理论, 要想误差 ϵ 收敛, $\dot{V}$ 必须为负定. 为此只需 $\{\cdot\}$ 为 0, 且 w_p 满足 $0 \leq w_p \leq 2\zeta\omega$. 推导得

$$\begin{cases} \delta_0' = -\lambda_0 q - \gamma_0(q)', \\ \delta_1' = \lambda_1 q\dot{e} + \gamma_1(q\dot{e})', \\ \delta_2' = \lambda_2 qe + \gamma_2(qe)'. \end{cases} \quad (18)$$

从式(11)和式(14)看到, 系数 $g(t)$, $k_d(t)$ 和 $k_p(t)$ 与 δ_0, δ_1 和 δ_2 之间分别只差一个常数, 因此它们遵循相同的调整规律, 因而式(18)也就是所要求的系数 $g(t)$, $k_d(t)$ 和 $k_p(t)$ 的调整规律. 于是根据式(18)得到 $g(t)$, $k_d(t)$ 和 $k_p(t)$ 的调整规律如下:

$$\begin{cases} g(t) = g(t_0) - a_1 \int_0^t q dt - a_2 q, \\ k_p(t) = k_p(t_0) + b_1 \int_0^t qe dt + b_2 qe, \\ k_d(t) = k_d(t_0) + c_1 \int_0^t q\dot{e} dt + c_2 q\dot{e}, \\ q = w_p(e - e_m) + (\dot{e} - \dot{e}_m). \end{cases} \quad (19)$$

上式中, w_p 是正的加权因子, a_1, b_1, c_1 和 a_2, b_2, c_2 是小且正的比例和积分增益, $g(t_0), k_d(t_0)$ 和 $k_p(t_0)$ 分别是 $g(t), k_d(t)$ 和 $k_p(t)$ 的初值, 这里因为式(7)中已有 x_{r0} 保证了参考轨迹的连续性, 所以它们可以取为 0. 从而由式(8)得到轨迹修正量的表达式, 进而由式(7)得到参考轨迹的表达式.

3.3 轴孔装配策略(Peg-in-hole insertion method)

由于已在式(1)中实现了解耦, 所以 f_x, f_y, M_x, M_y 4 个方向上的阻抗关系可独立计算, 然后根据式(7), (8), (19)的自适应调整策略, 计算出这 4 个方向上的调整量. 其调整结构如图 2、图 3 所示.

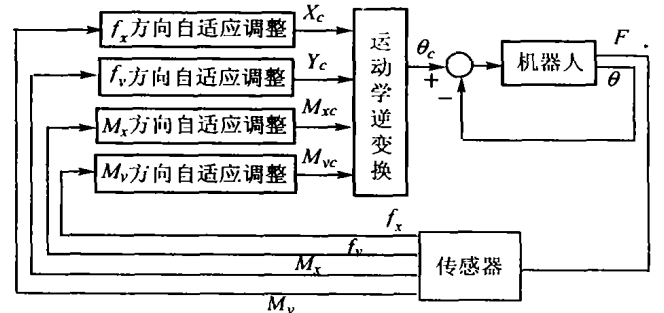


图 2 基于位置的机器人控制示意图
Fig. 2 Block diagram of position-based robot control

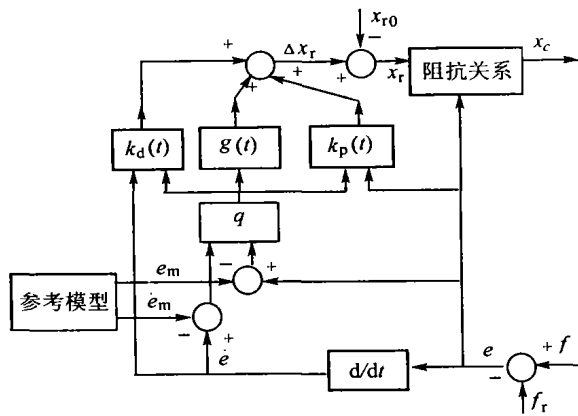


图3 自适应调整算法
Fig. 3 Adaptive modification algorithm

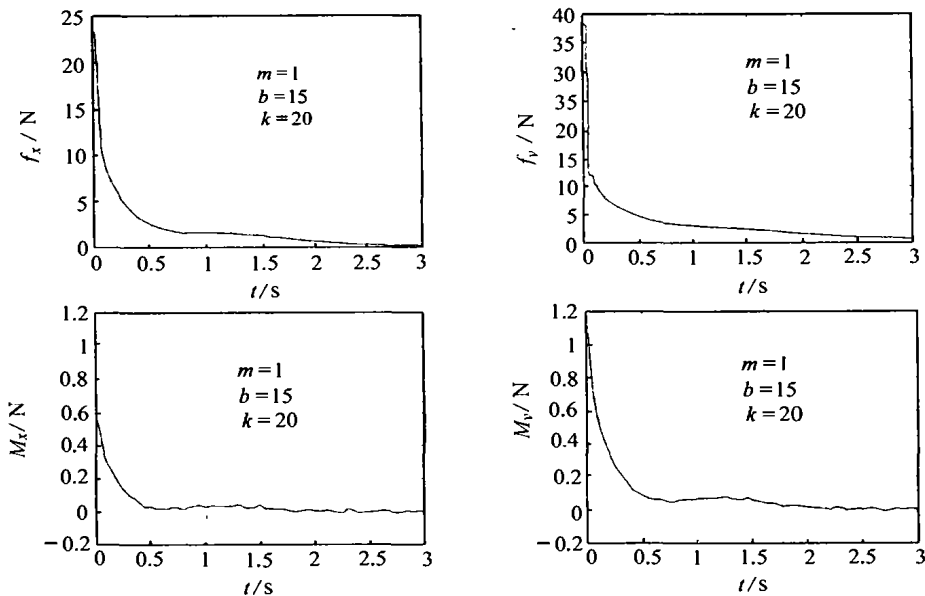


图4 自适应调整下的 f_x, f_y, M_x 和 M_y 4个方向的力变化情况
Fig. 4 Forces variation of f_x, f_y, M_x and M_y under adaptive modification

由图4可以看出,在所采用的式(7),(8),(19)的自适应阻抗控制下, f_x, f_y, M_x 和 M_y 四个量始终朝着减小的方向运动,在稳态时减为0。

5 结论(Conclusion)

本文提出了一种基于自适应阻抗控制的轴孔装配方法,该方法能根据卡阻得到的力信息,按照自适应调整规律及时地对机器人末端的参考位置进行修正,使得轴始终朝着减小卡阻力的方向运动,最终完成插轴入孔的动作.这种方法简单,不要求得到孔的非常精确的刚度和位置信息,而且由于其算法简单、计算量小,修正量的计算可以在线进行,故能满足实时控制的要求.仿真结果表明了本文所述方法的有效性。

4 仿真结果(Simulation results)

通过 Matlab 的动态系统仿真工具 Simulink,我们对上述算法进行了仿真验证.在仿真的具体实现中,将跟踪0输入的理想系统状态 e_m 和 $\dot{e}_m$ 取为0;各个调节因子 a_1, b_1, c_1 和 a_2, b_2, c_2 分别取为0.11, 0.1, 0.0001和0.01, 0.00005, 0.000008, w_p 取为5;接触力是通过假定已知道孔的各个方向刚度和位置,由式(3)实现的.仿真中所用的机器人模型是选用我们实验室自行设计的 YJP-1 型七自由度机器人,它的前6个关节是转动关节,最后1个关节是移动关节.仿真结果如图4所示。

参考文献(References):

- [1] HOGAN N. Impedance control: an approach to manipulation [J]. *Trans of the ASME J of Dynamic System Measurement and Control*, 1985, 107(1): 1-24.
- [2] CHAN S P, LIAW H C. Generalized impedance control of robot for assembly tasks requiring compliant manipulation [J]. *IEEE Trans on Industrial and Electronics*, 1996, 43(4): 453-461.
- [3] KADJ I, KAZUAKI H, TATSUYA S, et al. Realization of the human skill in the peg-in-hole task using hybrid architecture [A]. *IEEE Int Conference on Intelligent Robots and Systems [C]*. Victoria: IEEE Computer Society Press, 1998, 995-1000.
- [4] BABACI S, AMIRAT Y, PONTNAU J, et al. Fuzzy adaptation impedance of a 6DOF parallel robot: application to peg in hole insertion [A]. *Proceedings of the Fifth IEEE Int Conference on Fuzzy Systems [C]*. New Orleans: IEEE Computer Society Press, 1996, 1770-1776.

(下转第92页)

- [4] XU Bingzheng, ZHANG Bailing, WEI Gang. *Theory and Applications of Neural Networks* [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 1994 (in Chinese).
- [5] FANG Yuguang, KINCAID T G. Stability analysis of dynamical neural networks [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 1996, 7(4): 996 - 1006.

附录 A (Appendix A)

定义 A n 阶实方阵 A 在某种诱导范数 $\|\cdot\|$ 下矩阵测度定义为

$$\lim_{\theta \rightarrow 0^+} \frac{\|I + \theta A\| - I}{\theta}.$$

其中 I 为单位矩阵.

引理 A 关于矩阵测度有以下性质:

- 1) $\mu(0) = 0, \mu(I) = 1, \mu(cA) = c\mu(A), c > 0$;
- 2) $\mu(A) \leq \|A\|, \mu(A+B) \leq \mu(A) + \mu(B)$;

3) 矩阵 A 是 Hurwitz 稳定的充分条件是存在某矩阵测度 $\mu(\cdot)$, 使 $\mu(A) < 0$;

4) $\mu_P^1(A) = \max_{1 \leq j \leq n} \{ \operatorname{Re}(a_{jj}) + \sum_{i \neq j} \frac{p_i}{p_j} |a_{ij}| \}$ 是对应向量范数 $\|x\| = \|Px\|_1$ 的矩阵测度, 其中矩阵 $P = \operatorname{diag}(p_1, p_2, \dots, p_n)$ 为正定矩阵.

引理 A 的证明见文献[5].

作者简介:

廖伍代 (1963 —), 男, 1993 年于华中师范大学运筹学与控制理论专业获硕士学位. 现为华中科技大学自动控制系博士研究生. 研究方向: 随机系统稳定性和人工神经网络渐近行为分析. Email: wdliao@163.com;

廖晓昕 (1938 —), 男, 华中科技大学自动控制系教授, 博士生导师. 研究领域: 智能控制系统稳定性, 非线性与复杂系统及神经网络理论. Email: liaoxx@21cn.com

(上接第 88 页)

- [5] VIJAYKUMAR G, ANDREW G B, RODERIC A G. Learning admittance mapping for force-guided assembly [A]. *Proc of the IEEE Int Conference on Robotics and Automation* [C]. San Diego: IEEE Computer Society Press, 1994, 2633 - 2638.
- [6] SERAJI H, COLBAUGH R. Force tracking in impedance control [J]. *Int J of Robotics Research*, 1997, 16(1): 97 - 117.
- [7] FIELD G, STEPANENKO Y. Model reference impedance control of robotic manipulators [A]. *Proc of the IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing* [C]. Victoria: IEEE Computer Society Press, 1993, 614 - 617.

作者简介:

芦俊 (1974 —), 男, 1999 年于甘肃工业大学机电工程学院获硕士学位, 现为东南大学机械工程系博士生. 主要研究方向为机器人控制, 机电一体化. Email: luju3205@sina.com;

颜景平 (1934 —), 男, 1953 年毕业于南京工学院机械工程系, 现为东南大学机械工程系教授, 博士生导师. 主要研究方向为机器人运动与控制, 机电一体化;

陈俊杰 (1958 —), 男, 1982 年毕业于南京工学院自动控制工程系, 1996 年 ~ 1997 年东南大学访问学者. 现为东南大学仪器科学与工程系博士生. 主要研究方向为测控技术及智能系统, 机器人控制.