

运动学补偿的宏-微机器人连续轨迹控制研究*

陈启军 王月娟 陈辉堂
(同济大学电气工程系·上海, 200092)

摘要: 一小机械手附在一大机械手末端构成的系统称为宏-微机器人系统. 介绍了宏-微机器人连续轨迹控制的新方法. 对宏-微机器人的控制在关节空间进行, 通过微机械手的快速运动对宏机械手的轨迹误差在线补偿. 宏-微机器人轨迹规划离线进行, 通过任务放大的方法分解宏-微机器人运动学冗余. 仿真和实验证明了方法的有效性.

关键词: 宏-微机器人; 连续轨迹跟踪; 任务放大; 运动学补偿

文献标识码: A

Research on Continuous Trajectory Tracking Control of Macro-Micro Manipulator System Based on Kinematic Compensation

CHEN Qijun, WANG Yuejuan and CHEN Huitang

(Electrical Engineering Department, Tongji University, Shanghai, 200092, P. R. China)

Abstract: A small manipulator is attached at the tip of a large manipulator, this kind of system can be regarded as macro-micro manipulator system. This paper presents a kind of novel control strategy of continuous trajectory tracking of macro-micro manipulator system. Tracking errors of macro manipulator are compensated by the fast adjustment of micro manipulator and the control is implemented in joint space. Trajectory planning is completed off-line and the kinematic redundancy of macro-micro manipulator system is resolved by task augment. Simulation and experiment showed the efficiency of proposed method.

Key words: macro-micro manipulator; continuous trajectory tracking; task augment; kinematic compensation

1 引言(Introduction)

许多作业机器人都要求按给定的轨迹运动, 如画图、异型切割等. 低速运动时的轨迹跟踪精度通过设计控制器可以达到理想的结果, 但机器人高速运动时的轨迹精度问题始终没有得到很好的解决. 我们在大量的实验中发现^[1], 机器人的频带限制了机器人速度的提高, 跟踪曲线时, 大曲率位置机器人响应慢. 机器人的悬臂结构又限制了机器人频带的提高, 一般机器人频带只有几赫兹或十几赫兹. 有必要从更广的角度探索提高机器人的性能. 80 年代末 90 年代初, 宏-微机器人^[2]被建议用来实现机器人快速精确的运动. 宏-微机器人有减小末端有效惯性、扩充系统频带的特性.

在宏-微机器人应用于连续轨迹跟踪方面, Yim^[3]进行了研究. Yim 提出的宏-微机器人连续轨迹跟踪控制方法是基于工作空间的, 控制算法复杂. 机器人控制器基本上都是关节控制器, 所以需要在线正运动学、逆运动学、动力学计算, 给控制系统的

计算性能提出了很高的要求. 探索能够发挥微机器人高速高精度的特点, 又能在关节空间实施控制的宏-微机器人机构及控制方法是有意义的. 本文介绍了一种宏-微机器人连续轨迹控制的新方法, 运动控制在关节空间进行, 通过微机械手的快速运动对宏机械手的轨迹误差进行运动学补偿.

2 宏-微机器人运动学(Kinematics of macro-micro manipulator)

实施关节空间控制, 首先需要将工作空间任务轨迹转换到关节空间. 微机械手拥有完全的自由度, 所以宏-微机器人都有冗余自由度. 设 $\theta_M \in R^r$ 为宏机械手的坐标, $\theta_m \in R^{n-r}$ 为微机械手的关节坐标, $X \in R^p$ 为宏-微机器人末端位置和姿态, 则有

$$X = f(\theta_M, \theta_m), \quad (1a)$$

$$\dot{X} = J[\theta_M^T, \theta_m^T]^T. \quad (1b)$$

$J \in R^{p \times n}$ ($p < n$) 为雅可比矩阵. 逆运动学最常用的方法是 Liegeois^[4]提出的伪逆法, 但伪逆法不能保证机器人运动的周期性, 机器人跟踪一封闭的轨迹

* 基金项目: 国家自然科学基金(60005002)资助项目.

收稿日期: 1998-12-28; 收修改稿日期: 2000-01-12.

时,不能保证机器人起点和终点的姿态同一,这是象机器人连续轨迹跟踪这类应用所不期望的.Seraji^[5]提出了一种任务放大的方法可以保证机器人运动的周期性.Seraji方法的基本思想是通过定义机器人的额外任务使雅可比矩阵为方阵.

设机械手有 $n-p$ 个冗余自由度,定义 $(n-p) \times 1$ 任务:

$$Z = g(\theta), \theta = [\theta_M, \theta_m]^T, \quad (2)$$

$$[\dot{X}^T, \dot{Z}^T]^T = [f^T(\theta), g^T(\theta)]^T, \quad (3)$$

$$[\dot{X}^T, \dot{Z}^T]^T = [J^T(\theta), J_c^T(\theta)]^T \dot{\theta} = J_A \dot{\theta}. \quad (4)$$

$$J_c \in \mathbb{R}^{(n-p) \times n}, f(\theta) \in \mathbb{R}^{p \times 1},$$

$$g(\theta) \in \mathbb{R}^{(n-p) \times 1}, J_A \in \mathbb{R}^{n \times n}.$$

逆运动学:

$$\dot{\theta} = J_A^{-1} [\dot{X}^T, \dot{Z}^T]^T, \quad (5)$$

$$\dot{\theta} = J_A^{-1} [\dot{X}^T, \dot{Z}^T]^T - J_A^{-1} J_c \dot{\theta}. \quad (6)$$

任务放大方法的关键是定义机器人额外任务,下面我们通过运动学优化来定义机器人的额外任务.定义优化函数 $H(\theta)$, 运动学问题转化为下面优化问题:

$$\begin{aligned} \min H(\theta) \\ \text{s.t. } f(\theta) - X = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

拉格朗日方程:

$$L = H(\theta) + \lambda^T (f(\theta) - X), \lambda \in \mathbb{R}^{p \times 1}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = 0 \Rightarrow \frac{\partial H}{\partial \theta} = h = -J^T \lambda, \quad (9)$$

$$[J_1, J_2, \dots, J_n]^T [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p]^T = -[h_1, h_2, \dots, h_n]^T. \quad (10)$$

$J_i \in \mathbb{R}^{p \times 1}$ 为雅可比矩阵 J 的第 i 列. 式(10)有 n 个方程,取其中 p 个独立的方程,比如取前 p 个方程:

$$[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p]^T = [[J_1, J_2, \dots, J_p]^T]^{-1} [h_1, h_2, \dots, h_p]^T. \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)的后 $n-p$ 个方程有:

$$\begin{aligned} [J_{p+1}, J_{p+2}, \dots, J_n]^T [[J_1, J_2, \dots, J_p]^T]^{-1} \cdot \\ [h_1, h_2, \dots, h_p]^T = [h_{p+1}, h_{p+2}, \dots, h_n]^T. \end{aligned} \quad (12)$$

定义

$$Z_p = [J_1, J_2, \dots, J_p]^T,$$

$$Z_{n-p} = [J_{p+1}, J_{p+2}, \dots, J_n]^T,$$

$$Q = [Z_{n-p} Z_p^{-1}, -I_{n-p}].$$

I_{n-p} 为 $(n-p) \times (n-p)$ 单位阵,式(12)可表示为:

$$Qh = 0. \quad (13)$$

式(13)是式(7)所示优化问题的必要条件,有 $n-p$ 个方程,作为机器人的额外任务.式(13)的物

理意义是指机器人除了满足末端约束(1a)外,利用宏-微机器人的自运动优化运动学性能 $H(\theta)$. 可以通过定义 $H(\theta)$ 避障、避免关节奇异及避免关节限制,仿真研究中我们将通过定义 $H(\theta)$ 避免关节限制.

3 运动学补偿控制结构和控制算法 (Control structure and control law based on kinematic compensation)

不失一般性,宏-微机器人动力学模型可以表示为:

$$M(\theta_M, \theta_m) \ddot{\theta} + C(\theta_M, \theta_m, \dot{\theta}_M, \dot{\theta}_m) \dot{\theta} + G(\theta_M, \theta_m) = \tau. \quad (14)$$

$M(\theta_M, \theta_m) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为惯性矩阵, $C(\theta_M, \theta_m, \dot{\theta}_M, \dot{\theta}_m) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 表示离心力和哥式力项, $G(\theta_M, \theta_m) \in \mathbb{R}^n$ 为重力项, $\tau \in \mathbb{R}^n$ 为控制力矩.

微机械手频带远高于宏机械手频带(比如是宏机械手频带 10 倍以上),利用微机械手的快速运动对宏机械手的轨迹误差进行补偿,设计图 1 所示控制结构.

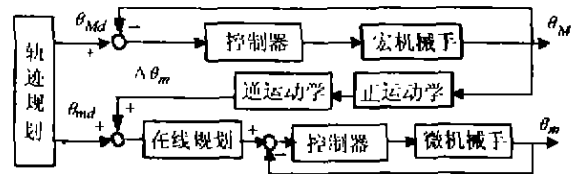


图 1 运动学补偿控制结构

Fig. 1 Control structure based on kinematic compensation

轨迹规划将任务空间期望轨迹转化到关节空间,根据式(4)、(5)、(6)完成.正运动学计算宏机械手关节误差所产生的末端误差:

$$\Delta X = f(\theta_{Md}, \theta_{md}) - f(\theta_M, \theta_m). \quad (15)$$

逆运动学将末端误差转化为微机械手补偿角度 $\Delta\theta_m$:

$$\Delta\theta_m = f_m^{-1}(\theta_M, \theta_m). \quad (16)$$

根据补偿角度 $\Delta\theta_m$ 在线修改微机械手期望轨迹.在线规划是微机械手 PTP 规划,在宏机械手的一个采样周期内对微机器人手从当前位置 θ_m 到 $\theta_{md} + \Delta\theta_m$ 规划,用插值实现.

控制器为关节控制器,控制算法采用 PD 加前馈控制:

$$\begin{aligned} M(\theta_{Md}, \theta_{md}) \ddot{\theta}_d + C(\theta_{Md}, \theta_{md}, \dot{\theta}_{Md}, \dot{\theta}_{md}) \dot{\theta}_d + \\ G(\theta_{Md}, \theta_{md}) + K_p e + K_d \dot{e} = \tau. \end{aligned} \quad (17)$$

系统没有测速装置,用如下所示的线性反馈观测器获取角速度的估计值:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\theta} \\ \hat{\dot{\theta}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta} \\ \hat{\dot{\theta}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_p I \\ k_d I \end{bmatrix} [\theta - \hat{\theta}]. \quad (18)$$

“ \sim ”表示观测值.文献[6]证明了式(14)、(17)、(18)所示系统的稳定性.

说明 1 图 1 所示控制结构中,如 $\theta_{md} = 0$, 表示空间任务完全由宏机械手跟踪,微机械手只对宏机械手的误差进行补偿,这将无法利用宏-微机器人拥有的冗余自由度进行运动学优化.

说明 2 图 1 所示控制结构用到运动学求逆,但只对微机械手,一般情况下,矩阵维数较宏-微机器人减少一半,计算量大大减小.控制算法中前馈力矩离线计算,控制过程中不需要动力学计算.

4 仿真和实验研究 (Simulation and experiment)

4.1 宏-微机器人系统 (Macro-micro manipulator system)

图 2(a)是我们研制的宏-微机器人示意图,该机器人将应用于异形玻璃切割、雕刻、绘画等.宏机械手为直接驱动的两关节平面机械手,可以在 $1.7\text{m} \times 0.7\text{m}$ 的水平面内运动;微机械手固定在宏机械手的末端,其核心是两个振镜扫描器,作业的实现通过激光完成.镜面反射的工作原理如图 2(b)所示,图中振镜的位置为初始位置,从图 2(b)所示的方位正面观察,振镜 1 在里侧,垂直于水平面,其初始位置在水平面投影与 X_m 夹角为 45° ;振镜 2 在外侧,垂直于侧面,其初始位置在侧面的投影与 Y_m 夹角为 45° ;激光从两个振镜之间水平射到振镜 1,然后反射到振镜 2,振镜 2 反射激光到工作台.振镜 2 不动,振镜 1 绕轴正负偏转,激光输出到工作台上的位置将在 X_m 轴上移动;振镜 1 不动,振镜 2 正负偏转,激光输出到工作台上的位置将在 Y_m 方向移动.两个振镜的协调运动可以使作业点 A' 在平面上运动.振镜的偏转角度限制在 $\pm 15^\circ$,微机械手的工作范围为 $40.4\text{mm} \times 40.4\text{mm}$.宏-微机器人的运动学方程:

$$\begin{cases} X = l_1 \cos \theta_{M1} + l_2 \cos \theta_{M2} + X_m \cos \theta_{M2} - Y_m \sin \theta_{M2}, \\ Y = l_1 \sin \theta_{M1} + l_2 \sin \theta_{M2} + X_m \sin \theta_{M2} + Y_m \cos \theta_{M2}, \\ X_m = d_1 \tan(2\theta_{m1}), \\ Y_m = d_2 \tan(2\theta_{m2}). \end{cases} \quad (19)$$

式中 $l_1 = 724.8\text{mm}$, $l_2 = 665.8\text{mm}$, $d_1 = d_2 = 35\text{mm}$. l_1 为后臂臂长, l_2 为前臂的有效臂长, d_1 为振镜 1、振镜 2 轴线间的距离, d_2 为振镜 2 轴与工作台平面的垂直距离, θ_{M1} , θ_{M2} 分别为后臂、前臂与 X 轴夹角; θ_{m1} , θ_{m2} 分别为振镜 1、振镜 2 旋转角度. (X_m, Y_m) 为作业点 A' 在微机械手参考坐标 $(O_m,$

$X_m, Y_m)$ 中表示, (X, Y) 为 A' 在基坐标 (O, X, Y) 中的表示.该宏-微机器人动力学参数可参考文献[6].

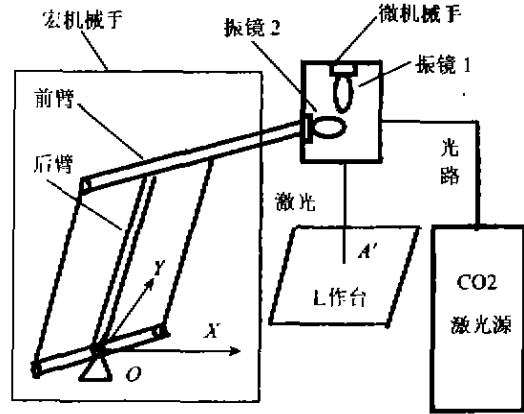


图 2(a) 激光作业的宏-微机器人示意图

Fig. 2 (a) The body of macro-micro manipulator

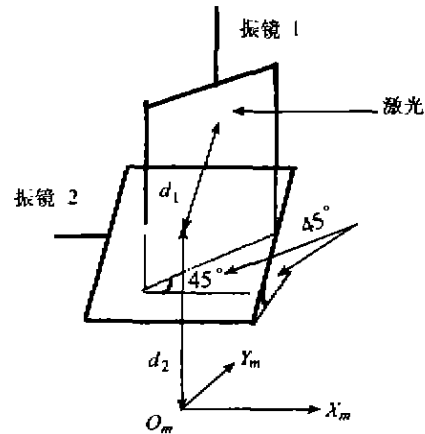


图 2(b) 振镜反射原理

Fig. 2 (b) Principle of mirror reflection

4.2 仿真研究 (Simulation)

我们让宏-微机器人以 1.2m/s 速度跟踪直径 25cm 圆,以 0.6m/s 的速度跟踪 $30\text{cm} \times 20\text{cm}$ 矩形.轨迹规划需考虑微机械手的关节限制,定义如下所示性能函数:

$$H(\theta) = \sum_{i=1}^2 [k_{Mi}(\theta_{Mi} - \theta_{M0})^2 + k_{mi}(\theta_{mi} - \theta_{m0})^2]. \quad (20)$$

θ_{i0} 为初始关节角度, $H(\theta)$ 最小即保证机械手有最小关节运动,调整权值 k_{Mi} , k_{mi} 可以调整关节范围.

图 3、图 4 是规划结果. (a), (b) 为规划出的关节轨迹,实线为关节 1,虚线为关节 2. (c) 为规划结果转换到工作空间的误差. $k_{M1} = k_{M2} = 1$, $k_{m1} = k_{m2} = 30$, 关节角度通过角速度求积分得到. 仿真结果指示微机械手关节角度 $|\theta_{mi}| < \pm 5^\circ$, 关节限制得

以保证;宏-微机器人起点和终点关节角度同一,机器人运动周期性得以保证;规划的关节轨迹转换到

工作空间,与期望工作空间轨迹误差:圆小于0.1mm,矩形小于0.15mm.

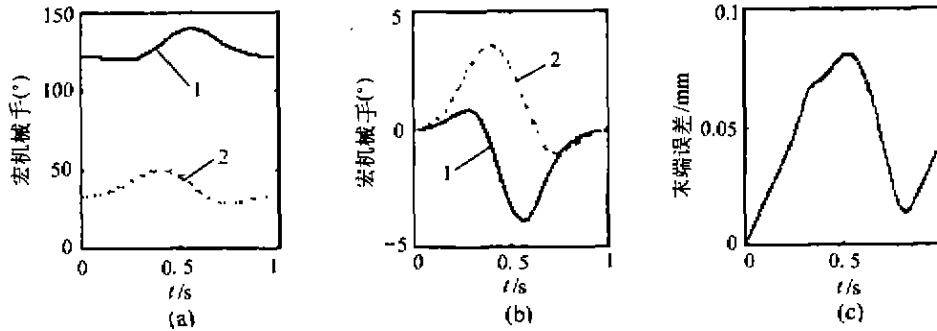


图3 圆规划结果

Fig. 3 Planning result of circle

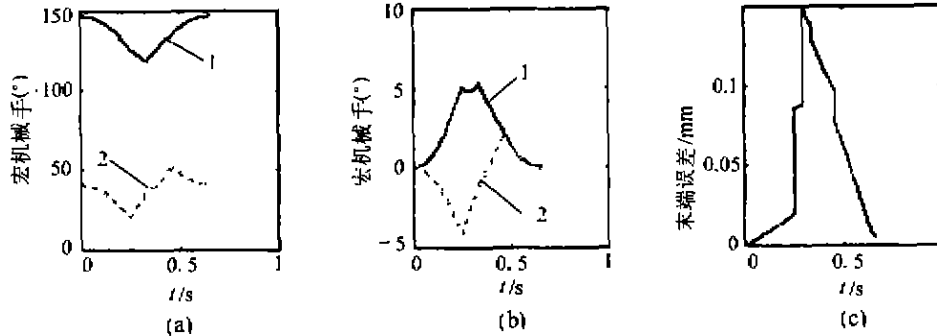


图4 矩形规划结果

Fig. 4 Planning result of rectangle

下面我们基于图1所示控制结构控制宏-微机器人跟踪圆和矩形,图5(a)是圆跟踪结果,图5(b)是矩形跟踪结果.圆轨迹误差小于0.06mm,矩形轨迹误差小于0.5mm.

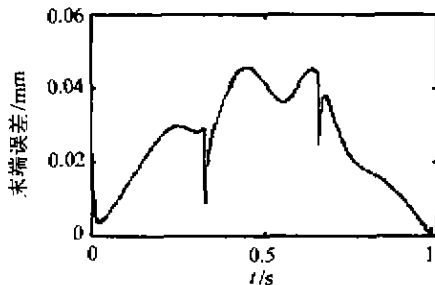
4.3 实验研究(Experiment)

我们首先将微机械手固定在初始位置(输入常控制量0),让宏机械以1.2m/s速度跟踪圆和以0.6m/s速度跟踪矩形,圆最大轨迹误差达3mm,矩形最大轨迹误差达7mm(矩形直角处).然后我们用图2所示宏-微机器人跟踪,基于本文的规划结果和控制结构,最大轨迹误差均小于1mm.以1.2m/s速度对圆的跟踪成功显示了宏-微机器人对跟踪加速度较大的轨迹的跟踪能力;对矩形的跟踪成功表明宏-微机器人能够处理轨迹中的速度、加速度突变点,也显示了宏-微机器人频带的提高.

5 结论(Conclusion)

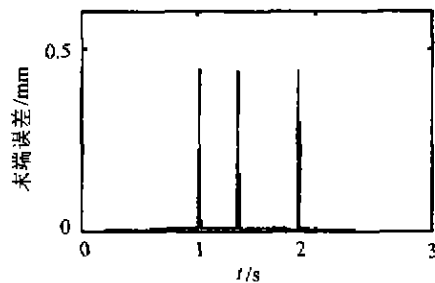
本文介绍了机器人连续轨迹跟踪的新方法,由一小的机械手附在一大机械手末端构成宏-微机器人系统,由宏机械手保证工作范围,由微机械手保证轨迹跟踪精度.对宏-微机器人控制在关节空间进行,通过微机械手的快速运动对宏机械手的轨迹误差在线补偿,控制算法为PD加前馈控制,较工作空间方法,实现简单,计算量小.

宏-微机器人都有冗余自由度,本文基于任务放大方法计算宏-微机器人运动学,通过运动学优化定义了机器人的额外任务,将Seraji任务放大方法具



(a) 圆跟踪仿真结果

Fig. 5 (a) Tracking result of circle



(b) 矩形跟踪仿真结果

Fig. 5 (b) Tracking result of rectangle

体化.任务放大方法可以保证机器人运动周期性,有解析解.本文的方法可以应用于一般的带冗余自由度的机器人的运动学求解.

本文的实验系统,微机械手为两个振镜,不是传统的连杆机械,作业的实现通过激光完成.宏-微机器人要求微机械手有高速度、宽频带,微机械手机构设计有必要突破传统的连杆机构限制.本文的设计思想对平面轨迹跟踪作业具有代表性.

参考文献(References)

- [1] Chen Huitang, Jiang Pung, Zhu Wenghong, et al. Comparative study of D. D. robot control algorithms for trajectory tracking [A]. In: Anderson ed. Proc. of the 12th IFAC World Congress [C]. Sydney, 1993. 157 - 160
- [2] Sharon A, Hogen N and Hardt D E. High bandwidth force and inertia reduction using a macro/micro manipulator system [A]. In: Pavlidis T, ed. Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation [C]. Philadelphia, USA, 1988. 126 - 132
- [3] Yim W and Singh S N. Nonlinear inverse and predictive end point

trajectory control of flexible macro-micro manipulators [A]. In: Gentler J J, ed. Proc. of the 13th IFAC World Congress [C]. San Francisco, USA, 1996. 97 - 102

- [4] Liegeois A. Automatic supervisory control of the configuration and behavior of multibody mechanisms [J]. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, 1977, 7(12): 869 - 871
- [5] Seraji H. Configuration control of redundant manipulators: theory and implementation [J]. IEEE Trans. on Robotics and Automation, 1989, 5(4): 472 - 491
- [6] Yangwei, Chen Qijun and Wand Yuejuan. Fast and precise trajectory tracking control implementation of macro-micro manipulators [A]. In: Huang Xinhan, ed. Proc. of International Conference on Artificial Intelligence for Engineering [C]. Wuhan, 1998. 627 - 631

本文作者简介

陈启军 1966年生, 1987年毕业于华中理工大学自动控制系, 1990年在西安交通大学获硕士学位, 1999年在同济大学获博士学位. 现为同济大学副教授. 研究兴趣: 机器人控制, 智能控制.

王月娟 女, 1937年生, 博士生导师. 研究领域: 机器人控制, 智能控制.

陈辉堂 1935年生, 博士生导师. 研究领域: 机器人控制, 智能控制.

20届中国控制会议

征文通知

20届中国控制会议拟定于2001年8月在大连召开, 会议由中国自动化学会控制理论专业委员会和大连理工大学信息与控制研究中心联合举办. 具体事宜如下:

一、征文范围

非线性系统; 最优控制; 鲁棒控制; H_{∞} 控制; 预测控制; 随机控制; 自适应控制; 模型降阶; 优化方法; 系统建模与辨识; 稳定性分析; 变结构控制; 分布参数系统; DESS与HDS; 大规模、复杂系统; 过程控制; 模糊系统与控制; 神经网络; 专家智能控制; CIMS; 机器人控制; 故障检测与诊断; 电力系统; 交通系统; 社会经济系统; 生态环境系统; 上述各主面的实际应用.

二、征文要求

· 每篇论文长度不超过五页(A4), 一式三份寄到秘书处, 中英文均可, 论文用双栏打印, 字体为10磅, 单倍行距. 除论文外, 请另附纸写明: 论文题目、作者姓名、作者单位、通讯地址、电子邮件地址、摘要、关键词3至5个.

· 拟组织特邀组的作者请提供1000字的摘要并于2001年3月15日前寄到秘书处, 同一特邀组的论文的主题应鲜明、集中.

· 拟正式出版会议论文集, 部分论文拟由《自动化学报》或《控制理论及其应用》出版增刊, 会议用语为中文(英文可接受).

三、重要日期

· 论文投稿截止: 2001年3月15日; 论文录取通知: 2001年5月15日; 激光稿寄到时间: 2001年6月15日.

四、秘书处

刘智敏 教授

北京中关村中科院系统科学所, 100080

电话: 86-10-62532161 传真: 86-10-62587343

E-mail: lzm@iss03.iss.ac.cn www: http://iss03.iss.ac.cn/ccc2001