

绳索牵引康复机器人控制及仿真研究

张立勋,王克义,徐生林

(哈尔滨工程大学 机电工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:康复机器人是典型的人机合作系统.人与机器人在同一物理空间,因此对机器人的柔顺性、安全性提出了严格要求.绳索驱动具有柔顺性好、占空间小、重量轻等特点,不会与人体产生刚性碰撞、冲击,非常适合于康复机器人的驱动控制.由于绳索的柔性使其只能承受拉力,其牵引构成冗余驱动系统,因此绳索位置伺服系统须引入力控制,保证工作时绳索具有一定的张力.针对康复训练机器人的人体骨盆控制问题,设计了基于绳索驱动的伺服控制系统,通过 Matlab 提供的 sisotool 进行 PI 和 PD 控制器的设计,并对张紧力、位置和二者之间的相互影响进行了仿真分析,证明了绳索驱动适合对骨盆规律的控制,并且可以在其他绳索牵引控制技术中得到应用和推广.

关键词:绳索牵引;力控制;伺服控制;骨盆运动

中图分类号: TP242.3; TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785(2008)01-0051-06

Control and simulation of a wire-driven rehabilitative robot

ZHANG Li-xun, WANG Ke-yi, XU Sheng-lin

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Rehabilitative robots function in a typical man-machine cooperation system. In this system, robot and patient must occupy the same space, making compliance and safety essential requirements. Since wire-driven systems have such characteristics as good compliance, light weight, and without rigid hitting or striking with patients, they are well suited for driving rehabilitative robots. However, wires can only provide tensile force, so they must have an opposing driving system to regulate motion. Force control is required in a wire position servo system to ensure it demands appropriate effort from the patient and maintains the patient in the correct position. A wire position servo system was designed for control of the motion of a human's pelvis. Proportional and integral (PI) and proportional and derivative (PD) controllers were designed with Sisotool in Matlab. Finally, interaction between tension and position was simulated and analyzed, proving that wire-driven modes can effectively control pelvic motion. This method can also be applied and extended to control other wire-driven modes.

Key words: wire-driven; tension control; servo control; pelvic motion

绳索牵引并联机构作为一种新型的并联运动机构,具有结构简单、惯性小、运动空间大、高负载能力、易拆装和运动速度快等优点.从20世纪90年代初至今许多国家的研究人员纷纷开展这方面的研究工作,并取得了一批瞩目的研究成果,特别是法国国家航空局支持的 SACSO 项目关于绳牵引并联机构

应用于飞行器风洞试验的研究^[1].我国华侨大学和西安电子科技大学也对绳索牵动的并联机构进行了理论研究^[2-3],取得了一些成果.

随着人们物质生活水平的提高,对康复医疗设备提出了更高的要求,康复训练机器人能够克服人类由各种因素致使的功能障碍或残疾,使其最大程度地恢复或代偿原有功能,实现最大限度地生活自理,提高生活质量.在下肢康复训练过程中,由于具有行走功能障碍的患者大部分不能正常控制重心,甚至无法实现对自身躯干的支撑能力,丧失平衡机

收稿日期:2007-07-06.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60575053);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20060217024).

通讯作者:张立勋. E-mail: zhanglixun@hrbeu.edu.cn.

能,因此提出控制骨盆运动,使其与下肢步态运动相协调,实现重力平衡及重心控制.关于如何支撑人体躯干部分,现在国外采用的主要是利用一根绳索垂直牵引着,用以平衡重力,防止患者摔倒,其无法控制骨盆的运动规律,不能很好地配合下肢的训练;还有利用液压缸驱动的杆支撑,在腰部处控制运动,该方式仅控制前后的运动,无法完全满足骨盆的运动规律,与此同时,该方式较庞大、安全性相对较低^[4].

综上所述,提出了利用绳索牵引并联机构控制骨盆的运动规律.有关绳索牵引并联机构的运动空间、静态刚度、轨迹规划^[5]等相关技术报道较多,而关于文中所研究的伺服控制相关技术报道较少.

1 绳索牵引骨盆运动控制机构

人在正常行走时,骨盆中心有前后、左右、上下移动和绕垂直轴转动4个自由度(1R3T),根据文献[4],由5根绳索构成的欠约束并联机构控制骨盆1R3T运动,对其绳索布置方案进行修正,如图1所示.

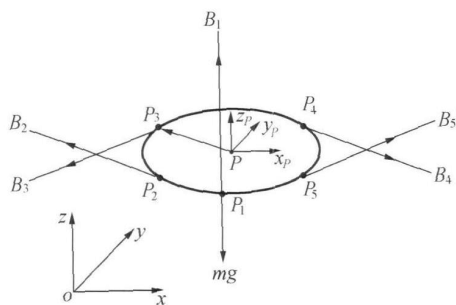


图1 绳索牵引并联机构示意图

Fig. 1 Sketch of parallel mechanism by wire-driven

设机构固定坐标系为 $oxy z$, 动平台坐标系为 $Px_p y_p z_p$, $B_i (i = 1, 2, \dots, 5)$ 为绳与滑轮的连接点, P_i 为绳与动平台的球铰链的中心. 设 $L_i = P_i B_i$, $l_i = |L_i|$, $u_i = L_i / l_i$, t_i 为第 i 根绳所受的拉力, mg 为受训者重力, 显然作用到动平台上的力为 $T_i = t_i u_i$, P 为动平台的重心, 且 $r_i = P P_i$.

骨盆所受的力螺旋平衡方程可以表示为

$$F = J^T T. \quad (1)$$

式中: F 是骨盆所受的力螺旋, 包括惯性力, 由4个分量(自由度数)组成的向量; T 是 t_i 分量组成的向量 $(t_1 \ t_2 \ t_3 \ t_4 \ t_5)$; J^T 是5个旋量组成的一个旋量系:

$$J^T =$$

$$\begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 & u_4 & u_5 \\ r_1 \times u_1 & r_2 \times u_2 & r_3 \times u_3 & r_4 \times u_4 & r_5 \times u_5 \end{bmatrix}_{4 \times 5}.$$

式中: J^T 由绳索布置方案确定, 当已知骨盆所受外力(包括惯性力), 可得绳索拉力:

$$T = (J^T)^+ F + T_{nul}. \quad (2)$$

式中: $(J^T)^+$ 为 J^T 的 Moore-Penrose 广义逆, T_{nul} 是零空间 $N(J^+)$ $R^4 \times 5$ 的一个分量. 由图1并且参考文献[4], 基于骨盆在步态运动过程中动力学平衡可得方程:

$$\begin{cases} -t_{2x} - t_{3x} + t_{4x} + t_{5x} = ma_x, \\ t_{2y} - t_{3y} - t_{4y} + t_{5y} = ma_y, \\ f + t_{5z} - mg = ma_z, \\ r_2 \times u_2 \cdot t_2 + r_3 \times u_3 \cdot t_3 + r_4 \times u_4 \cdot t_4 + \\ r_5 \times u_5 \cdot t_5 = J. \end{cases}$$

式中: f 表示腿的支撑力, t_{2x} 表示 t_2 在 x 轴上的分量, 以此类推. 由(2)式可知, 关于上述方程组存在多解, 考虑到一般受训者在康复训练过程中不具有平衡能力, 为实现稳定的运动规律, 需保证系统具有一定的刚度, 列出其刚度约束方程如下:

$$\begin{cases} \min((t_{2x} + t_{3x}), (t_{4x} + t_{5x})) & C_x, \\ \min((t_{2y} + t_{5y}), (t_{3y} + t_{4y})) & C_y, \\ F + t_{5z} & C_z, \\ \min((r_2 \times u_2 \cdot t_2 + r_4 \times u_4 \cdot t_4), \\ (r_3 \times u_3 \cdot t_3 + r_5 \times u_5 \cdot t_5)) & C_{M_z}. \end{cases}$$

式中: $C_i (i = x, y, z, M_z)$ 表示系统的刚度要求. 根据动力学平衡方程和刚度约束方程所建立的协调关系, 可以解出冗余驱动, 即可实现对骨盆中心的控制. 鉴于此绳索牵引系统较为复杂, 文中以沿矢状轴移动绳索牵引控制系统为例, 介绍绳索牵引康复训练机器人的控制系统设计与仿真, 该方向的控制如果能够实现, 其他方向控制思想与其相同. 绳索牵引简化模型如图2所示, 即将图1中绳索 b_2 和 b_3 力合成图2中的 b_2, b_4 和 b_5 力合成 b_1 .

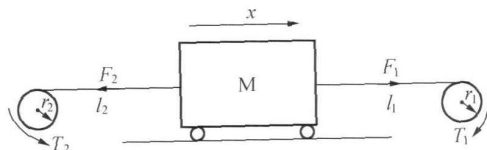


图2 绳索牵引系统模型

Fig. 2 System model about wire-driven

2 绳索驱动系统的数学模型

在图 2 模型中,滚轮由直流力矩电机驱动,可得电机 1、2 电枢回路的电压平衡方程分别为

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 + C_{e1} \dot{m}_1 = u_1, \tag{3}$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2 + C_{e2} \dot{m}_2 = u_2. \tag{4}$$

式中: m_1 、 m_2 为电机 1、2 的转角; u_1 、 u_2 为电机 1、2 的电枢电压; C_{e1} 、 C_{e2} 为电机 1、2 的反电动势常数; L_1 、 L_2 为电机 1、2 的电枢回路电感; i_1 、 i_2 为电机 1、2 的电枢回路电流; R_1 、 R_2 为电机 1、2 电枢回路的电阻.

2 个电机的力矩平衡方程分别为

$$T_1 = i_1 \cdot C_{m1} - \dot{m}_1 B_1 - J_{m1} \ddot{m}_1, \tag{5}$$

$$T_2 = i_2 \cdot C_{m2} - \dot{m}_2 B_2 - J_{m2} \ddot{m}_2. \tag{6}$$

式中: C_{m1} 、 C_{m2} 为电机 1、2 的力矩常数; J_{m1} 、 J_{m2} 为电机 1、2 的转动惯量; B_1 、 B_2 为电机 1、2 的粘滞摩擦系数.

由绳轮的半径 $r_1 = r_2 = r$, 并且忽略绳索的拉伸变形, 可得系统的力平衡方程为

$$F_1 - F_2 = T_1 / r_1 - T_2 / r_2 = M \ddot{x}.$$

由式 (3)、(4)、(5) 拉氏变换后并联立得系统的传递函数为

$$X(s) = \frac{I_1(s) C_{m1} - I_2(s) C_{m2}}{r(M_e s + B_e)s}.$$

式中: $M_e = M + \frac{1}{r^2} (J_{m1} + J_{m2})$, $B_e = \frac{1}{r} (B_1 + B_2)$.

由式 (3)、(4) 并经过拉氏变换整理得

$$I_1(s) = \frac{U_1(s) - C_{e1} \frac{X(s)s}{r}}{L_1 s + R_1}, \tag{7}$$

$$I_2(s) = \frac{U_2(s) - C_{e2} \frac{X(s)s}{r}}{L_2 s + R_2}. \tag{8}$$

由式 (6)、(7)、(8) 得控制系统方框图如图 3 所示, 其中 $F(s) = \frac{1}{2} (F_1(s) + F_2(s))$ 是绳索的平均张力, 以此作为刚度控制的目标. 该系统是一个双输入双输出系统, 通过对电机电枢电压 U_1 、 U_2 的控制可以实现对象的位移 X 与绳索平均张力 F 的控制.

3 控制系统设计

根据力控制系统和位置控制系统的特点, 针对骨盆沿矢状轴平移控制对象的力环和位置环分别采用 PI 和 PD 控制器, 得到闭环控制系统方框图如图 4 所示, 已知系统参数为 $L_1 = L_2 = 0.001 \text{ H}$, $R_1 =$

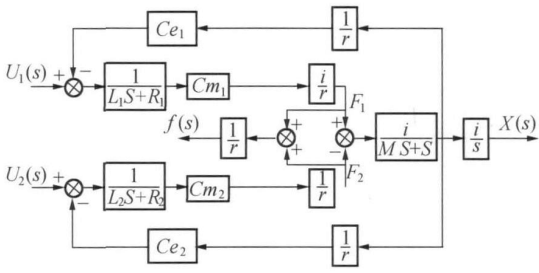


图 3 控制对象方框图

Fig. 3 Block diagram of control object

$R_2 = 2.5$, $C_{e1} = C_{e2} = 0.119 \text{ V} \cdot \text{S/rad}$, $C_{m1} = C_{m2} = 1.136 \text{ V} \cdot \text{S/rad}$, $r = 60 \text{ mm}$, $M_e = 43 \text{ kg}$, $B_e = 371 \text{ N} \cdot \text{s/rad} \cdot \text{m}$, 分别设计力、位置控制器, 使其在超调量为零的前提下响应速度最快.

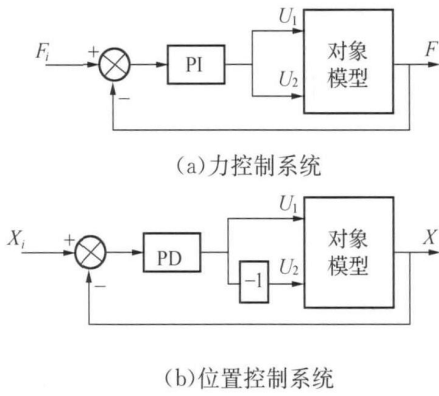
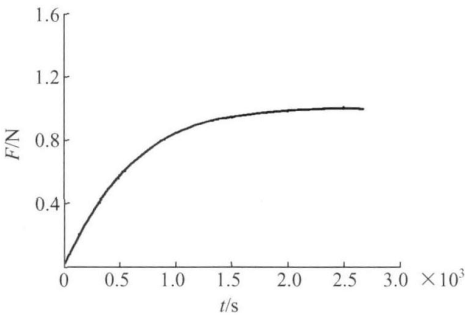


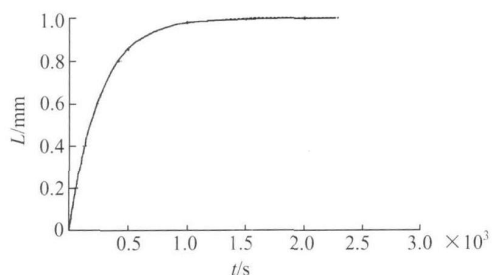
图 4 力、位置单独控制系统模型

Fig. 4 The control system about tension and position

通过 Matlab 提供的 sisotool 工具分别设计出 PI 和 PD 控制器参数, 其中力控制器的 PI 参数为 $K_{P1} = 1.6$, $K_I = 3000$, 位置控制器的参数 $K_{P2} = 18725$, $K_D = 2080$. 力、位置闭环控制系统的阶跃响应如图 5 所示. 由图 5 可知, 力、位置伺服系统的超调量均为 0, 调整时间分别为 2 ms 与 200 ms. 将上述 2 种控制模型进行合成, 如图 6 所示, 得到力和位置处于同一地位的双输入双输出混合反馈控制系统, 实现对骨盆沿矢状轴平移的刚度和位置控制^[7].



(a) 力控制系统的阶跃响应



(b)位置控制系统的阶跃响应

图5 力、位置伺服系统的阶跃响应

Fig. 5 The step response of tension and position servo control system

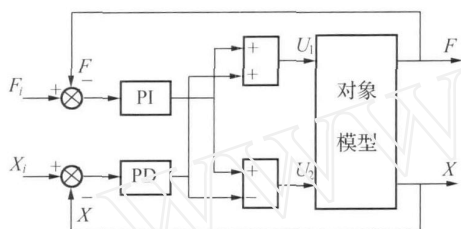


图6 闭环控制方框图

Fig. 6 The closed-loop block diagram of control system

4 控制系统仿真分析

为了分析力、位置控制系统性能及它们之间的相互影响,对图6所示双输入双输出控制系统进行不同输入条件的仿真分析.

4.1 力对位置控制的影响分析

图7是在给定200 N张力输入,并进入稳态后,对系统再输入100 mm幅值的 x 方向位置干扰的响应曲线.由图7可知,力响应和位置响应都很好,看不出他们之间的相互影响.说明力输入对位置的影响是很小的,系统对力干扰有很好的鲁棒性.

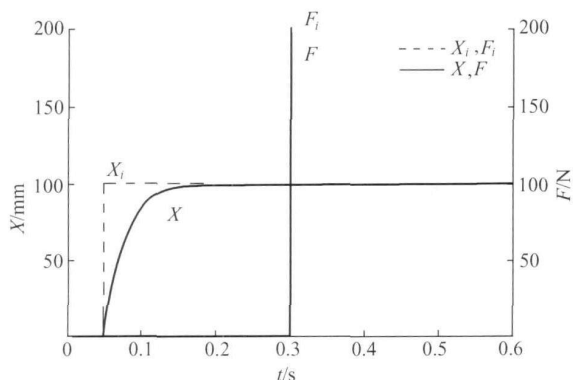
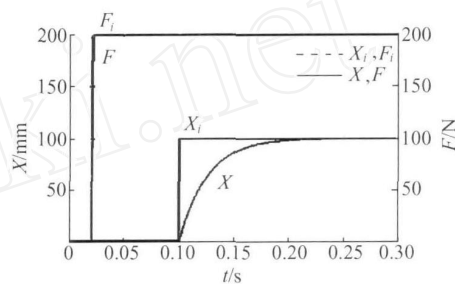


图7 力变化对位置影响

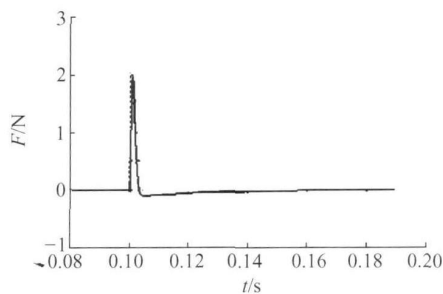
Fig. 7 The effect of changing tension on position

4.2 位置对力控制的影响分析

图8是在给定系统位置输入100 mm,位置响应进入稳态后,对系统输入200 N的张力干扰信号的响应曲线.由图8(a)可知,位置、力的输出响应都很好,看不出他们之间的相互影响.图8(b)为放大后的力误差曲线,可见输入位置后,产生了2 N的力偏差,占输入力的1%,柔度为0.02 N/mm,说明力控系统对位置扰动具备较好的抗干扰能力.



(a)位置变化对力影响



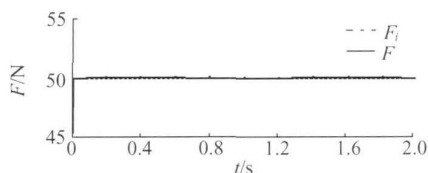
(b)力误差曲线

图8 位置变化对力影响

Fig. 8 The effect of changing position on tension

4.3 力、位置控制实际情况仿真分析

对实际的控制系统,系统的位置输入为一个近似正弦信号(如行走过程中,骨盆的左右移动),而张力信号是根据控制柔顺性确定的一个常值力.控制系统的输入相当于正弦位置信号和常值力信号,图9是当 F 从50 N增加到500 N, $X = 50 \sin t$ 时的仿真结果.由图9可知,系统在不同常值力条件下都可以获得较高的位置控制精度,可以在不影响位置控制性能的前提下实现不同张力的控制.



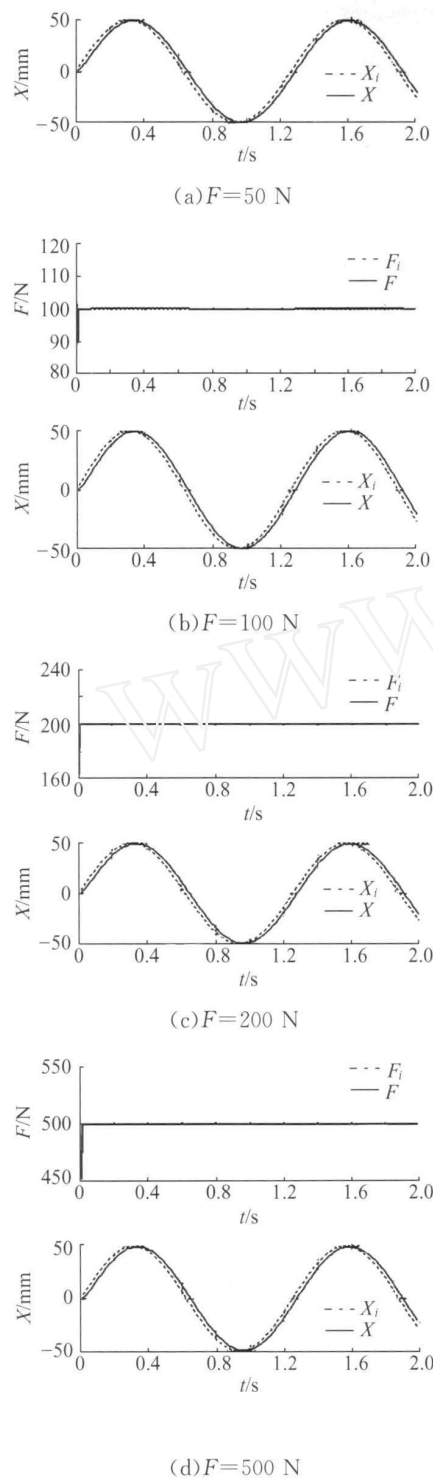


图 9 常力条件下的位置控制响应

Fig. 9 Position response under constant tension

5 结束语

针对下肢康复机器人的控制要求,用 5 根绳索实现骨盆 X 、 Y 、 Z 方向移动和绕 Z 轴转动四自由度控制方案,针对骨盆前后方向的位置控制建立了直流力矩电机驱动的绳索控制系统模型. 设计了力、位

置双输入双输出控制系统. 仿真结果表明,控制系统可以实现力、位置双变量的控制,力、位置控制的相互影响很小. 可以分别根据力和位置控制指标的要求设计力和位置控制系统的参数,合成后的力、位置双变量控制系统具有良好的鲁棒性,可以实现在希望柔顺性(一定张力)条件下的位置伺服控制,这是对绳索驱动控制的一个成功尝试. 经过进一步完善这种控制方法可以应用到康复机器人的多自由度系统. 系统该设计过程也为其他绳索牵引控制提供了一种有效的方法.

参考文献:

[1] LAFOURCADE P, ZHENG Y Q, LIU X W. Stiffness analysis of wire-driven parallel kinematic manipulators [C]// Proceeding of 11th World Congress in Mechanism and Machine Science. Tianjin, 2004.

[2] 魏 强,仇原鹰,段宝岩,等. 八根索系大型射电望远镜源舱运动轨迹规划[J]. 中国机械工程,2002,23(12): 2036-2039.

WEI Qiang, QIU Yuanying, DUAN Baoyan, et al. Locus program of cabin movement for the large radio telescope with eight cables[J]. China Mechanical Engineering, 2002, 23(12): 2036-2039.

[3] 郑亚青,刘雄伟. 绳牵引并联机构的研究概况与发展趋势[J]. 中国机械工程,2003,5(9): 808-810.

ZHENG Yaqing, LIU Xiongwei. Research survey and development tendency of wire-driven parallel manipulators[J]. China Mechanical Engineering, 2003, 5(9): 808-810.

[4] 张立勋,王克义,张今瑜,等. 基于绳索牵引的骨盆运动并联储复机器人的可控性研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(7): 790-794.

ZHANG Lixun, WANG Keyi, ZHANG Jinyu, et al. Research on the controllability of wire-driven parallel manipulator in exercise of pelvis[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007, 28(7): 790-794.

[5] BARRETTE G, GOSSELIN C M. Kinematic analysis and design of planar parallel mechanisms actuated with cables[C]// Proceedings of ASME Design Engineering Technical Conference. Baltimore, USA, 2002.

[6] MANFRED H, SHIQING F, SONJA M, et al. Design

analysis and realization of tendon-based parallel manipulators[J]. Mechanism and Machine Theory, 2005, 40(4): 429-445.

[7] DRIELS M. Linear control systems engineering [M]. California: McGraw-Hill, 2000.

作者简介:



张立勋,男,1962年生,教授,博士生导师,主要研究方向为康复机器人技术、人机合作机器人技术,主持2项国家自然科学基金、1项国家博士点基金和多项省级项目,发表论文100余篇,其中被SCI、EI检索30余篇。



王克义,男,1979年生,讲师,博士研究生,主要研究方向为康复机器人技术、并联机器人技术,发表论文4篇。



徐生林,男,1981年生,硕士研究生,主要研究方向为康复机器人技术、并联机器人技术。

第11届中国机器学习会议

The 11th China Conference on Machine Learning

第11届中国机器学习会议(CCML2008)由中国人工智能学会机器学习专业委员会和中国计算机学会人工智能与模式识别专业委员会联合主办,大连海事大学承办。该系列会议每两年举行一次,现已成为国内机器学习界最主要的学术活动。此次会议将为机器学习及相关研究领域的学者交流最新研究成果、进行广泛的学术讨论提供便利,并且将邀请国内机器学习领域的著名学者做精彩报告。

征稿范围(征求但不限于如下主题):

机器学习的新理论、	多示例学习	对复杂结构数据的学习	模式识别
新技术与新应用	神经网络	增强学习系统可理解性	信息检索
人类学习的计算模型	集成学习	数据挖掘与知识发现	生物信息学
计算学习理论	多策略学习	聚类	语音、图像处理与理解
监督学习	特征选择	进化计算	自然语言理解
非监督学习	流形学习与降维	人工生命	
半监督学习	基于案例的推理	模糊集与粗糙集	
强化学习	增量学习与在线学习	多 Agent 系统中的学习	

投稿要求:

1. 论文必须未公开发表过,一般不超过6000字;中、英文稿均可接受;
 2. 论文应包括题目、作者姓名、作者单位、摘要、关键字、正文和参考文献;另附作者通讯地址、邮编、电话或传真及E-mail地址;
 3. 参选优秀学生论文的稿件请注明(须由在校博士生、硕士生或本科生为第一作者);
- 详见会议网站: <http://www.dlmu.edu.cn/ccml2008>.