

A Perceptual Foot System of Humanoid Robot Based on the Integration of Multi-Sensors *

SHEN Fei¹, WU Baoyuan^{2*}, LUO Jianfei¹, REN Yang¹, WU Zhongcheng²

(1. Department Automation, University of Science & Technology of China, Hefei 230027, China;)
(2. Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: It is well known that the foot of humanoid robot serves as not only the main part contacting with the ground but also the unique foundation for supporting the body. The capability of various kinds of ground information detection is certainly used as the key control of walking steadily and naturally for humanoid robot. A new-type perceptual foot system with perceive ability to detect and process various kinds of information (such as foot posture, support area, ground force and position, etc;) in complicated environments was designed on the integration of 6-axis force sensor, inertial measurement unit (IMU) and flexible array sensor. Theoretical analysis and simulation results have proved the feasibility of the design, which provides research platform in promoting the innovation of humanoid robot for theoretical research, control technology, bionic gait planning and system structure.

Key words: humanoid robot; IPFS; F/T sensor; IMU; flexible force array sensor (FFAS)

EEACC: C4185; B7130; B7230

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2011.12.009

基于多传感器集成的仿人机器人足部感知系统 *

申 飞¹, 吴宝元^{2*}, 罗健飞¹, 任 阳¹, 吴仲城²

(1. 中国科学技术大学自动化系, 合肥 230027;)
(2. 中国科学院合肥物质科学研究院, 合肥 230031)

摘 要: 足部是仿人机器人本体支撑的基础,也是唯一与地面接触并发生相互作用的主要部件,其各种地面信息获取能力是机器人实现仿人的自然性稳定行走控制的关键。基于六维力传感器、惯量测量单元和柔性触觉阵列传感器,设计了一种新型仿人机器人集成化足部感知系统(IPFS),具备对各种地面环境识别和足部姿态获取、足底与外界接触位置的实时感知和估计、有效支撑区域、地面反力以及姿态等信息的感知能力。实机实验结果表明足部感知系统较好地满足仿人机器人理论化和实用化需求,为促进仿人机器人理论研究、控制技术、仿生步态规划及其体系结构的创新提供了实验研究平台。

关键词: 仿人机器人; 足部感知系统(IPFS); 六维力传感器; 惯量测量单元; 柔性阵列力传感器

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2011)12-1701-06

仿人机器人是近年来发展起来的综合学科。在人类的生存环境中,实现双足稳定可靠行走是仿人机器人最基本的功能,也是仿人机器人实用化的前提条件。从近几年国内外仿人机器人技术发展的趋势和应用需求来看,如何适应各种不同路面状况和人类生存环境,增强仿人机器人在未知环境中的适应能力,已成为众多研究者所关注的重点研究内容之一,并取得了一些成果^[2-5]。目前,零力矩点 ZMP (Zero Moment Point) 判据作为稳定步态规划方法的理论基础被广泛采用,从双足或躯干的运动轨迹确定 ZMP 轨迹,实现了稳定行走^[6-7],其中,基于仿人

机器人踝关节的多维力传感器获得 ZMP 等信息,进而实时调整步态参数,设计合理的双足和躯干轨迹,以此来增强机器人环境适应能力已成为仿人机器人控制技术研究的一个发展趋势^[8-12]。

足部感知系统是仿人机器人唯一与地面接触并发生相互作用的关键部件,其获取的各种地面信息是机器人实现仿人的自然性稳定行走控制的关键。目前国内外各种仿人机器人的足部系统主要是采用六维力传感器和陀螺仪,还不能满足仿人机器人实用化需要。实际上,人行走过程中,足底的神经末梢可实现地面接触位置、地形、地面反作用力大小和方

项目来源: 国家高技术研究发展计划(863 计划)面上项目(2008AA04Z205); 重点项目(2008AA0420601)

收稿日期: 2011-07-06 修改日期: 2011-09-16

向等信息的实时感知,并及时反馈到中枢神经系统,使之能及时调整身体姿势。仿人机器人要实现适应人类生活、工作环境,仅仅依靠六维力信息还远不能满足应用要求,仿人机器人稳定步态规划仅依靠六维力传感器检测的信息是不够充分的,并且,足部翻转指示点(Foot Rotate Indication, FRI)^[1,13],翻转稳定指标点(Rotational Stability Index (RSI) Point)^[14]等稳定性判据的实现,需要足部具备对各种地面环境识别和足部姿态感知能力,实现足底接触位置、有效支撑区域(Effective Contact Area, ECA)、地面反力以及姿态等信息的实时感知和估计。

对此,本文设计了一种具有复杂地面环境感知能力的集成化仿人机器人足部感知系统,一方面可以实时获取足部姿态和地面环境信息参数,实现机器人行走过程中有效稳定支撑区域、ZMP 轨迹、地形、地面反作用力等信息实时感知和处理;另一方面,可以有效减少机器人中央控制系统处理器的计算负担,增强机器人实时性和快速反应能力。实机实验结果表明这种集成化足部感知系统可以实时为机器人中央控制系统提供较为充分的地面环境信息,为建立和完善的仿人机器人的仿生步态规划以提高仿人机器人的步态稳定性和自然性提供信息支持和实验研究平台。

1 足部感知系统架构

1.1 设计原则

机器人足部作为机器人的主要部件,在充分了解人足行走功能基础上开展足部设计很有必要,在人体的正常行走步态中,足部除了协调人体平衡外,主要支撑人体重量、吸收地面冲击力和振动、减小对末端关节载荷和增加行走舒适性。

足部作为仿人机器人承受外部载荷的唯一部件,位于腿部运动链的末端,承受的惯性力最大。因此,足部应采用轻质结构设计,并满足一定强度,以承受发生在足跟触地(Heel-Strike)时刻的几倍于机器人重量的冲击载荷^[15]。

行走过程中,足底反作用力有可能作用在足底有限区域内,将影响机器人的平衡和步行效果,特别是行走在不平地面时产生的惯性力将引起接触区域的重新分布,尽管在平整地面静态行走情况下,足底的 ECA 可不考虑,但是在不平地面下,动态行走平衡控制将 ECA 分布视为主要的影响因素。

鉴于上述分析,基于人足行走功能分析的仿人机器人足部感知系统设计应着重考虑以下原则:

(1) 尽可能增大足底与不同地面间的附着力以

真实反映地面反力状态;

(2) 足部结构具有足够刚度以确保机器人系统稳定性,;

(3) 柔性足部结构设计,足底具有一定的冲击力缓冲作用以保证机器人稳定;

(4) 具有有效接触面积的获取和地面环境状态感知能力;

(5) 外表美观且重量轻,且具有抗外界电磁干扰的能力,确保信息真实可靠。

1.2 系统架构

基于上述原则分析,足部系统架构重点考虑以下问题:

(1) 减小六维力传感器的形心坐标与地面间的距离,尽可能降低机器人重心高度,易于机器人保持平衡;

(2) 为达到足-地减震效果,在足跟和足趾两端采用空气型腔结构设计,特别是足跟着地时的冲击力;

(3) 足底板采用平板设计,可以保持双足支撑期内的踝关节位置相对趋于稳定;另一方面,平板设计可以使得足部与地面的接触面积最大化,有助于机器人保持稳定,并且航空铝材料的选用,符合重量轻,强度高的要求;

(4) 足部感知信息包括:足部姿态、ECA 分布、ZMP 轨迹、地面反力信息以及惯性力信息等,通过 DSP 高速处理器采集处理后发送到机器人中央控制系统(Central Control System of Robot, CCSR),从而大大减轻 CCSR 的运算负担,提高机器人的控制响应能力。

集成化足部感知系统主要包括:信号处理模块、电源模块、六维力/力矩传感器模块、惯性测量模块、柔性力传感器阵列模块等。

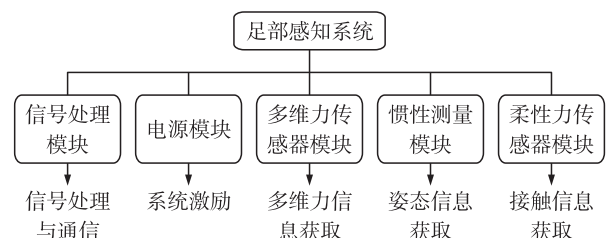


图1 集成化足部感知系统模块组成

2 传感器系统配置与模块设计

2.1 六维力信息获取模块

拟采用一体化平面结构的六维力传感器设计思想,所设计的传感器固定端、负载端和弹性体处于同一平面内,对各维分量采用特定组桥方式实现信号

独立提取,以实现传感器各维之间弱耦合设计,从原理上可实现结构解耦,同时有效降低六维力传感器的整体高度。RTI 六维力传感器主要静态指标如表 1 所示^[16]。

表 1 RTI 六维力传感器主要静态指标

RTI 六维力传感器	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
各维向非线性(≤FS%)	0.16	0.11	0.17	0.14	0.12	0.4
非线性	≤0.24 FS%					
重复性	≤0.28 FS%					
零点稳定性	≤0.22 FS%					
I 类综合误差	≤0.45 FS%					
II 类综合误差	≤1.87 FS%					
分辨力	$F_x/F_y/F_z:0.1\text{ N};$ $M_x/M_y/M_z:0.003\text{ Nm}$					
灵敏度	0.3 mV/N·V;3.1 mV/Nm·V					

2.2 姿态信息获取模块

本足部系统姿态信息获取选用 ADI 公司的 ADIS16355[®] 惯性感应系统来完成,用于检测 X/Y/Z 三个轴向的加速度和绕三个轴的角速度运动,以获取惯性力和脚的姿态的信息^[17]。具体实现过程:

- (1)当机器人足部静止时,对采集的三轴加速度信息进行计算,得到静态脚面倾角信息;
- (2)当机器人足部非静止时,对采集的三轴角速度信息进行计算得到角度变化值;
- (3)对上述静态脚面倾角信息和角度变化值进行计算,得到实时脚面倾角信息。

2.3 有效接触区域信息获取模块

FSR 柔性力传感器阵列由两个压电橡胶材料制成的聚合体薄片组成(如图 2 所示),利用压阻效应实现足底与地面接触过程中的压力分布,以实现地面接触位置、有效支撑区域与地面环境的识别。

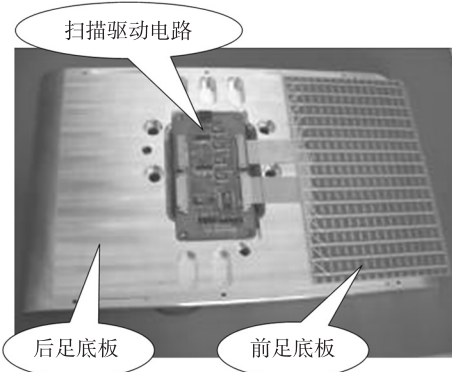


图 2 16×16 柔性力传感器阵列及贴装示意图

2.4 DSP 信息处理系统

DSP 可以实现较为复杂的控制算法,以及大量传感器信息的快速处理,并具有开放性功能、高速高性能和模块化等特点,适用于各种先进智能装备的系统控制,足部系统以 DSP 微处理器为核心,通过 A/D(模数转换)实时采集倾角传感器和六维力传感器的信息,通过 I/O(输入/输出接口)实时采集触觉阵列的信息,综合这些信息进行处理(如:足部姿态、足-地接触位置、接触形状、行走路面的平整度以及反作用力等信息),并通过通讯总线将这些信息发送给仿人机器人的控制系统,减少了仿人机器人控制系统的计算工作量,节约了控制系统的响应时间,不仅为仿人机器人的控制系统提供实时的步态信息,而且为仿人机器人的步态规划提供更加充分的路面环境信息,提高仿人机器人控制系统的响应速度。足部感知系统信号处理模块及框图如图 3~图 4 所示。



图 3 足部感知系统信号处理模块

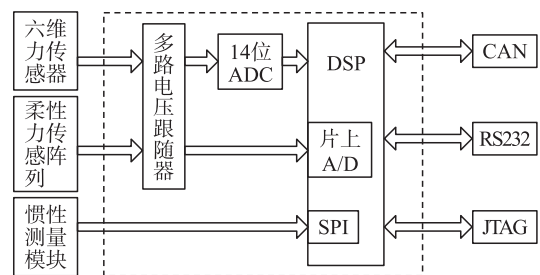


图 4 信号处理模块框图

2.5 足部感知系统上位机程序

集成化足部感知系统上位机程序(如图 5 所示)具有足部采集的各种数据信息(包括六维力传感器、柔性力传感器阵列、三个轴向加速度及角加速度等信息)进行实时显示、实时保存、历史数据波形回放显示、采样频率参数设置、实时 ZMP 轨迹、COP 位置计算及显示、传感器信息电子表单自动生成等功能。



图5 上位机程序功能及操作界面

3 足部感知系统实机实验

为验证足部感知系统在模拟凹凸不平的路面状况下的各项性能(信息获取、处理与融合、通信),将集成化足部感知系统 IPF-I 集成到北理工 BHR-2 机器人平台进行了系统联调和实机行走试验(如图6所示)。为模拟凹凸不平的路面在实验室地面上放置一根截面为圆形(直径6mm)的红色线缆,行走过程中机器人右足踏在线缆上以模拟凹凸不平的路面状态。

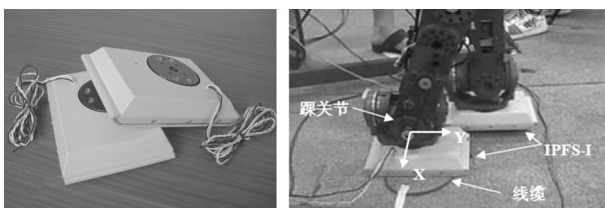


图6 平板式集成化足部感知系统(a)与实验现场(b)

实验结果如图7~图10所示,各项数据分析表明,足部感知系统可以实时获取足部及地面接触信息,并能够实时将处理后的信息(ZMP 轨迹、姿态、ECA 等)发送到机器人中央控制系统,均较好满足预定的各项指标要求。

图8为单足支撑 ZMP 轨迹变化情况,依据 ZMP 仿人机器人行走稳定条件,机器人处于稳定态。

图9为右足踏在电缆线时,FFSA 传感阵列感知的信息并获取有效支撑区域(获取方法见^[18])(图

中轮廓 Contour of ECA)。仿人机器人稳定控制与评估的准确性在于稳定性判据应该是以实际的有效支撑区域边界为临界约束条件。

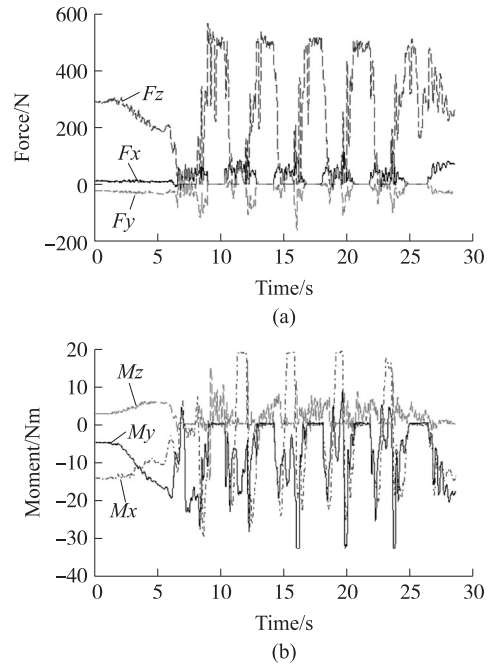


图7 右足地面反作用力的变化情况

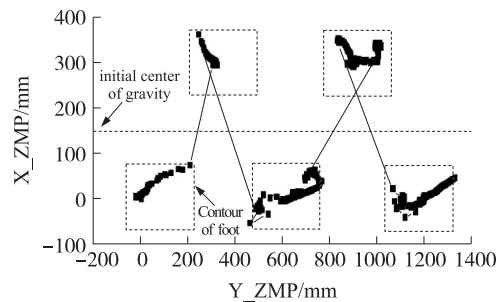


图8 机器人(单足支撑期内)ZMP 轨迹变化曲线

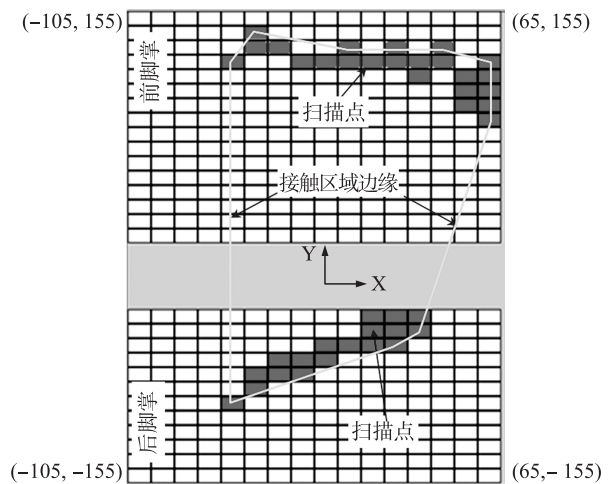


图9 FFSA 获取的有效支撑区域

图10所示为 BHR-2 机器人行走过程中,利用姿态传感器测得的右足摆动期加速度(a_x, a_y, a_z)和角速度(w_x, w_y, w_z)变化情况。图中摆动期间足部

在前向(X 轴向)和竖直向(Z 轴向)的加速度增大,侧向(Y 轴向)加速度趋于平稳,而沿侧向轴(Y 轴)的角速度变化较大,说明足部前向摆动过程中伴随着绕 Y 轴的转动。

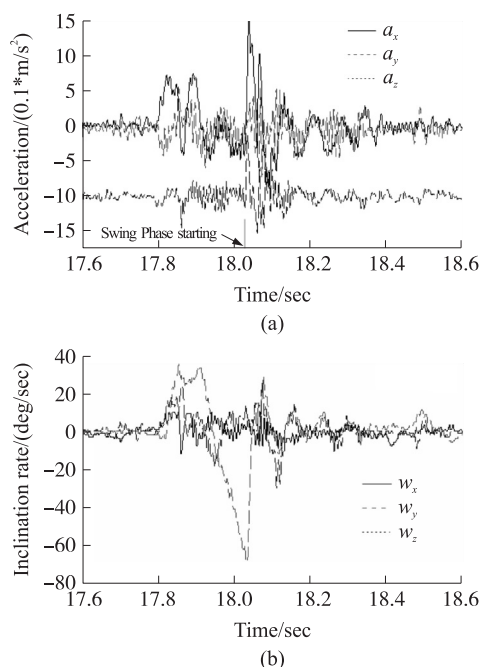


图 10 仿人机器人右足摆动期加速度/角速度变化

4 结论与展望

仿人机器人足部感知系统是一个多传感器高度集成的信息获取与处理系统,不仅具有地面反力、足部姿态、ZMP、足底有效接触的测量功能,还需要减震功能以减小或消除机器人行走过程中来自地面的冲击力。因此,在结构和软/硬件方面均面临着静态测量精度和动态实时性,以及与机器人中央控制系统的通信方式及传感器接口标准化的问题。此外,人类在行走过程中双脚结构可以实现弯曲使行走比较自然,同时使行走更加协调保持身体的稳定性,对此,为了使仿人机器人在行走过程中更加稳定,提高行走的速度,基于现有足部感知系统的关节型足部结构设计与实验研究将作为本文后续的研究重点,使仿人机器人的足部更加的接近人类的足部,实现在行走过程中足部的弯曲,从而可以减轻膝盖及以上关节的负重,其行走更接近于人类的行走姿态,行走更加平稳、更加自然,行走速度也将会有很大的提高空间。

致谢

本文得到了中国科学院合肥智能机械研究所运动与健康信息技术研究中心和北京理工大学智能机器人研究所的大力支持,在此表示诚挚谢意!

参考文献:

- [1] Ambarish Goswami. Postural Stability of Biped Robots and the Foot-Rotation Indicator (FRI) Point [J]. The International Journal of Robotics Research, 1999, 18(6): 523-533.
- [2] Nandha Handharu, Jungwon Yoon, Gabsoon Kim. Gait Pattern Generation with Knee Stretch Motion for Biped Robot using Toe and Heel Joints [C]//8th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Daejeon, Korea, 2008: 265-260.
- [3] Yong-Duk Kim, Bum-Joo Lee, Jeong-Ki Yoo. Landing Force Controller for a Humanoid Robot; Time-Domain Passivity Approach [C]//IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Taipei, Taiwan, 2006: 4237-4242.
- [4] 帅梅, 付成龙. 不平整地面仿人机器人行走控制策略[J]. 机械工程学报, 2006, 42(8): 1-6.
- [5] 曹恒, 孟宪伟, 凌正阳. 两足外骨骼机器人足底压力测量系统[J]. 传感技术学报, 2010, 23(3): 326-330.
- [6] Tomohito Takubo, Yoshinori Imada, Kenichi Ohara, et al. Rough Terrain Walking for Bipedal Robot by Using ZMP Criteria Map [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, Kobe, Japan, 2009: 788-793.
- [7] Christine Chevallereau, Dalila Djoudi, Jessy W Grizzle. Stable Bipedal Walking with Foot Rotation Through Direct Regulation of the Zero Moment Point [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2008, 24(2): 390-401.
- [8] Koichi Nishiwaki, Yoshifumi Murakami, Satoshi Kagami. A Six-Axis Force Sensor with Parallel Support Mechanism to Measure the Ground Reaction Force of Humanoid Robot [C]//Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Washington, DC, 2002: 2277-2282.
- [9] Makoto Shimoj, Takuma Araki, Aigou Ming, et al. A ZMP Sensor for a Biped Robot [C]//Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Orlando, Florida, 2006: 1200-1205.
- [10] Gab-Soon Kim, Hyi-Jun Shin, Jungwon Yoon. Development of 6-Axis Force/Moment Sensor for Humanoid Robot's Foot [C]//IEEE Sensors Conference 2007: 217-220.
- [11] Jong Hyeon Park, Eung Seo Kim. Foot and Body Control of Biped Robots to Walk on Irregularly Protruded Uneven Surfaces [C]//IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B, 2009: 289-297.
- [12] Klaus Löffler, Michael Gienger, Friedrich Pfeiffer. Sensors and Control Concept of a Biped Robot [C]//IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(5): 972-980.
- [13] A Goswami. Foot-Rotation Indicator (FRI) Point: A New Gait Planning Tool to Evaluate Postural Stability of Biped Robots [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Detroit. pp. 1999, 47-52.
- [14] Goswami Dip, Vadakkepat Pahlad. Rotational Stability Index (RSI) Point: Postural Stability in Planar Bipedes [J]. Robotica, 2010, FirstView: 1-11.
- [15] Makoto Shimojo, Takuma Araki, Aigou Ming. A ZMP Sensor for a Biped Robot [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, Orlando, Florida, 2006: 1200-1205.

- [16] 吴宝元,申飞,吴仲城. 应变式多维力传感器结构优化设计方法研究[J]. 传感技术学报,2010,23(10):1414-1416.
- [17] 钱昌忠,吴仲城,申飞,等. 姿态传感器在仿人机器人足部感知系统中的应用[J]. 仪表技术,2010(9):68-70.

- [18] Baoyuan Wu, Fei Shen, Zhongcheng Wu, et al. Acquisition of Effective Contact Area Based on Force-array Sensors for Humanoid Robot Foot [C]//3rd IEEE Int. Conf. on Signal Processing Systems. 2011. Tantai, China. Vol. 2. pp. 527-531.

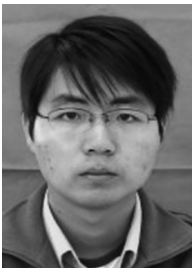


申飞(1971-),女,工学硕士,高级工程师,先后并完成参加国家“八五”、“九五”重点科技攻关项目、中科院重点项目、863项目、国家自然科学基金及传感技术国家重点实验室基金、安徽省自然科学基金项目十余项,申请和授权国家专利二十余项,发表论文四十余篇. 主要研究方向为仿生感知、网络化

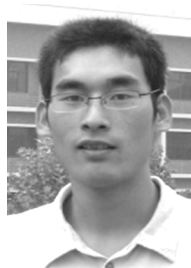
传感器、人机交互,shenfei@iim.ac.cn;



吴宝元(1976-),男,博士研究生,助理研究员,主要研究方向为机器人传感测试技术,多维力测试技术、人机交互等. 授权与申请发明专利6项,软件著作权5项,发表SCI/EI收录论文十余篇,bywu@iim.ac.cn;



罗健飞(1986-),男,中国科学技术大学在读博士研究生,研究方向为网络化传感测量系统、嵌入式系统开发和研究、笔式交互等,jfluo@mail.ustc.edu.cn;



任阳(1987-),男,中国科学技术大学在读硕士研究生,研究方向为嵌入式系统、多维力测试技术与机器人感知, yangren@mail.ustc.edu.cn;



吴仲城(1968-),博士后,研究员,中国仪器仪表学会青年工作委员会委员与仪器仪表学会传感器分会理事,负责并完成中科院重点项目、863、国家自然科学基金及传感技术国家重点实验室基金、安徽省自然科学基金项目多项. 主要研究方向为仿生感知、人机交互、生物特征信息获取、力学量信息获取、数字签名与智能网络传感技术,zewu@iim.ac.cn。

数字签名与智能网络传感技术,zewu@iim.ac.cn。