

文章编号: 1002-0446(2003)02-0188-05

面向应用需求的力/力矩传感器技术发展动向*

戈 瑜¹ 吴仲城^{1 2} 葛运建¹

(1. 中国科学院合肥智能机械研究所 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学自动化系 合肥 230031)

摘 要: 本文论述了面向应用需求的力/力矩传感器发展现状和趋势,从机器人学、特种机器人及机器人化机器器几个方面讨论了力传感器研究的现状和应用需求,并指出力传感技术发展的总趋势为利用新材料、新工艺实现微型化、集成化,利用新原理、新方法实现更多种类的信息获取,再辅以先进的信息处理技术提高传感器的各项技术指标,以适应更广泛的应用需求。

关键词: 力/力矩传感器;机器人学;特种机器人;智能机器

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

STATE OF ARTS AND DEVELOPMENT TRENDS TOWARD APPLICATION-ORIENTED FORCE/TORQUE SENSORS

GE Yu WU Zong-cheng GE Yun-jian

(Automation Department, China University of Science and Technology, Hefei 230031)

Abstract: The state of the arts and development trends toward force/torque sensors are introduced in view of robotics, service robot and intelligent machines. And it was pointed out that the main trends toward force sensor technology is minimized and integrated by new materials and techniques. Nowadays, many new theories and methods, such as artificial intelligence and data fusion, are widely used in sensor signal processing for more kinds of information acquisition and widespread application demands.

Keywords: force/torque sensor, robotics, service robot, intelligent machine

1 引言(Introduction)

先进机器人技术被宋健同志称为“当代最高意义上的自动化”,集中反映在“感知(传感器,信息融合)、决策(智能控制)、执行(机构及驱动)和交互(人-机,多机,网络化)”几大技术特征上。相对而言,在这几大要素中,传感器与机构基本属于硬件范畴,它们的技术进步必将对整个机器人技术产生关键性的影响。

德国机器人学与系统动力学研究所(DLR)的 G. Hirzinger 在去年的 IARP 研讨会上有一段话,给人以深刻印象:“人们希望 AI 能够推动机器人技术快速发展,使机器人更具智能。但他们忽略了一些事情,例如尽管逻辑决策的作用很大,但传感器的感知与反馈是更高级智能行为的真正基础。事实上,工业机器人很大程度上仍像几年前一样笨。”其言外之意是机器人传感器的应用还很不够,面向应用需求

的机器人传感器研究与开发将大有可为。

在机器人学中讨论的传感器已是种类繁多,如果将机器人技术辐射至智能机器(机器人化机器),所涉及的传感器,种类则将涉及整个传感器技术领域的各种传感器。面对发展的新形势,本文就多维力/力矩传感器在机器人学、特种机器人以及智能机器几个方面的应用需求和研究动向进行讨论。

2 机器人学发展对力传感器的需求

2.1 柔顺运动控制用的“柔性力/力矩传感器”

这是近来德国 DLR 提出的一种新型传感器^[1~3],一些研究表明这种传感器有可能从传感器反馈方面去实现力/位置混合控制的柔顺运动,并能以示教再现的方式实现过去难以实现的所谓“直觉式”柔顺运动过程,如完成公差为 0.005mm 的销孔配合。如图 1 所示。

* 基金项目:本项目得到国家十五“863”计划项目(No.:2001AA423180 2001AA423300)、国家自然科学基金项目(No.:60175027)和安徽省自然科学基金项目(No. 01042303.)支持。 收稿日期:2002-09-03

基本结构：

六维力传感器与空间鼠标中的光电式六自由度空间位置测量系统相连接。光电式空间位置测量系统由中心部光源与外圆周三横三竖共六个 PSD 器件以弹性件相连。

功能与使用：

六维力传感器可以检出工作时的受力信息，而具有一定柔性光电位置系统则既可完成 RCC 的吸收由位置偏差所产生的多余力增益，并可通过 PSD 实现三个平动与三个转动的位置测量，力环与位置环的信息则可用于控制。

在进行柔顺运动的示教时，还可在作业人手部装一手部空间位置感觉装置（如 VR 中所用的跟踪头、手运动的装置），通过采集示教过程中的多种力、几何信息和处理，可完成柔顺运动再现过程的编程。

在相应的机器人控制器的插补周期达到 5ms 以下，并有控过程的快速简化算法，工业机器人将能进行柔顺运动控制，完成更高级的作业。

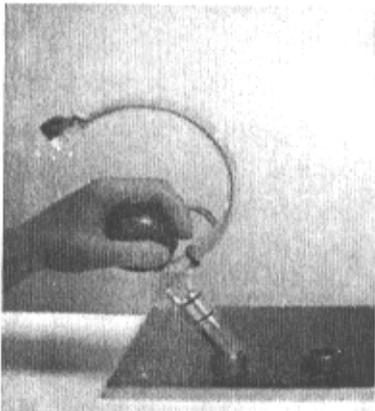


图 1 DLR 柔顺运动示教装置

Fig. 1 DLR Rlexible motion demo device

2.2 多指灵巧手或传感化的末端执行器用的“小型多维指力/力矩传感器”^[4~6]

一般而言，多指灵巧手的研究更多偏重于从人类手部的生理结构、感觉与功能间的联系去设计构制仿人型的机械手。而传感化的末端执行器，则更注重实际作业任务的需要，配置多种传感器，使之作业功能增强。可以想象，随着技术的进步，这二者最终将会融为一体，成为一种功能强大，操作灵巧的先进自动化工具。

服务于上述需求的力/力矩传感器，研究与开发相对较为成熟。如 Assurance Tech. 的 NANO 型的小六维力传感器，直径为 17mm，并有较高的过载能力。

国内在此方面的研究成绩显著，如合肥智能所、河北工业大学等单位均有较成熟的技术和开发能力。对于小型化的多维力/力矩传感器，在新结构、新材料、新工艺等方面还有许多可拓展的新内容。此外，由于这种应用场合，传感器数量多，如 DLR 的新型手爪配置多达上百个传感器，图 2 所示，所以从机械结构和传感信息处理方面都会对传感器提出许多特别的要求，快速的多传感器信息融合技术也将会有新内容。

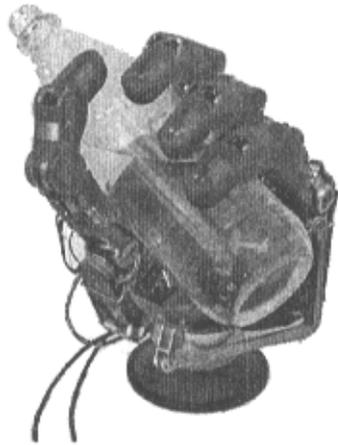


图 2 DLR 多指灵巧手握一个瓶子

Fig. 2 DLR hand holding a bottle

2.3 机器人动力学控制用的新型传感器

多维加速度传感器也可看成是一种测量多分量惯性力信息的另一形式的多维力/力矩传感器。利用多维力传感器的结构与工作原理，有可能实现一体化的多维加速度传感器（乃至包括三个线加速度和三个角加速度的六维加速度传感器），并可望从根本上去消除维间耦合。

多维加速度信息可用于机器人运动中的惯性力补偿、重力补偿甚至直接由加速度反馈控制。如 JR3 公司的 12 自由度传感器（六个力分量和六个加速度分量）已经问世。这类传感器的问题还是如何兼顾分辨力与频带宽度，以满足实际需要。而在标定、解耦、阻尼等方面较通常的多维力/力矩传感器有更复杂的技术内容。此外，多维加速度传感器在运动载体（如车辆、船体、电梯等乃至运动的人体）的运动过程分析、运动参数值测量等方面具有广泛的应用价值。

2.4 VR 或临场感技术中用的一种重要 I/O 工具

机器人临场感技术受到各发达国家的高度重视，美国的国家航空航天局 NASA、美国先进防卫研究计划署 DARPA、德国宇航研究院 DLR、英国尖端

机器人研究中心 ARRC 及日本等国都专门投资开展这方面的研究. 鉴于交互式机器人系统是当今发展的主流, 为了增强机器人与人的交互深度、机器人作业的准确与灵活性、及机器人在非确定性环境下的适应能力, 研究作为一种主要的感知控制方式——基于力触觉反馈的机器人临场感技术, 具有十分重要的现实意义和广泛的应用前景.

多维力/力矩传感器在力觉临场感或双向力反馈中的作用是众所周知的. 然而, 在一些要求更多的 VR 系统中, 如德国 DLR 的用于空间机器人实验基于传感器的面向任务远程编程系统 (MARCO) 中, 引入了双手 VR 接口的概念. 多维力/力矩传感器在其中扮演重要角色, 除通常所需的各项技术指标外, 还须特别注意多维力/力矩传感器在机电方面与所在系统的集成性、安全性.

临场感技术中的两个交互, 包括机器人与非确定性环境的交互和机器人与人的交互. 机器人与人的交互的意义在于, 可由人实现机器人在非确定环境中难以做到的规划和决策, 而机器人则可在人不能到达的环境中, 如核环境、空间、炸药、海底、制药等进行灵巧作业. 机器人与非确定环境的交互, 是机器人对环境感知的问题. 由传感器采集环境信息, 再将环境信息传输给操作者, 达到有效反馈和精确遥控的目的. 没有机器人对环境的有效感知, 即使有了人机交互界面也不可能发挥人在交互系统中的作用, 不能做出正确的决策, 也就达不到遥控的目的.

在临场感系统中, 需要使机器理解人类的自然行为, 并且将远距离环境转换成人类自然能力所能感知的形式. 实现这些功能的装置被称为人机交互接口, 它们包括视觉、声音、接触、嗅觉和味觉等接口通道. 视觉通道将远距离环境的图形、图像信息转换成三维立体视觉信息, 并显示给操作者. 声音通道再现远距离环境的声音, 并通过语音识别使计算机能够理解操作者的口头命令. 人们对视觉和声音进行了大量研究, 其技术已趋于成熟. 嗅觉和味觉通道方面的研究目前刚刚提出设想, 离实际应用还相差很远. 而面向作业型的交互则需要通过力/力矩传感器实现对力觉临场感的获取.

2.5 微机器人与微驱动系统的需求

随着微机器人、微驱动系统研究和应用的进展, 对微型多维力/力矩传感器的需求也必然增加. 由于传感器的本身尺寸很小, 因而在结构、敏感元件以及测试标定等方面均出现了许多新问题. 利用半导体平面工艺和微机械加工技术制作六维力传感器, 在

几年前已有一些专利(日本)报导. 这里介绍的是在海外的中国学者 Welin Jin 所做的一些工作^[7~8]. W. L. Jin 在新加坡南洋理工大学, 利用美国加州伯克利大学的工艺条件先后完成了两种小型的六维力传感器研制. 在 1998 年发表了两种研究的结果, 一种是将以硅微机械加工制作的四只包含多个硅应变计力敏桥路, 粘贴在一小型的以普通工艺加工的金属弹性结构上, 经标定后得出六力分量加载矩阵与应变桥路输出矩阵之间的关系, 得到一 $5\text{mm} \times 5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 的高灵敏度、高刚度的小六维力传感器. 另一种新型的微型硅六维力传感器则全部采用半导体微机械加工工艺完成, 其体积较前一种更小: $4.5\text{mm} \times 4.5\text{mm} \times 1.2\text{mm}$. 在硅弹性结构的敏感部位, 布置了八组桥路单元, 与六个力分量负载矩阵相对应, 可有八组桥路的输出矩阵, 通过矩阵运算, 可从传感器受力时的输出得到各力分量的测量值. 特别有新意的是, 在传感器的特定位置上, 通过工艺制作了金属铝条, 在标定时, 通过改变磁场方向, 在传感器的铝条上产生不同方向的洛仑兹力, 作为对微小型传感器产生加载力矩阵的方式.

在利用平面工艺制作微小型多维力传感器时, 会面临如何使各力分量的检测灵敏度达到均衡的问题. 所以, 在真正实际应用时, 对传感器的结构设计 with 工艺实现还会有许多新课题.

3 特种服务机器人(如水下、空间机器人)对力传感器的需求

3.1 水下机器人对力传感器的需求

海洋将是 21 世纪人类最重要的开拓领域, 面对数字化海洋的要求, 以及我国对海洋国土的探测和开发的需要, 必须解决深海探测的手段. 目前国内外的主要手段是配备有遥控机械手的 ROV (Remotely Operated Vehicles), 如英美等国的 Tritech, Slingsby, Halliburton 等公司的产品. 这些 ROV 以观察型居多, 并具备一定的作业能力, 但未见有配备对实现机械手智能控制和临场感遥作所必须的多维力传感器报导. 我国 863-512 智能机器人主题研制开发的多种水下机器人(AUV), 如 RECON-IV、YC2 及 6000 米无缆等, 仍属于观察型. ROV 的发展趋势必然是向兼备观察与实现智能控制和具有临场感遥作能力的 AUV (Autonomous Underwater Vehicles).

在国外, 作业型水下机器人也处在研发阶段. 如英国 1999 年所报导的 D. M. Lane 等研制的 A-MADEUS 水下作业机器人灵巧手^[9], 在其类似一种

柔性连续形机械手的三爪末端执行器中,由每只爪的波纹管式外套内的压力变化而产生所需的运动。六只应变片分布在爪中受力杆件的不同方向及位置上,形成一个三维力传感器。再辅以 PVDF 滑觉传感器后,可通过这些传感器的信息反馈,以决定在作业过程中波纹管中的压力的控制,最终实现手爪运动及夹持力的控制。其特点是传感器与手爪结构融为一体,但其测量多分量力信息的能力并不理想。

对于在高静水压和具有腐蚀性的海水深处作业,必然对所需的力/力矩传感器提出许多苛刻的要求,这对我们从事机器人传感技术研究的人将是极富挑战性课题。由于水下环境较陆、空更为复杂和恶劣,水下机器人和陆、空机器人相比也有不同的特点,因此用于陆、空机器人的力传感器要用于水下,构筑水下机器人的力感知系统,从传感器的结构、材料、信号获取、信息融合和传输方法等都有大量的从理论到实验的工作要做,距离能拿出可实用的样机还有相当的距离,这已制约着我国作业型水下机器人应用的进一步提高,所以开始并加快我国水下机器人用的力感知系统的研究工作已迫在眉睫。

3.2 空间机器人对力传感器的需求

由于空间技术的战略性地位和潜在的经济利益,世界上主要发达国家以及印度、巴西、中国在内的一些发展中国家在空间实验室和载人航天等方面,都制订了发展航天科技的“中长期战略”,其中空间作业型机器人力感知一直是各国研究的重点内容之一,其主要是向“小型和高功能化、轻量化、自动自律化、网络化、系统化等”战略性尖端技术方向发展。

美国先进防卫研究计划署(DARPA)、美国航空航天局(NASA)、国家科学基金会(NSF)、能源部(DOE)、国防部(DOD)等分别制订了相应的研究计划,特别是 NASA JSC(Jonson Space Center)等美国空间机器人和遥操作技术专门研究单位针对载人航天飞行中的机器人系统进行应用研究、工程开发和系统集成,遥操作和遥再现是其中的主要研究内容,这些方面的实现都是以力感知为其主要特征,因此满足空间应用的多功能感知器一直是其研究的关键技术之一。俄罗斯在科学院(RAS)、科技部(MIN-NAUKA)及基础研究基金(RFBR)等支持下,并与法国合作专门针对操作机器人与装配立项,其关键的研究内容是进行满足空间应用要求的力与力矩传感器的开发并利用其进行力控制,其参与 EUREKA 项目与西班牙合作开发具有力传感器融合能力的智能机器工具。日本在空间局(NASDA)支持下目前正

在开展 ETS-VII 计划,研究 RVD 与空间机器人技术,其中 MITI 实验内容主要是由高级机器人手完成灵巧操作任务,该手可以从地面进行遥控,也可以自主控制,其中具有多功能的力感知系统是其核心技术。欧洲以德国 DLR 为代表,在其第一代空间遥控机器人系统 ROTEX 上就集成了多传感器手爪,其能够提供冗余的力矩感知信息,并具有局部传感反馈能力,目前正在开发一种基于机械电子学方法设计的具有关节手的新一代轻型机器人,是典型多传感器与多驱动器的结构,不仅具有很高的电子和信号处理集成度,而且采用总线系统实现数据交换。针对舱外作业型机器人,目前还没有实用化的力感知系统,主要原因在于传统的应变式力传感器无法适用空间的高真空、高温差、高辐射环境。

为提高空间站的工作效率,能够由地面通过监控、遥控的,具有一定自治能力的空间机器人是必不可少的。在已取得巨大成功的 ROTEX 中,一个六维腕力传感器和多达十二个的视觉、触觉、接近觉等传感器与机械臂形成机电一体化的系统。而今,DLR 更新一代的 ETS 自由飞行式空间机器人以及国际空间站上的 EUTFF 机器人上分别设计了高度传感化的四指多关节灵巧手和基本末端执行器(BEE)。前者有多达 112 个传感器,而 BEE 则被安装在一个独立的力/力矩传感器上,传感器的作用是后备及冗余的,对保证作业精度和重复能力起着约束作用。由于在这些场合,应用了 VR 技术,所以传感器必须在机电接口、信息管理等与系统有高度的集成性,或者说在一定程度上具有智能网络化传感器的特征。因此,我们必须看到我国在这方面所存在的不少的差距和努力的方向。

4 智能机器(机器人化机器)及机器人多维力传感器技术辐射方面的需求

863-512 在对传统工程机械的机器人化方面做出了显著成绩,但在传感器的应用方面还大有潜力。增加实用可靠多维力传感器或多维加速度传感器,对完善作业和安全生产方面的品质将明显提高,无疑会使现有产品升级换代。

就传动和控制而言,工程机械已走过机械和液压两代。到 80 年代中后期,随着电子技术、计算机控制技术、液压控制技术及传感器技术的发展,工程机械进入了第三代时期,即机器人化时代。日本、美国和欧洲一些国家首先认识到这个方向的重要性,在 80 年代就开展机电一体化、机器人化高技术的研究

与开发,其目标就是利用机电一体化、机器人化高技术对传统工程机械产品进行更新换代改造,提高其智能化程度,美国的卡特彼勒公司、德国的利勃海尔公司、日本的小松、东芝、神钢、日立等公司一直致力于这方面的研究,例如 AGV 物流自动化成套系统、基于 GPS 的定位作业、工作面的激光导引等,其产品的发展已经从工程机械机电一体化逐步发展到工程机械机器人化的阶段,工程机械的机器人化无疑是代表其发展最重要的方向.目前国内在这一领域还相对落后,若干中外合资企业引进的产品是国外 80 年代的技术,在国际市场上缺乏竞争力.在我国即将加入 WTO 之际,这类企业面临的国际竞争十分艰巨,迫切需要进行产品的更新换代.要实现传统工程机械机器人化升级,有赖于传感信息的提供,目前解决这一问题的主要方法和途径是将智能机器人传感相关技术移植到工程机械中,而机器人传感器的实用化研究是其中的关键和基础.

基于多维力、加速度传感器的新型测量装置,是多维力传感器技术的有十分广泛应用前景的技术辐射领域之一.在生物力学、医学诊断、体育科研与训练以及智能化交通管理系统等方面,将大有用武之地.在这些应用中,传感器信息将会与一些专门化数据库、专家系统等配置综合处理后而获得最有效的测量、分析结果.对于一些大量程的应用场合,多维力传感器或装置的大量程标定技术将会有新的研究内容.

5 结论(Conclusion)

可以认为,传感技术发展的总趋势无非被概括为利用新材料、新工艺实现微型化、集成化,利用新原理、新方法实现更多种类的信息获取,再辅以先进的信息处理技术提高传感器的各项技术指标,以适应更广泛的应用需求.例如,面对机器人技术向微型化和网络化发展,基于 MEMS 技术的传感器及系统成为热点;而类似现场总线式的网络化智能型传感器也已出现在一些智能机器中,如 CAN 总线;在美国 RIM(机器人与智能机器)技术被认为将从根本上改变人类使用机器的方式,新的机器人系统将实现许多目前看来最难以完成的任务,在这些系统中传感器则被要求具有自校准、利用最少知识学习的融合规则、全自动的设备级集成、即插即用、在分布式机器人网络中的自动同化等等智能型特征.

参考文献 (References)

- [1] F Lange, G Hirzinger. A universal sensor control architecture considering robot dynamics. June 2001. <http://www.robotic.dlr.de/Friedrich.Lange/>.
- [2] R Maaß, V Zahn, M Dapper, R Eckmiller. Hard contact surface tracking for industrial manipulators with (SR) position based force control. In Proc IEEE Int Conference on Robotics and Automation, pages 1481—1486, Detroit, Michigan, May 1999
- [3] F Lange, G Hirzinger. Learning accurate path control of industrial robots with joint elasticity. In Proc IEEE Int Conference on Robotics and Automation, pages 2084—2089, Detroit, Michigan, May 1999
- [4] J-W Lee, S Lee. A new data fusion method and its application to state estimation of nonlinear dynamic systems. In Proc IEEE Int Conference on Robotics and Automation, pages 3525—3530, San Francisco, California, April 2000
- [5] C Natale, R Koeppel, G Hirzinger. An automatic procedure for force controller Design. IEEE/ASME International Conf on Advanced Intelligent Mechanics, AIM99, Sep 19—22, Atlanta, GA, USA;
- [6] R Koeppel, G Hirzinger. Sensorimotor compliant motion from geometric perception. IEEE/REJ International Conf on Intelligent Robots and Systems, IROS, 1999
- [7] W L Jin, C D Mote Jr. A six-component silicon micro force sensor. Sensors and Actuators A65(1998), 109—115
- [8] W L Jin, C D Mote, Jr. Development and calibration of a sub-millimeter three-component force sensor. Sensors and Actuators A65(1998)89—94
- [9] D M Lane, J B C Davies, G Robinson, *etc.* The AMADEUS Dextrous Subsea Hand; Design, Modeling, and Sensor Processing. IEEE J Of Oceanic Eng, 24(1): 96—111
- [10] 蒋新松. 未来机器人技术方向的探讨. 迈向新世纪的中国机器人. 辽宁科学技术出版社, 2001, 199—266
- [11] 戈瑜. 我国机器人传感器技术的研究和发展. 迈向新世纪的中国机器人. 辽宁科学技术出版社 2001. 2: 33—36
- [12] 蒋新松主编. 机器人学导论. 辽宁科学技术出版社, 1994 年 4 月第一版
- [13] 戈瑜. 面向应用的机器人力/力矩传感器技术发展动向. 新世纪机器人感知系统战略研讨会, 合肥, 2001 年 5 月
- [14] 孙增祈. 空间机器人对力感知系统的应用需求. 新世纪机器人感知系统战略研讨会, 合肥, 2001 年 5 月
- [15] 国际先进机器人技术计划(IAPP)第十八次联合协调讨论会报告译文集. 国家高技术智能机器人信息网. 中国科学院沈阳自动化研究所, 2000. 8
- [16] 吴仲城. 多维力传感器设计及其信号处理方法研究. 中国科学院博士学位论文, 2001. 7

作者简介:

- 戈瑜 (1941-), 男, 研究员, 研究领域: 机器人感知, 信息获取科学与技术.
- 吴仲城 (1968-), 男, 博士后, 研究领域: 机器人感知, 信息融合、网络传感技术、人机交互.
- 葛运建 (1947-), 男, 研究员, 研究领域: 机器人感知, 机器人控制, 信息获取技术.