

柔性测量方法及其发展趋势*

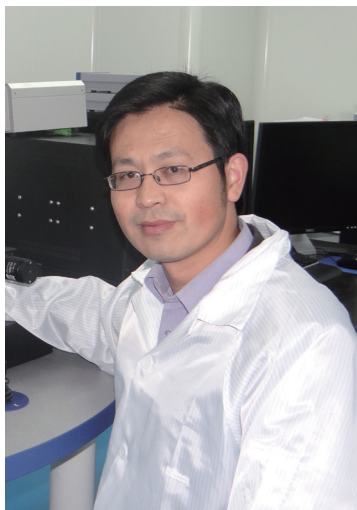
杨树明, 张国锋

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710054)

[摘要] 柔性测量可以结合多种测量方法的优点, 形成优势互补以满足现代测量领域精确高效的测量需求, 柔性测量系统具有高度灵活性和适应性的特点。阐述了目前三维测量技术的发展现状, 基于多传感器集成测量方法的分析, 提出了柔性测量的概念和关键技术, 然后根据实际应用对目前典型的柔性测量系统进行归纳和分类, 最后针对柔性测量系统中存在的问题对其发展趋势进行了预测。

关键词: 柔性测量; 多传感器集成; 数据融合

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.08.016



杨树明

2009年在英国哈德斯菲尔德大学仪器科学与纳米技术专业获得博士学位。西安交通大学机械工程学院教授, 博士生导师。研究方向为微纳制造及测量、光学测量技术及仪器等。发表学术论文80多篇, 申请和授权发明专利20多项。现任中国计量测试学会理事、中国创新设计产业战略联盟专家工作委员会委员、陕西省机械工程学会理事、陕西省仪器仪表学会理事等; 担任国际期刊Journal of Manufacturing Systems副主编、西安交通大学学报责任编辑以及10余个国际知名期刊的审稿专家。

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51575440)。

柔性测量是指由于某种测量方法在实际测量过程中存在约束和限制, 所以需要结合其他一种或多种测量方法和技术, 实现灵活智能的实时测量。随着先进制造技术的不断发展, 测量参数和环境越来越复杂^[1], 为了满足高精度、高效率以及高适应性的测量需求, 从20世纪末开始, 国内外出现了多传感器结合的复合式测量理论及试验研究, 如1998年Motavalli等^[2]提出了视觉传感器和坐标测量机(CMM)集成的测量系统, 该系统中首先利用视觉传感器获取物体表面信息, 然后指导CMM进行测量, 在保证关键点测量精度的基础上极大地提高了测量效率。2010年Weckenmann等^[3]提出了一种用于微小物体表面信息检测的多传感器集成系统, 该系统由多种不同用途的传感器组合而成, 可以测量三维标准几何特征的形状和位置、表面形貌以及膜厚等。几何尺寸与形位测量已经从一维、二维拓展到了三维, 测量对象也从具有规则特征的物体拓展到了具有复杂曲面的物体, 并且被测物体尺寸小到纳米甚至原子量级, 大到几十米甚至几百米。总之, 先进

制造技术的快速发展正在促使测量技术中的新原理、新技术、新装置及新测量理念不断出现^[4-6], 旨在提高测量的完整性、准确性和高效性^[7], 柔性测量就是在这样的背景下出现的新技术。

本文首先通过分析目前测量技术的发展现状, 提出柔性测量技术的概念, 然后根据实际应用对典型的柔性测量系统进行分类介绍, 最后对柔性测量系统的发展趋势进行预测。

柔性测量技术的发展现状及关键技术

1 单一传感器三维测量技术存在的问题

(1) 接触式测量。

接触式测量又称为机械测量, 即利用探针连接杆或机械臂关节处的传感器直接接触被测物体的表面以获取其三维点坐标数据。接触式探针测量系统主要用于对点云密度要求不高的场合, 如圆柱、棱柱等规则特征物体逆向建模以及已知模型的质量检测。CMM是典型的接触式测量设备, 测量过程中首先将各种几何元素的测量转换为点集坐标位置的

测量,然后再由软件按一定的评定准则算出这些元素的尺寸、形状和相对位置,一般测量精度可达微米级^[8]。尽管CMM测量精度相对较高,但是也存在很多不足,如测量速度慢,测量前需要规划测量路径;不能测量软质材料及探头无法触及的表面;探头易磨损,需经常矫正补偿,而且对环境要求高。

(2) 非接触式测量。

相比于接触式的表面测量方法易于损伤被测工件表面以及测量效率低的缺点,非接触式测量方法,如光学测量法、工业计算机断层成像技术(CT)以及扫描探针显微镜等,在测量领域中应用越来越广泛,正朝着速度更快、分辨率更高、测量范围更大的方向发展^[9-10]。

光学传感器在三维测量中的应用具有广阔的前景,根据所采用光源的类型不同可以分为点结构光传感器(1维测量)、线结构光传感器(2维测量)和面结构光传感器(3维测量)。实际上,面结构光测量法也只能测量物体表面上的点,无法实现真正意义上的3维测量,故称之为2.5维测量。一套光学三维测量系统能否精确完成测量工作主要取决于该系统的测量原理以及被测物的表面材质和几何特征。光学测量技术主要有三角测量法、偏折法^[11]、共聚焦显微技术^[12]、白光干涉方法^[13]、变焦显微测量法^[14]、图像测量法以及激光自动聚焦法、色差法及锥光测量法等。光学测量法能够快速获得被测物表面密集的点云数据,并且对于表面特征复杂以及材质柔软的物体具有独特优势。与接触式测量方法相比,具有精度不高、视角受限、无法测量光滑表面等缺点。因此,由光学传感器所测得的点云数据往往具有很多噪点,并且在某些区域存在数据冗余或缺失。

工业CT技术一次扫描就可以无损的获取被扫对象内外结构尺寸

信息,这一特点使得CT在装配检测以及复杂内部结构的产品非破坏测量上具有独特的优势,在一些工业测量领域,CT也像CMM测量设备一样被作为产品尺寸质量控制的标准检测手段。然而,CT测量过程也受很多因素的限制,比如被测工件的放置方式、机械轴的几何误差、射线能量、图像伪影以及数据处理等^[15]。

由于分辨率高(原子级分辨率)、实时原位成像,对样品无特殊要求(不受其导电性、干燥度、形状、硬度、纯度等限制),可在大气、常温环境甚至溶液中成像,同时具备纳米操纵及加工功能,系统及配套相对简单、廉价等优点,扫描探针显微镜(SPM)广泛应用于纳米科技、材料科学、物理、化学和生命科学等领域^[16]。SPM缺点包括扫描速度受限、定位和寻找特征结构较困难、对样品表面粗糙度要求较高以及探针的几何宽度和曲率半径等都会引起成像失真。

2 多传感器信息融合测量方法

随着先进制造技术的不断发展,测量对象越来越复杂,对测量系统的精度和效率、灵活性和自动化水平的要求也在不断地提高。对于具有复杂特征或极限尺寸的物体,利用单一传感器难以精确、快速、完整地获取其几何尺寸和形貌特征。因此现代测量系统需要结合多个测量传感器,形

成优势互补,以满足测量的需求。如Lu^[17]将视觉传感器、激光测头安装到CMM上,实现自适应测量路径规划,有效提高了自由曲面接触式数字化测量的效率和精度。

对于多传感器结合的柔性测量方法,由于一个完整的被测物在不同部位对测量精度的要求不同,首先要考虑各传感器的分辨力和测量范围,如图1所示。另一方面,由于各传感器都有自己独特的测量优势,如用光学传感器获取复杂曲面点云数据、用接触式传感器测量规则特征以及关键点、用SPM实现纳米级测量、用工业CT获取物体内部结构数据等以实现合理的测量分工。

3 柔性测量关键技术

(1) 系统集成及全局标定技术。

目前大部分柔性测量系统由CMM、接触式测头、视觉传感器、光学非接触探头及外围电子设备构成。系统集成及全局标定技术主要包括3个方面:各传感器硬件集成到机器设备上完成数据采集;传感器自身的建模与标定技术;传感器之间坐标系的转换。牟鲁西^[18]针对触发式测头和关节臂激光扫描仪组成的多传感器测量系统提出了基于单元四元数表达和数学形态学优化的全局标定方法。Fan^[19]研究了由姿态角传感器、角编码器、激光测距仪及全

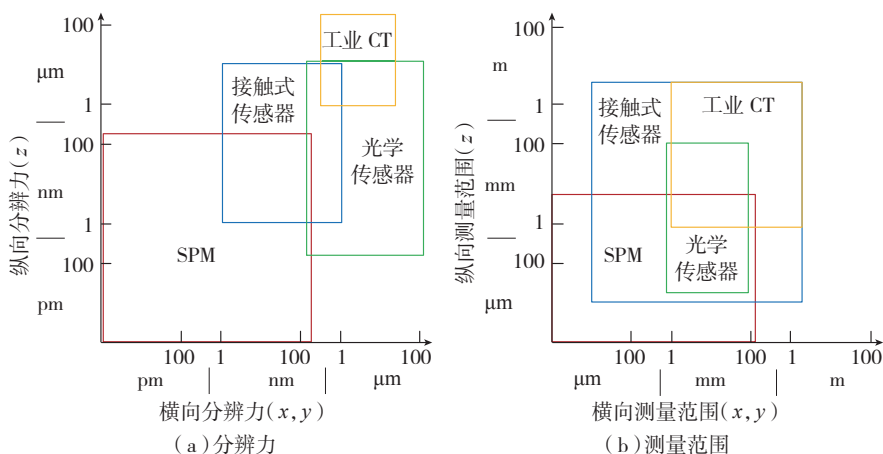


图1 典型测量仪器的分辨力和测量范围

Fig.1 Resolution and measurement range of typical instruments

站仪构成的柔性测量系统,并提出了全局标定方法并实现了大尺度空间隐藏区域坐标测量。

(2) 基于特征的智能化测量技术。

智能化测量的实质就是特征指导下的测量规划,即根据测量对象及测量参数选择最优传感器组合。由已知实体模型得到曲面和边界特征,通过编辑检测路径实现特征曲面和边界的自动检测^[20]。采用视觉测量获取孔洞、边界特征及工件的位置,利用这些简单特征进行工件定位^[21]。以宏观控制指导微测量,利用结构光视觉传感器进行快速测量并构建简单模型,然后基于该模型指导接触式测头进行“精测”^[22]。

(3) 多传感器测量数据融合技术。

对于多传感器集成柔性测量系统来说,可以将多个传感器测量数据对齐到同一坐标系下,但是由于采用不同类型传感器和测量方法,使得信息具有多样性和复杂性。因此,信息融合方法的基本要求是鲁棒性和并行处理能力。目前国内外研究的数据融合算法主要包括遗传算法结合模糊理论、遗传算法结合神经网络理论、模糊逻辑结合卡尔曼滤波、小波变换结合卡尔曼滤波、模糊理论结合最小二乘法等^[23]。

典型柔性测量系统

根据目前国内外的研究情况,柔性测量系统大致可以分为3类:视觉和接触式传感器集成系统、多视觉传感器集成系统^[24]以及微纳米柔性测量系统。

1 视觉和接触式传感器柔性测量系统

(1) CMM与结构光视觉传感器集成的柔性测量系统。

在众多传感器集成的柔性测量系统中,以视觉传感器与CMM接触式测头的互补性最强。其中视觉传

感器获取的物体三维点密集、测量速度快,但精度不高;CMM获取物体三维点稀疏、测量速度慢,但精度较高,因此二者的结合能够扬长避短。

立体视觉传感器的作用主要体现在辅助定位和边界信息指导,实现实际工件与其模型之间的精确对齐,并获取被测面的边界信息用以指导接触式测头进行自动化测量。黄强先等^[21]针对现有微纳米CMM测量逼近效率低的问题,设计了一种基于视觉引导的三维纳米测头,采用3个微型高倍摄像机对工作台做视觉引导。

结构光视觉传感器可以为后续接触式测量提供更加完整的信息,概括为以结构光测量方法得到的粗模型指导CMM进行精确测量。首先采用结构光视觉传感器对被测物体进行快速测量,从而建立被测物体的模型,然后以此模型指导CMM进行自适应测量。Li等^[22]开发了一种线激光扫描和CMM的集成系统,首先由激光扫描系统采集被测物数据,然后采用CMM接触式探头对没有扫描到的地方进行补充测量,并对精度要求较高的几何特征进行重复测量。

(2) 手持式探针与视觉传感器集成柔性测量系统。

由于CMM不能移动,而光学测量方法对大幅面或带有槽孔工件的测量具有限制。根据探针上空间位置相对固定的一组标志点的坐标信息建立探针坐标系,并确定探针触头在其坐标系中的坐标。定位时根据标志点的空间坐标计算世界坐标系和探针坐标系之间的转换关系,就可通过坐标转换得到探针触头在世界坐标系中的位置信息。李磊刚等^[25]基于工业近景摄影测量理论和立体视觉技术,研制了一种基于点阵式探针测量原理的便携式光学探针测量系统。

2 多视觉传感器柔性测量系统

对于大尺寸物体的数字化测量,尽管视觉传感器具有全场测量能力,但由于其测量幅面的限制,而且存在测量盲区,后期将得到的多个面形数据进行拼接处理以获得完整测量数据,这无疑使得测量过程繁琐、后期数据处理工作量增大。因此,可以采用多视觉传感器集成系统提高测量效率。多视觉传感器集成的柔性测量系统也可分为两类:多视角全方位互补型测量系统和辅助定位自动拼接测量系统。

(1) 多视角全方位互补型测量系统。

多视角互补型测量系统是指在被测物周围布置多个视觉传感器以实现全方位、无盲区地完整信息采集。如Turton等^[26]开发的多视角激光扫描传感器集成测量系统。系统由3个工业相机和4个线激光发射器组成,其中3个线激光发射器在同一水平面呈等角度环形分布,第4个线激光发射器位于中间,测量时各传感器协同工作,使得测量盲区大大减少,所以仅通过一次扫描便可获得完整的物体形貌数据,极大提高了测量效率。

(2) 辅助定位自动拼接测量系统。

针对现有的大尺寸物体形貌测量系统测量效率低、自动化程度不高的缺点,张德海^[27]提出一种工业数字近景三维摄影测量系统和结构光投影双目立体视觉系统相结合的多视觉传感器集成测量系统,采用近景摄影测量系统计算大型工件表面粘贴的编码点和非编码点坐标作为全局控制点,实现每幅点云数据的高精度自动拼接。钟凯等^[28]又将结构光测量系统与室内定位系统(GPS)相结合,提出了一种组合式大尺寸三维测量系统,该系统利用室内GPS追踪固定在结构光测量系统顶部的传感器,实时跟踪结构光测量系统在全局坐标系下的三维位姿,然后利用预

先标定的系统结构参数将结构光测量系统所测得的局部三维点云数据自动转换到全局坐标系。

3 微纳米柔性测量系统

随着微纳米技术的迅速发展,人们对微观世界探索不断深入,测量对象尺度越来越小。目前纳米级柔性测量系统主要分为两类:以激光干涉为代表的非光学测量方法和以 SPM 为代表的非光学测量方法。

(1) 基于激光干涉仪的柔性测量系统主要体现在与光纤传感技术的结合,由于光纤的可集成性、可远距离传输、抗干扰能力强,用作光传导部分能够实现干涉仪的小型化和集成化。另一方面,为突破激光干涉方法受半波长的限制,实现远程和绝对测量,Xie 等^[29]提出了一种高相干和低相干相结合的复合式光纤干涉测量系统。Yang 等^[30-31]提出通过研制芯片级光学元件,实现了用于纳米柔性在线测量的集成光学干涉系统。

(2) 基于 SPM 的纳米级测量系统,其缺点主要在于测量效率不高,需要集成辅助测量装置以提高该系统的柔性。Guo 等^[32]提出将原子力显微镜(AFM)与白光干涉仪相结合的复合式测量系统,通过白光干涉测量的辅助定位以提高 AFM 的测量效率。

柔性测量系统发展趋势

(1) 高度集成化。柔性测量系统的未来研究方向将会以运行在未知、动态环境下的多传感器集成测量系统为研究对象。硬件集成方面,微传感器技术的发展将会使得系统集成度大规模增加,并灵活应用到工业现场;数据融合方面,人工智能和神经网络将继续成为研究的热点。

(2) 高度智能化。随着工业技术的发展,要求测量仪器能够对所测物体进行高度智能化的分析,从而自动选择最优化的测量方法。根据测

量对象及测量参数选择最优的传感器组合,就选择的实时性可分为预先和实时选择法。前者预先对传感器做最优配置;后者根据环境变化进行实时配置以达到局部最优。

(3) 良好的环境适应性。恶劣环境对于光学元件的工作精度和准确性具有较大的影响,甚至导致有些光学仪器不能正常工作,这就要求测量系统能够适应不同的工况条件和环境。光纤传感器将取代一些大部头光学器件,在提高环境适应性的同时,使得测量系统更加小巧灵活。

结束语

本文系统介绍了物体三维信息获取过程中所用到的各种测量技术及其基本原理,通过分析发现,每一种测量技术和方法都有自己独特的优势和适用场合。对于具有复杂特征或极限尺寸的物体,利用单一测量方法难以精确、快速、完整地获取其几何尺寸和形貌特征。因此现代柔性测量系统需要结合多种测量方法的优点,形成优势互补,以满足现代测量领域对精确、高效和完整测量的需求。现代柔性测量系统不仅要求测量设备具有灵活性和适用性,由于涉及多传感器集成的复合式测量,因此研究多传感器信息融合技术以实现在线测量和实时控制。

参考文献

- [1] 殷国富,杨杰斌,赵雪峰,等.面向现代制造的先进测试技术及其发展趋势[J]. 中国测试, 2010,36(1):1-8.
- [2] YIN Guofu, YANG Jiebin, ZHAO Xuefeng, et al. An overview of advanced measurement technology and its development trend for modern manufacturing[J]. China Measurement & Test, 2010,36(1):1-8.
- [3] MOTAVALLI S, SUHARITDAMRONG V, ALRASHDAN A. Design model generation for reverse engineering using multi-sensors[J]. Iie Transactions, 1998,30(30):357-366.
- [4] WECKENMANN A, BERNSTEIN J. Optical multi-sensor metrology for extruded profiles[J]. Metrology & Measurement Systems,

2010,17(1):55-62.

[4] TASIC T, ACKO B. Integration of a laser interferometer and a CMM into a measurement system for measuring internal dimensions[J]. Measurement, 2011,44(2):426-433.

[5] LIU Z, LI X, LI F, et al. Fast and flexible movable vision measurement for the surface of a large-sized object[J]. Sensors, 2015,15(3):4643-4657.

[6] EITTL S. Introductory review on 'Flying Triangulation': a motion-robust optical 3D measurement principle[J]. Contemporary Physics, 2014,56(2):1-15.

[7] 崔希民, 马开锋, 黄桂平. 现代三维工业测量系统研究进展及发展趋势分析[J]. 华北水利水电大学学报: 自然科学版, 2014(3):56-61.

CUI Ximin, MA Kaifeng, HUANG Guiping. Research progress and development trend analysis of modern three-dimensional industrial measuring system[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power, 2014(3):56-61.

[8] HAMMAD MIAN S, ALAHMARI A. New developments in coordinate measuring machines for manufacturing industries[J]. International Journal of Metrology & Quality Engineering, 2014,1(2):85-95.

[9] 罗胜彬, 宋春华, 韦兴平, 等. 非接触测量技术发展研究综述[J]. 机床与液压, 2013(23):150-153.

LUO Shengbin, SONG Chunhua, WEI Xingping, et al. Review for the development and research of non-contact measurement technology[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2013(23):150-153.

[10] GAPINSKI B, WIECZOROWSKI M, MARCINIAK-PODSADNA L, et al. Comparison of different method of measurement geometry using CMM, optical scanner and computed tomography 3D[J]. Procedia Engineering, 2014,69(1):255-262.

[11] KNAUER M C, KAMINSKI J, HAUSLER G. Phase measuring deflectometry: a new approach to measure specular free-form surfaces[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2004,5457:366-376.

[12] JUSKAITIS R, WILSON T, NEIL M A, et al. Efficient real-time confocal microscopy with white light sources[J]. Nature, 1996,383(6603):804-806.

[13] 郭彤, 李峰, 倪连峰, 等. 基于白光干涉彩色图像的微结构表面形貌测量[J]. 光学学报, 2014(2):120-126.

- GUO Tong, LI Feng, NI Lianfeng, et al. Microstructure surface topography measurement based on color images of white light interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014(2):120-126.
- [14] ABDULLAH A B, SAPUAN S M, SAMAD Z, et al. Profile measurement based on focus variation method for geometrical defect evaluation: a case study of cold forged propeller blade[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2015,6(1):874691-874699.
- [15] KHORSANDI M, FEGHHI S A H. Development of image reconstruction for Gamma-ray CT of large-dimension industrial plants using Monte Carlo simulation[J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, 2015,356:176-185.
- [16] SALAPAKA S M, SALAPAKA M V. Scanning probe microscopy[J]. *IEEE Control Systems*, 2006,42(2/3):65-83.
- [17] LU K, WANG W. A multi-sensor approach for rapid and precise digitization of free-form surface in reverse engineering[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015,79(9):1-12.
- [18] 牟鲁西, 尹周平, 熊有伦. 一种多传感器测量系统全局标定方法[J]. *中国机械工程*, 2012,23(12):1428-1432.
- Mu Luxi, Yin Zhouping, Xiong Youlun. A global calibration method for multisensor metrology system[J]. *China Mechanical Engineering*, 2012, 23(12):1428-1432.
- [19] FAN Y, ZHAO B. Combined non-contact coordinate measurement system and calibration method[J]. *Optics & Laser Technology*, 2015,70(1):100-105.
- [20] PRIETO F, REDARCE T, LEPAGE R, et al. An automated inspection system[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2002,19(19):917-925.
- [21] 黄强先, 史科迪, 陈晨. 基于视觉引导的 3D 纳米测头[J]. *仪表技术与传感器*, 2015(11):11-14.
- HUANG Qiangxian, SHI Kedi, CHEN Chen. 3D nano-probe based on visual guiding[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2015(11):11-14.
- [22] LI F, LONGSTAFF A P, FLETCHER S, et al. Rapid and accurate reverse engineering of geometry based on a multi-sensor system[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014,74(1-4):369-382.
- [23] 黄漫国, 樊尚春, 郑德智, 等. 多传感器数据融合技术研究进展[J]. *传感器与微系统*, 2010,29(3):5-8.
- HUANG Manguo, FAN Shangchun, ZHENG Dezhi, et al. Research progress of multi-sensor data fusion technology[J]. *Transducer and Micro-system Technologies*, 2010,29(3):5-8.
- [24] 杨雪荣. CMM 与线结构光视觉传感器集成的逆向工程系统关键技术研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2013.
- YANG Xuerong. Research on key technologies of CMM and line structured light vision sensor integrated reverse engineering system[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2013.
- [25] 李磊刚, 梁晋, 唐正宗, 等. 用于工业三维点测量的接触式光学探针[J]. *光学精密工程*, 2014,22(6):1477-1485.
- LI Leigang, LIANG Jin, TANG Zhengzong, et al. Optical and contact probe for industrial measurement of 3-D points[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014,22(6):1477-1485.
- [26] TURTON A, BHATTACHARYYA D, WOOD D. Development of a multi-view laser scanning sensor for reverse engineering[J]. *Measurement Science & Technology*, 2006,17(8):2319-2327.
- [27] 张德海, 梁晋, 唐正宗, 等. 基于近景摄影测量和三维光学测量的大幅面测量新方法[J]. *中国机械工程*, 2009(7):817-822.
- ZHANG Dehai, LIANG Jin, TANG Zhengzong, et al. New measuring method of large size measurement based on close range photogrammetry and 3D optical measurement[J]. *China Mechanical Engineering*, 2009(7):817-822.
- [28] 钟凯, 李中伟, 史玉升, 等. 组合式大尺寸三维测量系统中的结构参数标定算法[J]. *天津大学学报: 自然科学与工程技术版*, 2011,44(5):425-429.
- ZHONG Kai, LI Zhongwei, SHI Yusheng, et al. Calibration algorithm of structure parameters in combined large-scale 3D metrology system[J]. *Journal of Tianjin University: Science and Technology*, 2011,44(5):425-429.
- [29] XIE F, WANG J, MA S, et al. Multiplexing optical fiber low coherence and high coherence interferometric system with large range and high resolution for online measurement[J]. *Measurement*, 2013,46(1):171-176.
- [30] YANG S M, JIANG X Q, MAXWELL G, et al. A chip tuneable laser developed for on-line micro-nano scale surface measurements[J]. *Measurement Science and Technology*, 2010,21(10):105901-105907.
- [31] YANG S M, JIANG X Q, MAXWELL G, et al. An integrated optical coupler used in a fibre interferometry system for surface measurements[J]. *Optics Communications*, 2008,281(5):1099-1107.
- [32] GUO T, WANG S, DORANTES-GONZALEZ D J, et al. Development of a hybrid atomic force microscopic measurement system combined with white light scanning interferometry[J]. *Sensors*, 2011,12(12):175-88.

Flexible Measurement Approach and Development Trend

YANG Shuming, ZHANG Guofeng

(State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China)

[ABSTRACT] Flexible measurement takes advantages of many different measurement methods to meet the requirements of high accuracy and efficiency in the current measurement field. Flexible measurement systems have high flexibility and adaptability as well. The latest research progress of 3-dimension (3D) measurement techniques is analyzed in this paper, and then the concept of flexible measurement and its crucial techniques are proposed based on the investigation of multi-sensory integration measurement technology. Typical flexible measurement systems are summarized and classified according to the practical applications. Finally, the development trends are predicted based on the analysis of the present problems in flexible measurement systems.

Keywords: Flexible measurement; Multisensory integration; Data fusion

(责编 李丹)