论 文

基于 TDC 的纳米级位移测量方法及其误差分析

邓露^①, 周超^{②*}, 曹志强^②, 王硕^②, 谭民^②^① 中央财经大学统计与数学学院, 北京 100081^② 中国科学院自动化研究所, 北京 100190

* 通信作者. E-mail: chao.zhou@ia.ac.cn

收稿日期: 2016-04-07; 接受日期: 2016-07-01; 网络出版日期: 2016-11-04

国家自然科学基金 (批准号: 61473295, 61528304, 71401189) 和北京市自然科学基金 (批准号: 4152054) 资助项目

摘要 纳米测量技术和测量装置的不断创新与进步将带动纳米技术的快速发展. 微观操作的重要的基础之一就是微纳尺度位移的精确的测量. 本文针对在电子扫描显微镜真空腔中工作的微纳操作机器人的末端运动测量问题, 采用时间-数字转换 (time-digital convertor, TDC) 方法, 测量通过电阻应变片给标准电容充电放电的时间来计算其应变变量, 进而计算其位移. 进一步分析了本方法的误差传递和系统耗散功率, 并与传统的惠斯通电桥方法进行了比较, 可以得出本方法在误差优化的同时, 耗散功率有极大的降低, 对于真空中散热困难的操作条件下, 有较大的优势. 对传感的漂移、精度、分辨率和线性等问题进行测试, 并对系统进行闭环控制和重复微观单元测试等应用演示, 证明方法的有效性.

关键词 纳米位移 误差分析 时间-数字转换 (TDC) 位移测量 漂移

1 引言

纳米级的操作机器人在现在微观操作的长足发展的今天越来越受到重视, 这一技术在诸如纳米材料操作、芯片检测、生物细胞操作等领域有广泛的应用前景. 而在电子扫描显微镜 (scanning electron microscopes, SEM) 中的操作手在这一类研究中有着很多优势: 在图像方面, 电子扫描显微镜是一个优秀的纳米级图像平台, 放大倍数可以达到 1000000 倍以上, 物体分辨率可以优于 1 nm; 其次 SEM 可以提供实时的操作对象图像, 相对 AFM 这样的图像不是实时的平台有很大优势; 最后, 通过电子学方法可以有效地控制和改善图像质量, 如亮度及反差自动适应等, 得到便于实时操作的图像质量, 同时 SEM 的成像景深大、视场大、图像富有立体感, 可以直接观察起伏较大的粗糙表面, 具有亲临世界的临场感. 配合一定的操作手/机器人, 和视觉伺服方法, 可以完成一系列视觉引导下的作业任务. 在操作方面, 由于 SEM 的工作环境是高度真空, 同时有优秀的隔振平台, 因此操作稳定性非常好; 相对于 FEM 这样的平台, SEM 具备较大的内腔空间^[1], 很多操作装置和触感器装置可放置于其内腔. 因此 SEM 更加适合操作纳米尺度的物体, 可以在 SEM 的样品台上安装纳米级运动的机械臂/手, 就可以完成微操作.

引用格式: 邓露, 周超, 曹志强, 等. 基于 TDC 的纳米级位移测量方法及其误差分析. 中国科学: 信息科学, 2016, 46: 1662–1675, doi: 10.1360/N112016-00082

在 SEM 中的微操作研究近年来得到很大发展, 很多研究机构和商业公司都研制出系统^[2~6], 比如 Kleindiek, Zyvex, SmarAct, 和 Attocube. 在学术机构中, 多伦多大学 Sun 等研究的可以从 SEM 样品交换室装卸的纳米操作系统, 使用粘滑式运动的压电陶瓷驱动, 可以用于移除场效应管上的纳米线、提取细胞核中特定的 DNA 等^[7]; 德国 Oldenburg 大学的微米机器人与控制工程中心 Fatikow 等研制了多种压电陶瓷驱动的微操作机构并利用视觉伺服方法, 实现 SEM 中的微操作系统并将 AFM 置于 SEM 中, 搭建了机器人工作平台^[7]; 日本名古屋大学 Fukuda 等研制了一种集成了 4 个操作单元, 共 16 个自由度的微纳操作系统, 利用 AFM 悬臂探针实现多级精确定位, 实现了碳纳米管的拾取、固定、弯曲、扭曲、去皮等基本动作操作, 以及范德华箝位力下的碳纳米管变形测试^[3,8]. 这些系统应用的场景也各有不同, 包括纳米材料性质检测^[9~15], 微米/纳米级器件装配^[16,17], 以及光电子学^[18,19] 和生物学研究中的应用^[7,20].

国内研究方面, 大多数的微纳操作系统采用光学显微镜作为观测器, 如哈尔滨工业大学的基于显微视觉的机电系统 (MEMS) 微装配系统研究^[21] 和北京航空航天大学的宏-微操作结合的自动微装配系统^[22]. 对基于 SEM 微纳操作系统的研究不是很多: 孙立宁团队的基于压电陶瓷粘滑机构研制的 SEM 遥纳操作系统^[23], 北京大学物理电子学研究所研制的微纳操作系统^[24,25] 由四个 Kleindiek 公司 MM3A 纳操作手组成. 北京工业大学固体微结构与性能研究所也采用 MM3A 纳操作手研制基于 ESEM 的纳操作系统^[26]. 清华大学电子显微镜实验室采用机械和压电致动器双级驱动, 设计了一种用于 SEM 的纳米定位装置^[27].

在微观操作中, 精确的定位方法是最为关键的技术之一. 随着高精细加工的发展, 高精度的位移测量仪器也不断出现, 测量的精度不断提高^[28]. 而在 SEM 中的微操作有着特定的限制, 包括空间限制、真空散热困难、电磁辐射的影响, 现有相关研究仍然较少. 在 SEM 中使用的微位移测量方法主要有视觉伺服、光栅编码器、电容/电感传感器和电阻应变片等几种. 由于 SEM 本身是一个优秀的实时视觉平台, 可以实时观测到纳米级的对象细节, 因而使用视觉伺服的方法, 标注/识别目标位置, 自动控制操作末端实现操作, 是一种可行方案; 但是由于 SEM 的视觉帧率较低 (15 Hz), 而且图像极其敏感 (包括亮度、噪声、对象材质变化等), 同时图像漂移较为严重; 在视觉伺服中极大地降低了控制精度, 因此视觉伺服多用于目标的识别^[5,29], 而不适用于精确的定位控制. 基于光栅的传感器是利用反射通过光栅的激光计数来计算安装反射片的部件的位移; 由于光栅技术的发展, 光栅传感器可以达到很高的精度, 但是在 SEM 的真空腔中使用激光类的传感器都有发热问题, 不管是激光发生装置还是激光本身的照射, 都会引起一定的发热; 而在 SEM 的真空腔中散热困难, 只能依靠微操作装置底座来传导散热, 由此引发热量积累、机构的温度升高、机构的膨胀导致持续的漂移; 如文献^[30] 中, 系统的漂移达到 72 nm/min, 无法用于长时间的自动操作. 基于电容的微距传感器, 这一类传感器利用探头与被测目标之间的电容值与距离的关系测量出分辨率优于纳米的距离; 由于其具有非接触测量、结构简单、动态特性好等特点, 并且具有亚纳米级分辨率以及纳米级精度, 在小行程、高精度应用需求的工业生产和科学研究中得到广泛应用^[31,32]; 但是其测量电路复杂、发热量大, 在真空腔中使用漂移很大; 其次其测量直受到电子束的影响, 需要额外防护; 同时探头与被测面之间的机械对齐要求也很高; 因此在 SEM 中使用有诸多困难. 基于电涡流的传感器也有类似的问题. 采用电阻应变片式位移传感器实现反馈的方法, 一般是将应变片安装于微动装置中产生形变的部分, 用测量形变的方法测量位移; 电阻应变片价格低廉, 性质稳定; 传统电阻应变片测量是使用惠斯通电桥, 一方面电桥的精度较低, 难以满足全行程纳米级高精度的定位需求, 另一方面电桥的耗散功率较大, 由此引发的漂移严重. 其他微位移测量方法, 激光干涉仪等纳米级微位移测量设备虽然具有高精度、高可信度的特点, 但由于其成本高、体积大, 很难集成到纳米定位系统中, 经常被用作标定仪器使用^[28,33,34], 这些问题使得纳米级定位技术

图 1 (网络版彩图) 具有纳米级闭环控制精度的微操作机器人

Figure 1 (Color online) The nano-scale manipulation system with closed-loop controlled positioner. (a) The system; (b) the manipulator unit; (c) the example nanoprobng targets

在具体的科研问题中受到严重限制微纳操作系统在 SEM 的真空腔中工作, 传感器的漂移主要的来源是操作手的热胀冷缩. 而传感器测量过程中发热, 由于散热的困难, 会极大地影响系统的热平衡, 进而引发严重的漂移. 本文提出一种基于时间数字转换 (time-digital covertor, TDC) 方法的电阻应变片测量方法用于测量在 SEM 中工作的微操作手的纳米级位移. 基本原理是通过电阻应变片给标准电容充电、放电, 测量其充电和放电的时间, 根据该时间与电阻值的关系即可计算出实际形变量. 该方法具有极低的功耗和高精度的优点. 本文进一步分析了这一方法的误差传递、功耗引发的漂移等重要问题, 并和惠斯通电桥进行了比较.

2 系统简介

在前期的研究中, 设计了一种在 SEM 中使用的纳米级操作机器人, 包括精密定位系统、传感器系统和控制系统等几大部分. 系统精密定位由 4 个结构相同、布局对称的单元组成, 共同安装在底座上, 纳米操作机器人可以通过 SEM 的样品交换室安装, 这一设计避免了频繁打开 SEM 的真空室, 从而极大地节省实验时间. 每个单元由粗调和精调组成, 粗调和精调均是三自由度直角坐标运动机构, 由粗调部分扩大操作范围, 精调部分增加操作的精确度. 机器人原型如图 1 所示.

粗调部分的直角坐标运动机构是使用 3 个互相垂直的线性定位器作为运动机构, 线性定位器是基于粘滑运动的压电陶瓷定位器. 其主要作用是手动或自动地在 SEM 图像上寻找操作区域, 工作的空间 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 5\text{ mm}$. 在本系统中为了避免真空中的散热问题, 选用没有光栅传感器的开环控制的定位器, 而是使用图像伺服进行粗调的控制. 精调部分是使用高压堆叠式压电陶瓷作为致动器, 柔性铰链放大机构进行放大, 三个轴互相垂直安装, 可以实现三维运动. 在实际应用中, 系统在 SEM 的视觉引导下, 操作者通过操作杆控制粗调运动, 到达目的区域后再用精调自动化操作, 在这一过程中, 粗调部分的精度主要靠视觉导引保证, 因此不需要闭环装置. 精调部分主要作用控制末端工具的精确运动, 实现操作. 通过传感器和控制器实现闭环控制, 可以达到纳米级的操作精度. 表 1 是系统的基本性能参数.

系统的传感和控制系统分成两部分, 如图 2, 操作手安装在 SEM 内部, 使用铝外壳屏蔽电子束对

表 1 纳米操作机器人系统性能指标

Table 1 System specification and performance

Dimension	System	100 mm × 100 mm × 20 mm
	One manipulator	30 mm × 30 mm × 17 mm
Coarse positioner (open loop)	Range	10 mm in XY , 5 mm in Z
	Minimum step size	113 nm
Fine positioner (open loop)	Range	$\approx 22 \mu\text{m}$
	Minimum step size	0.12 nm
Fine positioner (open loop)	Rang	$20 \mu\text{m}$
	Accuracy	5 nm
	Maximum speed	$45 \mu\text{m/s}$

图 2 (网络版彩图) 纳米操作系统闭环控制结构

Figure 2 (Color online) Closed-loop controlled nano-manipulation system architecture

电路和电路电磁辐射对电子束的影响。所有传感电路均安装在其中, 以保证传感信号完整性。各个操作手的所有的信息在内部的 MCU 集中, 然后综合滤波等简单处理后, 通过 I2C 总线发出, 在外部控制器的 MCU 上进行控制器的计算, 输出控制信号经过驱动放大后再通过馈通进入 SEM 内部操作手驱动压电陶瓷。在此结构中, 所有耗散功率较大的元器件均安排在外部的控制器中, 尽量避免真空中散热问题。

3 测量方法与分析

在本系统中将电阻应变片直接粘贴在堆叠式压电陶瓷的表面,如图 1(b) 所示。当压电陶瓷伸长或收缩的时候,电阻应变片的长度相应变化,通过测量其电阻的变化就可以计算压电陶瓷的位移。电阻应变片的经典测量方法是使用惠斯通电桥,这一方法在常规下使用很多,但是由于在测量中应变片一直处于通电状态,后继的运算放大器等元器件也必不可少,其耗散功率较大。而在 SEM 的真空环境

图 3 (网络版彩图) 通过电阻应变片对标准电容的充电、放电过程示意图

Figure 3 (Color online) Charging and discharging of a capacitor through a strain gauge

中, 散热困难, 实际使用中发现由于热量累积导致的操作机器人的金属框架膨胀, 末端漂移很严重, 因此无法使用. 本文使用 TDC 方法测量电阻应变片, 基本方法是通过电阻应变片一个标准电容充电, 通过计算充电或放电的时间来计算应变片的电阻值, 如图 3 所示, 具有极低功耗和高精度的特点.

3.1 TDC 方法测量

如上所述, 该方法通过充电或放电的时间来计算应变片的电阻值, 而现在时间数字转换是成熟的技术, 可以达到 15 ps 的精度, 因此可以达到很高的精度. 详细测量过程如下所述.

通过发生一系列的信号, 对电容在一定的电压门限内充电和放电, 利用 TDC 将时间转化为数字信号. 时间和位移的具体关系可以计算如下, 通过电阻为电容的放电/充电时间为

$$t_1 = R \cdot C \cdot \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right), \quad t_2 = R \cdot C \cdot \ln \left(\frac{v_s - v_1}{v_s - v_2} \right), \quad (1)$$

其中 v_s 是充电电压, v_1 和 v_2 分别是放电和充电的门限, 而 t_1 和 t_2 分别是放电和充电时间.

通过测量 t_1 或 t_2 可以计算出电阻值. 下面以计算简单的放电时间为例, 测量的最终目的是测量出对象的形变, 因此需要与无形变的应变片比较时间测量的结果:

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R} = \frac{t_1 - t_{s1}}{t_{s1}}, \quad (2)$$

其中 t_{s1} 是标准电阻的放电时间. ΔR 是阻值变化量. 形变量 ε 表征了位移大小, 实际使用中可以通过 SEM 的图像或者激光干涉测距仪加以标定.

实际上, 为了提高精度, 可以再次测量一个标准电阻在相同条件下的时间作为标准电阻的放电时间, 标准电阻使用和待测电阻应变片相同的应变片, 安装在没有形变但是温度相同的平面上, 这样可以进一步减少温度变化对测量的影响, 以及电压噪声对时间测量的影响. 由此可以得到电阻应变片的值.

本方法的误差来源, 主要可以分成以下几个部分: 电源电压噪声、数字转化精度、温度变化等因素的影响, 下面分析对精度影响最大的电源电压噪声和对漂移影响最大的系统自发热问题, 并且在同等条件下的惠斯通电桥的误差进行比较.

3.2 电源噪声影响

电源的噪声在电路中始终存在, 对于测量电路中的电源, 其噪声仍然是测量误差的主要来源, 我

图 4 惠斯通电桥原理图

Figure 4 Schematic diagram of Wheatstone bridge

们通过测量结果的方差来表征这一误差. 首先定义电源的噪声:

$$v_s = \bar{v}_s + n_{vs}, \quad (3)$$

其中 v_s , $\bar{v}_s$, n_{vs} 分别是电压真实值、电压的平均值和电压噪声, 可以认为 n_{vs} 是零均值的正态分布随机噪声, 令其方差为 σ_s .

根据式 (2), 虽然形式上与电压无关, 但是时间的测量和电压都是相关的, 如式 (1). 于是可以得到

$$n_\varepsilon = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t_1} n_{t1} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial t_s} n_{ts} = \frac{1}{t_{s1}} n_{t1} - \left(\frac{t_1 - t_{s1}}{t_{s1}^2} + \frac{1}{t_{s1}} \right) n_{ts1}, \quad (4)$$

其中 n_{t1} 和 n_{ts1} 分别是 t_1 和 t_{s1} 的噪声, 而这两者是由 v_s 的噪声引起的, 以 n_{t1} 为例, 计算如下:

$$n_{t1} = \frac{\partial t_1}{\partial v_1} n_{v1} + \frac{\partial t_1}{\partial v_2} n_{v2} = -\frac{RC}{v_1} n_{v1} + \frac{RC}{v_2} n_{v2}, \quad (5)$$

其中 n_{v1} 和 n_{v2} 分别是门限电压 v_1 和 v_2 的噪声, 根据电路原理, 可以认为他们与 v_s 的噪声是独立同分布的, n_{ts1} 的计算方法类似, 于是有

$$n_\varepsilon = -\frac{RC}{t_{s1} V_{t1}} n_{Vt1} + \frac{RC}{t_{s1} v_2} n_{v2} - \frac{RC}{v_1} \left(\frac{t_1 - t_{s1}}{t_{s1}^2} + \frac{1}{t_{s1}} \right) n_{v1}^o - \frac{RC}{v_2} \left(\frac{t_1 - t_{s1}}{t_{s1}^2} + \frac{1}{t_{s1}} \right) n_{v2}^o, \quad (6)$$

其中 n_{v1}^o 和 n_{v2}^o 是在 t_{s1} 测量过程中由 v_1 和 v_2 引入的噪声, 由于 t_1 和 t_{s1} 的测量在不同时刻、相同条件进行, 因此这些噪声均为独立同分布的白噪声. 于是可以得到这一 TDC 方法测量结果的方差:

$$\sigma_\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{RC}{t_{s1} v_1} \right)^2 + \left(\frac{RC}{t_{s1} v_2} \right)^2 + \left(\frac{RC}{v_1} \left(\frac{t_1 - t_{s1}}{t_{s1}^2} + \frac{1}{t_{s1}} \right) \right)^2 + \left(\frac{RC}{v_2} \left(\frac{t_1 - t_{s1}}{t_{s1}^2} + \frac{1}{t_{s1}} \right) \right)^2} \cdot \sigma_s. \quad (7)$$

考虑到实际测量中 $R \rightarrow R_s$, 所以 $t_1 \rightarrow t_{s1}$, 可以得到方差的近似值为

$$\sigma_\varepsilon = \sqrt{2} \frac{RC}{t_{s1}} \sqrt{\frac{1}{v_1^2} + \frac{1}{v_2^2}} \cdot \sigma_s. \quad (8)$$

根据实际情况, 可以取 $V_{t1}=1.5$ V 和 $V_{t2}=3$ V, 此时 $t_{s1} \approx 0.7RC$, 于是得到 $\sigma_\varepsilon \approx 1.4\sigma_s$. 而在同等条件下惠斯通电桥的测量误差同样可以计算, 电桥的原理图如图 4.

选择与 TDC 方法相同的单个应变片的方式, 其他的电阻则是与之相同的、安装在没有形变但是温度相同的平面上的应变片作为标准电阻. 这样我们有

$$v_o = G \cdot v_s \cdot \left(\frac{R}{R_s + R_s} - \frac{R_s}{R_s + R_s} \right) = G \cdot v_s \cdot \frac{R - R_s}{2R_s}. \quad (9)$$

同样计算由 v_s 引起的 v_o 的误差:

$$n_o = \frac{dv_o}{dv_s} n_{vs} = G \frac{R - R_s}{2R_s} n_{vs}. \quad (10)$$

于是得到惠斯通电桥的测量方法的方差:

$$\sigma_R^o = G \frac{|R - R_s|}{2R_s} \sigma_s. \quad (11)$$

由于应变片的最大变化值约 2 ‰, 而 G 在 10000 左右, 所以 $\sigma_\varepsilon \approx 2\sigma_s$. 因此在对电源电压的噪声上, 两种方法的噪声传递是近似的, 但是实际上, 由于 TDC 的测量功率非常小 (见 3.3 小节), 因而可以采用精度更高的电压基准源; 而惠斯通电桥的功耗较大 (包括电桥和放大器), 必须采用输出功率大一些的电压源, 其电压噪声 σ_s 会高出数个量级. 同时后继电路中的运算放大器 (一般采用仪表放大器) 也会引入新的噪声, 而 TDC 测量方法则没有这些问题.

3.3 测量耗散功率计算与比较

由于纳米操作机器人在 SEM 的真空腔中工作, 电路的耗散功率对系统有很大的影响. 由于真空程度很高, 可达 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ pa, 其散热能力基本可以忽略; 系统仅能通过与样品台接触的基座导热, 而操作手部分与系统接触的面积很小, 因此其散热条件进一步恶化. 而惠斯通电桥的功耗相对较大, 在电阻应变片上产生的热量积累, 导致局部温度升高, 引发严重的漂移, 因此不适用于本系统的传感. 本文的方法主要是利用对标准电容的充电、放电的时间计算电阻应变片的阻值变化, 我们针对这一过程, 计算电阻应变片上的功耗, 并与惠斯通电桥功耗进行比较. 对于本方法的过程, 电阻应变片上的功可以分成充电和放电两部分计算,

$$W_1 = \int_{t_1} v_R \cdot i_R dt = \int_{RC \cdot \ln(\frac{v_s}{v_s - v_1})}^{RC \cdot \ln(\frac{v_s}{v_s - v_2})} v_s (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \frac{v_s}{R} e^{-\frac{t}{RC}} dt, \quad (12)$$

$$W_2 = \int_{t_2} v_R \cdot i_R dt = \int_{RC \cdot \ln(\frac{v_s}{v_1})}^{RC \cdot \ln(\frac{v_s}{v_2})} v_s e^{-\frac{t}{RC}} \frac{v_s}{R} e^{-\frac{t}{RC}} dt, \quad (13)$$

其中 W_1 和 W_2 是充电和放电过程的功耗, 而 v_c 和 i_c 是电容的电压和电流, 于是可以得到其耗散功率为

$$P_{TDC} = \frac{W_1 + W_2}{t_1 + t_2} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{R \cdot \ln \frac{v_2(v_s - v_1)}{v_1(v_s - v_2)}}. \quad (14)$$

仍以 $v_1=1.5$ V, $v_2=3$ V 和 $v_s=3.3$ V, 可以得到 $P_{TDC} \approx 0.0036$ W.

对于惠斯通电桥, 耗散功率为 $P_{bridge} = v_s^2/R$, 因此 $P_{bridge} \approx 0.031$ W. 可见 TDC 方法功耗降低了接近一个数量级. 而实际上惠斯通电桥后继的放大器电路也是功耗较大的器件, 计算入这一部分, 会导致惠斯通电桥方法的功耗进一步增加, TDC 方法的优势进一步体现.

3.4 其他问题的讨论

对于 TDC 方法, 除了上述讨论的噪声以外, 还有在数字化过程中的误差, 实际上由于现在的时间测量方法的精度很高, 可以达到 15 ps 级别, 由此引发的误差在 $15 \text{ ps}/100 \text{ } \mu\text{s} = 1.5 \times 10^{-3}\%$, 而惠斯通电

图 5 传感器开机漂移变化情况

Figure 5 Sensor drift behaviour over time. (a) For the entire 10000 s; (b) in the first 60 s of start-up; (c) in the last 60 s of the testing

桥使用 AD 转换器对电压数值化, 误差一般为最小分辨率的一半, 因此对于常用的 12 位 ~ 14 位的 AD 转换, 误差为 $0.5/2^{12} \sim 2^{14} = 0.012 \sim 3.1 \times 10^{-3}\%$. TDC 方法的数值化误差基本相当于 15 位 AD 的精度.

传统的惠斯通电桥的测量频率一般取决于电路中 AD 器件的带宽, 现有技术可以做得很高. 对于 TDC 方法来说, 由于需要时间对电容进行充电和放电, 因此测量频率 f 受到限制: $f < 1/(t_1 + t_2) \approx 2.9$ kHz. 虽然远低于常规 AD 转换器的测量频率, 但是在一般的应用中也足够使用. 本文的使用场景以及以后其他相关应用场景中, 操作者手动操作反应一般在 10 Hz 以下, 自动操作的控制过程也在 100 Hz 以下, 实际操作中不会出现太快的情况, 本文的方法还有足够的滤波处理空间, 因此在微观操作中完全可以推广使用.

4 传感器性能测试

本文在日立 S4800 扫描电子显微镜中测试了系统. SEM 使用 800000 的放大倍数. 首先使用降低噪声和图像稳定的算法^[35]来补偿 SEM 图像高倍放大时的噪声和漂移, 同时使用 Sub-pixel 跟踪方法^[30]来识别末端位置, 我们测试了本文方法的漂移、线性、分辨率和精度.

4.1 传感器漂移特性实验

首先测试漂移特性, 传感器的漂移主要是温度引起的, 将整个纳米操作机器人安装在 SEM 的真空腔中, 抽真空后, 再等待数小时, 使得机器人与内腔环境达到较好的热平衡, 以排除机器人本身的热变形对测量的影响. 随后对传感系统启动, 而压电陶瓷仍处于零电压驱动状态. 记录传感器的

图 6 (网络版彩图) 传感器输出的线性程度实验结果

Figure 6 (Color online) Linearity of the sensor based on TDC strain gauge sensing

图 7 (网络版彩图) 传感器分辨率实验结果

Figure 7 (Color online) Resolution of the sensor was determined to be better than 1 nm

表 2 传感器系统性能指标

Table 2 Sensor system specification and performance

Item	Value
Drift	1 nm/min (after 2.5 h); 3 nm/min (after 1 min); 50 nm/min (turn on)
Resolution	< 1 nm
Acuracy	3 nm
Linearity	0.9998(R2)

10000 s 输出如图 5(a) 所示, 在前 60 s 中 (如图 5(b)), 电路开机的影响仍然比较显著, 比如开机后电阻的热量导致应变电阻片和压电陶瓷之间没有达到热平衡, 因此传感器输出有明显的漂移, 大约 50 nm/min. 此后漂移变小, 在 1 min 后就降到 3 nm/min. 而在实验的最后 60 s, 如图 5(c), 漂移大约只有 0.83 nm/min.

4.2 传感器线性特性实验

传感器线性是表征被测物理量与输出之间的关系, 符合线性关系的程度越高, 对于实际使用就越方便. 在安装好系统之后, 需要等待系统的热平衡 —— 在空转运行大约半小时之后, 传感器、机械系统都达到较为稳定的状态即可. SEM 的放大倍数则是使用 80000, 仍然使用降低噪声和图像稳定的算法和 sub-pixel 跟踪方法. 利用微操作机器人的一个轴, 对其进行定位控制, 每 2 μm 的位移测量一次输出, 并且每次定位后等待 10 s 再行测量以保证其稳定性. 实验结果如图 6 所示, R2 系数达到 0.9998.

4.3 传感器分辨率特性实验

为了测量传感器的分辨率, 控制机器人的单个臂, 每 10 s 移动 1 nm, 测量两次, 同时在 SEM 图像上标定位移变化. 图 7 是设定值、图像和传感器的输出值. 按照 SEM 图像的显示, 传感器的输出与其误差小于 1 nm, 因此位置传感器的分辨率优于 1 nm.

最后对本节所有的测试, 按照误差理论计算的相关数值列于表 2.

图 8 (网络版彩图) 纳米操作机器人单轴位置 10 nm 阶跃控制结果及其误差

Figure 8 (Color online) Nanopositioner controller 10 nm step response. (a) Step response; (b) positioning error

图 9 (网络版彩图) 系统对重复单元的自动检测

Figure 9 (Color online) Automated nanoprobng of duplicated features. (a) The probing position; (b) the probing order

5 传感器应用演示

5.1 位置控制

位置传感器的重要应用之一就是为闭环控制系统提供反馈信息. 对于本文的系统我们使用粘贴在压电陶瓷表面的应变电阻片作为测量其应变的传感器, TDC 方法计算出位移以后, MCU 使用简单的 PID 控制压电陶瓷的驱动电压, 使得压电陶瓷在一个设定长度上保持. 实验中采用每步 10 nm 的阶跃信号, 如图 8 所示, 分别是设定的位置、图像测量末端位置和传感器输出.

系统采用简单的 PID 方法主要是验证作为反馈的传感器性能, 控制性能可以通过采用更先进的控制方法来改进, 但是本实验表明了本文传感器和传感方法可以适用于精确的位置控制.

5.2 重复微观单元检测

本文使用一个 SEM 标准测试芯片 (metrology chip) 作为测试的对象, 该芯片具有很多特定形状的重复单元, 均由亚微米级、纳米级的线、块组成. 选择重复的同心环作为对象, 如图 9 所示. 首先使用操作杆控制末端钨针移动到同心环的 3 个点, 如图 9(a) 所示, 在让系统自动计算以下多个同心环的

图 10 重复检测中的细节图像

Figure 10 Zoomed in view of each of the probed locations

对应点的坐标, 控制末端自动移动到不同的点. 图 10 显示末端在每个环上对应位置的比较, 选择左边的点, 可见系统在不同的同心圆上相对位置都是一致的, 定位的精度很高.

在重复检测演示中完全使用传感器的定位能力而不借助系统的视觉伺服, 可以极大地提高定位测试的精确程度和定位速度. 实验中使用的标准测试芯片是模拟 IC 芯片生产过程中出现的大量高密度重复单元, 而系统的定位能力可使得系统用在对 IC 芯片生产过程中, 测量检验特定单元的功能.

6 结论

本文研究了一种可以测量纳米级位移的传感方法, 利用电阻应变片测量压电陶瓷的形变, 使用对电容的充电放电时间来计算应变电阻的阻值变化. 通过对该方法的误差传递和耗散功率的分析以及与传统惠斯通电桥方法比较. 通过实验对该方法的性能进行了测试, 并将该方法用于闭环控制和微观结构检测. 实验和计算结果都表明本文的方法在真空环境中使用具有低漂移高精度的优势.

对于本文的方法, 根据本文的分析, 对于测量结果有影响的几个主要因素, 包括电源噪声、TDC 测量误差, 以及环境的稳定性, 因此可以通过提高电源精度、优化 TDC 方法、减少温度变化等方法提高测量精度; 除此之外, 可以在数据的后处理上优化, 包括滤波、温度补偿等手段; 可望获得更加优化的测量结果.

参考文献

- 1 Fukuda T, Nakajima M, Liu P, et al. Bringing the nanolaboratory inside electron microscopes. IEEE Nanotech Mag, 2008, 2: 18–31
- 2 Yu M-F, Lourie O, Lourie O, et al. Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load. Science, 2000, 287: 637–640
- 3 Dong L, Arai F, Fukuda T. Destructive constructions of nanostructures with carbon nanotubes through nanorobotic manipulation. IEEE/ASME Trans Mechatronics, 2004, 9: 350–357
- 4 Heeres E C, Katan A J, van Es M H, et al. A compact multipurpose nanomanipulator for use inside a scanning electron microscope. Rev Sci Instrum, 2010, 81: 023704
- 5 Fatikow S, Wich T, Hulsén H, et al. Microrobot system for automatic nanohandling inside a scanning electron microscope. IEEE/ASME Trans Mechatronics, 2007, 12: 244–252

- 6 Zhang D, Breguet J-M, Clavel R, et al. In situ electron microscopy mechanical testing of silicon nanowires using electrostatically actuated tensile stages. *J Microelectromech Syst*, 2010, 19: 663–674
- 7 Chen B, Anchel D, Gong Z, et al. Identification of genes from nano-dissected sub-nuclear structures. *Small*, 2014, 10: 3267–3274
- 8 Fukuda T, Arai F, Nakajima M. Nanomanipulation system under electron microscope. In: *Micro-Nanorobotic Manipulation Systems and Their Applications*. Berlin: Springer, 2013. 163–196
- 9 Dong L X, Shou K Y, Frutiger D R, et al. Engineering multi-walled carbon nanotubes inside a transmission electron microscope using nanorobotic manipulation. *IEEE Trans Nanotech*, 2008, 7: 508–517
- 10 Fukuda T, Arai F, Dong L. Assembly of nanodevices with carbon nanotubes through nanorobotic manipulations. *Proc IEEE*, 2003, 91: 1803–1818
- 11 Bell D J, Dong L, Nelson B J, et al. Fabrication and characterization of three-dimensional InGaAs/GaAs nanosprings. *Nano Lett*, 2006, 6: 725–729
- 12 Zhu Y, Xu F, Qin Q, et al. Mechanical properties of vapor-liquid-solid synthesized silicon nanowires. *Nano Lett*, 2009, 9: 3934–3939
- 13 Espinosa H D, Zhu Y, Moldovan N. Design and operation of a MEMS-based material testing system for nanomechanical characterization. *J Microelectromech Syst*, 2007, 16: 1219–1231
- 14 Hwang G, Hashimoto H, Bell D J, et al. Piezoresistive InGaAs/GaAs nanosprings with metal connectors. *Nano Lett*, 2009, 9: 554–561
- 15 Lugstein A, Steinmair M, Steiger A, et al. Anomalous piezoresistance effect in ultrastrained silicon nanowires. *Nano Lett*, 2010, 10: 3204–3208
- 16 Dai H, Hafner J, Rinzler A, et al. Nanotubes as nanoprobe in scanning probe microscopy. *Nature*, 1996, 384: 147–150
- 17 Li J, Zhang Y, To S, et al. Effect of nanowire number, diameter, and doping density on nano-fet biosensor sensitivity. *ACS Nano*, 2011, 5: 6661–6668
- 18 Aoki K, Miyazaki H, Hirayama H, et al. Microassembly of semiconductor three-dimensional photonic crystals. *Nat Mater*, 2003, 2: 117–121
- 19 Chen H, He C, Wang C, et al. Far-field optical imaging of a linear array of coupled gold nanocubes: direct visualization of dark plasmon propagating modes. *ACS Nano*, 2011, 5: 8223–8229
- 20 Ahmad M, Nakajima M, Kojima M, et al. Nanofork for single cells adhesion measurement via ESEMnanomanipulator system. *IEEE Trans Nano Biosci*, 2012, 11: 70–78
- 21 Chen L G, Sun L N, Bian X Q, et al. Research of MENS assembly system based on micro-vision. *Machinery Electron*, 2005, 2005: 31–33 [陈立国, 孙立宁, 边信黔, 等. 基于显微视觉的 MEMS 微装配系统研究. *机械与电子*, 2005, 2005: 31–33]
- 22 Zong G H, Sun M L, Bi S S, et al. A microassembly workcell with macro to micro automatic operations. *China Mech Eng*, 2005, 16: 2125–2130 [宗光华, 孙明磊, 毕树生, 等. 宏 – 微操作结合的自动微装配系统. *中国机械工程*, 2005, 16: 2125–2130]
- 23 Li D J, Rong W B, Sun L N, et al. SEM-based tele-nanomanipulation system with virtual 3D visual and force interaction. *Robot*, 2013, 35: 52–59 [李东洁, 荣伟彬, 孙立宁, 等. 基于虚拟 3D 视觉和力觉交互的 SEM 遥纳操作系统. *机器人*, 2013, 35: 52–59]
- 24 Chen Q, Wang S, Peng L M. Establishing Ohmic contacts for in situ current-voltage characteristic measurements on a carbon nanotube inside the scanning electron microscope. *Nanotechnology*, 2006, 17: 1087
- 25 Wei X L, Chen Q, Liu Y, et al. Cutting and sharpening carbon nanotubes using a carbon nanotube nanoknife. *Nanotechnology*, 2007, 18: 185503
- 26 Ji Y, Wang L, Wei B, et al. In-situ micromanipulation and dynamic observation of nano-sized materials by using a scanning electron microscope. *J Beijing Univ Tech*, 2008, 34: 429–433 [吉元, 王丽, 卫斌, 等. 扫描电镜中纳米材料的原位操纵和动态观察. *北京工业大学学报*, 2008, 34: 429–433]
- 27 Yan Y J, Zhang Y S, Peng K Q, et al. Design of nano-manipulator in a scanning electron microscope. *J Chinese Electron Microscopy Soc*, 2004, 23: 484–484 [闫允杰, 张友生, 彭奎庆, 等. 一种扫描电镜下纳米操作台的设计. *电子显微学报*, 2004, 23: 484–484]
- 28 Andrew J. Fleming, a review of nanometer resolution position sensors: operation and performance. *Sens Actuat A*:

- Phys, 2013, 190: 106–126
- 29 Chen B, Anchel D, Gong Z, et al. Identification of genes from nano-dissected sub-nuclear structures. *Small*, 2014, 10: 3267–3274
- 30 Zhang Y L, Zhang Y, Ru C, et al. A load-lock compatible nanomanipulation system for scanning electron microscope. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 2013, 18: 230–237
- 31 Cui Y G, Zheng J H, Ma J Q, et al. Self-sensing piezoelectric micro-gripper. *Opt Precis Eng*, 2015, 23: 1996–2004 [崔玉国, 郑军辉, 马剑强, 等. 压电自感知微夹钳. 2015, 23: 1996–2004]
- 32 Xi X, Clancy T, Wu X Z, et al. A MEMS XY-stage with sub-nanometer positioning. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Beijing, 2015. 988–993
- 33 Karrai K, Braun P. Miniature long-range laser displacement sensor. *Proc Actuator*, 2010, 1: 285–288
- 34 Bhagat U, Shirinzadeh B, Tian Y, et al. Experimental analysis of laser interferometry-based robust motion tracking control of a flexure-based mechanism umesh. *IEEE Trans Autom Sci Eng*, 2013, 10: 267–275
- 35 Gong Z, Chen B K, Liu J, et al. Fluorescence and SEM correlative microscopy for nanomanipulation of sub-cellular structures. *Light Sci Appl*, 2014, 3: e224

A TDC-based method for nano-scale displacement measurement and its error analysis

Lu DENG¹, Chao ZHOU^{2*}, Zhiqiang CAO², Shuo WANG² & Min TAN²

¹ *School of Statistics and Mathematic, Central University of Finance and Economics, Beijing 100081, China;*

² *Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China*

*E-mail: chao.zhou@ia.ac.cn

Abstract The innovation and improvement of nano-scale measurement methods and devices are driving the rapid development of nano-technology. One of the most important foundations of micro-manipulation is the accurate measurement of micro-and nano-displacement. This paper focuses on the measurement of end effectors for a nano-manipulation robot, which operates in the vacuum chamber of a scanning electron microscope. A standard capacitor is charged and discharged through a strain gauge, and the time is measured by a time-digital convertor to calculate the displacement. The error and power consumption are analyzed and compared with a traditional Wheatstone bridge. The power consumption is greatly reduced by optimizing the error; thus, it takes advantage of the vacuum environment, in which heat dissipation is difficult to achieve. The drift, precision, resolution, and linearity are tested, and demos of closed-loop control and repeated micro-unit probing are provided to verify the validity of this method.

Keywords nano-scale displacement, error analysis, time-digital convertor, displacement measurement, drift

Lu DENG received the B.S. degree in international economics and trade in July 2003, the M.S. degree in econometrics in March 2006, both from Hebei University of Technology, Tianjin, China, and the Ph.D. degree in econometrics from Nankai University, Tianjin, China, in 2009. She was appointed as an assistant professor at the Central University of Finance and Economics in July 2009, and has been an associate professor since Oct. 2011. Her current research interests include error analysis, time series modeling, and complex data.

Chao ZHOU received the B.S. (Hons.) degree in automation from Southeast University, Nanjing, China, in July 2003, and the Ph.D. degree in control theory and control engineering from the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, in 2008. He became an assistant professor in the Key Laboratory of Complex Systems and Intelligent Science, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences in July 2008, and has been an associate professor since Oct. 2011. His current research interests include robotic motion control, bio-inspired robotic fish, and embedded robotic systems.

Min TAN received the B.S. degree from Tsinghua University, Beijing, China, in 1986, and the Ph.D. degree from the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences (IACAS), Beijing, China, in 1990, both in control science and engineering. He is currently a professor with the State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, IACAS. He has published more than 200 papers in journals, books, and conference proceedings. His research interests include robotics and intelligent control systems.