

文章编号 1004-924X(2001)06-0511-03

显微精密成像与微型机械尺寸检测技术

王向军, 王 峰

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院)

天津大学 测试计量技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 讨论了利用半导体或纳米制备技术和手段提供的物理空间晶格作为显微成像基准, 对显微视觉成像系统的四维空间畸变进行提取、修正和实时标定, 以实现视觉检测系统的精密数字成像, 为微机械量、微几何量提供检测、评价和计量手段。对若干问题进行了详细的讨论, 显微视觉检测是微机械量微几何量计量中最有效的方法之一, 而精密数字成像是必须解决的问题之一。研究精密数字成像是视觉检测技术向微观检测领域发展所必须解决的科研课题。对微机械量和微几何量计量有重要意义

关键词: 视觉计量; 微机械系统; 纳米基准
中图分类号: TG806 文献标识码: A

1 引言

随着现代科学技术的发展, 特别是现代计量学和测试理论及技术的发展, 在计量测试领域中, 已越来越多地采用数字影像技术和视觉技术。随着现代机械制造技术在微型机械方向的迅速发展和走向实用, 对微机械量和几何量的检测和计量提出了越来越高的要求。目前数字影像技术和视觉技术在此应用中倍受注目。近年来, 视觉计量或视觉计量技术 (Vision Metrology / Vision Metrology Technology) 在该领域和技术文献中越来越多地被提到和采用。

目前, 可对亚微米级的 (Submicrometer) 微机械量和几何量的检测和计量手段有: 扫描电子显微镜 (SEM)、扫描探针显微镜 (SPM)、干涉显微镜、高精度轮廓仪、光电坐标测量机 (CMM-Opt) 等。其中, SEM 和 STP 的测量范围分布在几 nm ~ 200 μ m 左右; 而白光干涉显微镜测量范围分布在 0.5 μ m ~ 0.6mm 左右; 轮廓仪测量范围分布在 0.1 μ m ~ 5mm 左右; 而 CMM-Opt (Opt. probe) 测量范围分布在 1 μ m ~ 1000mm 左右^[1]; 具有机械式测头 (Mech. probe) 的 CMM 对微机械量和几何量的检测和计量显得无能为力; 而扫描隧道显微镜 (STM) 和原子力显微镜 (AFM) 就其测量精度和范围应属于纳米测量手段。微 (型) 机

械量几何量分布在亚微米到 10mm 之间, 在这个测量区域中, 显微视觉测量方法辅助以精密的机械移动可以覆盖亚微米到 10mm 的区间, 几乎可以覆盖整个的微 (型) 机械量几何量测量区间, 是该领域最有前景的计量测试方法和手段之一。但是, 显微视觉测量系统应该解决自身的“精密成像”问题, 它的测量区间才能有效地覆盖亚微米的微观物理空间。

2 显微成像系统的成像畸变分析

在通常的视觉测量系统中, 所要求的相对精度往往可以忽略视觉光电系统所产生的三维成像空间畸变。而在有的应用中, 如视觉瞄准、定位等应用可以使用相对稳定的光学中心或近轴区域, 因此, 像元级或亚像元级的三维空间成像畸变均被忽略。在利用视觉计量技术对微机械量和几何量的检测和计量中, 上述三维空间成像畸变所产生的测量误差则是主要因素之一, 不可忽视。

上述三维空间畸变并不仅仅是光学成像系统的畸变总和, 而且包括阵列成像器件的光电特性均匀性和空间分布均匀性、物空间理想成像面与实际成像面的误差、光电器件成像面在像空间的三维位置误差和被成像物面在物空间的三维空间位置误差等。

利用视觉检测技术进行测量应属间接测量,即被测物理量是通过中间过程的影像被进行测量的,而视觉测量中所采用的所有影像处理算法均是针对被测影像的(如成像像元的细分精度可以达到二十分之一的像元),但是,被测影像是否真实反映了实际被测物理量则是影像和视觉测量中非常重要的研究问题。

在显微成像测量中,上述三维空间畸变表现的更为严重,特别对分布在亚微米到 1mm 范围的微机械量和几何量的视觉检测和计量结果产生严重影响。因此,利用成像方法对微机械量和几何量进行检测必须研究和解决“精密成像”问题。精密成像问题涉及以下问题:成像系统成像面的综合空间畸变;成像系统成像面的综合空间畸变的评价及数学建模;成像系统成像面的综合空间畸变的实时修正和精密数字成像;亚微米级影像实物基准形式和实现方法。

3 实现精密数字成像方法

采用双目高倍体视显微光学系统^[5]可以对被测量视场进行成像,利用两台固体摄像机接收双目显微图像,通过计算可得到微三维空间任意点的三维坐标。利用亚微米级自然物质表面晶格排列图案作为标准被测物,提取显微成像系统成像面的综合三维空间畸变信息。该信息不仅反映光学成像系统的畸变总和,而且包括阵列成像器件的光电特性均匀性和空间分布均匀性、物空间理想成像面与实际成像面的误差、光电器件成像面在像空间的三维位置误差和被成像物面在物空间的三维空间位置误差等因素对精确成像的综合影响。利用视觉成像物空间与像空间的四维变换矩阵和数值处理算法建立显微成像系统成像面的综合三维空间畸变数学模型(实际为四维空间畸变)。即成像系统空间变换关系为:

$$T = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ F_{1 \times 3} & S_{1 \times 1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: $R_{3 \times 3}$ 为旋转子矩阵, $P_{3 \times 1}$ 为相对参考坐标系的旋转坐标系原点的位置矢量, $F_{1 \times 3}$ 为表达了成像系统的透视变换子矩阵, $S_{1 \times 1}$ 为成像比例变换因子。在机器人应用中,比例变换因子总是等

于 1。

构造显微成像系统实际三维空间畸变曲面和理想三维空间成像曲面,利用中值法、最大最小包容法、最小二乘包容法等对显微成像系统三维空间畸变进行评价。利用显微视觉成像系统综合三维空间畸变数学模型对三维空间成像畸变进行实时修正,实现精密数字成像。事实上成像空间的畸变是四维的,综合三维空间畸变可以一次性确定,但它是相对于第四维(比例)畸变的相对三维变量。而第四维(比例)成像畸变是由于测量时物空间成像面的随机变化引起的,这就需要对显微视觉检测系统进行实时标定。在成像空间放置亚微米量级实物成像基准,对显微视觉检测系统进行实时标定,该基准在视场中沿显微成像系统物距方向连续分布,以实时获得基准影像,实现显微视觉检测系统实时标定;

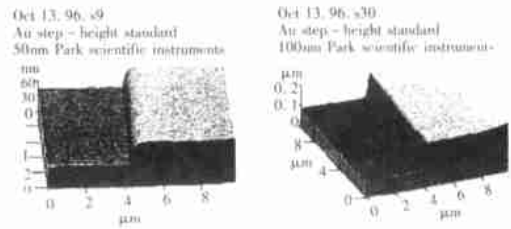


Fig. 1 50nm and 100nm standard tables.^[4]

4 微机械结构检测实例

图 2 为 $7\mu\text{m}$ 厚度金属镀层的显微成像,利用 $50\text{mm} \times 50\text{mm XY}$ 数控移动工作台实现超视场微观结构检测,镀层厚度检测精度 $\pm 3\sigma$ 为 $0.2\mu\text{m}$ 。

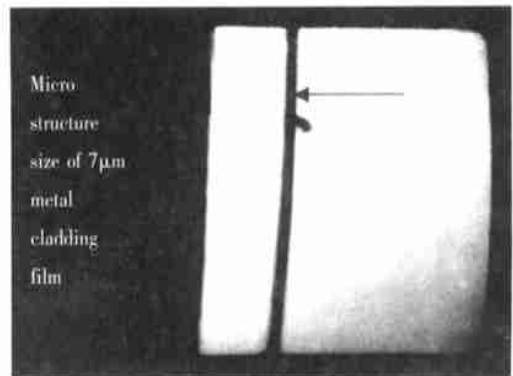


Fig. 2 An image of $7\mu\text{m}$ metal cladding film.

图3为微型平面机械结构显微成像自动检查仪。图4为视觉成像系统满量程成像空间修正前后的数字成像曲线,经过修正后可以获得三维空间成像畸变明显减少的精密数字成像结果。

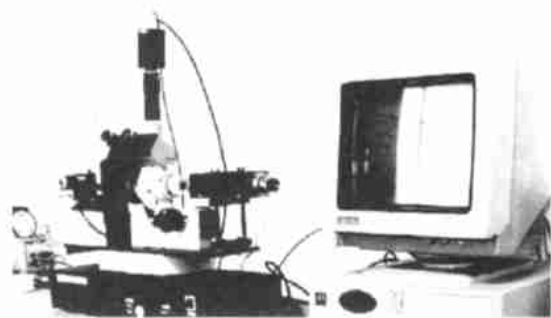


Fig. 3 Vision micro structure inspector.

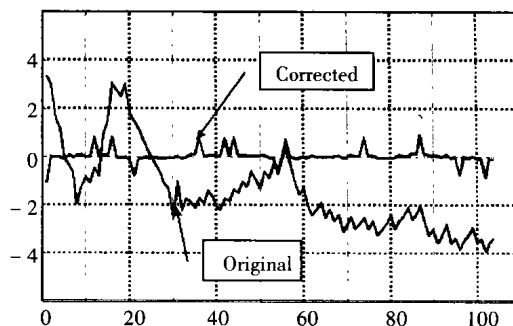


Fig. 4 FSR original and corrected inspecting curves.

5 结 论

显微精密成像和视觉微型机械尺寸检测技术的研究对微型机械产品的研制和产业化将是非常必要的,它将提供一种有效、实用、可靠和方便的测试手段。而近来出现的纳米机械和纳米制造技术为微(米)机械(量)的视觉检测和计量提供了可能的空间物理基准。

参考文献:

- [1] Wilkening Dr G. Measuring methods for the determination of geometrical quantities of micro parts[A]. Proceedings of Symposium on Nano- metrology in Precision Engineering[C], 1998, 11(24): 68- 75.
- [2] Edmundson, Kenneth. Practical evaluation of sequential estimation for vision metrology[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1998, 53(5): 272- 285.
- [3] Christopher C. Modeling errors for dimensional inspection using active vision[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 1999, 15(3): 23- 37.
- [4] 胡晓唐. 纳米级台阶实物基准的研制和标定[A]. Proceedings of Symposium on Nano- metrology in Precision Engineering[C]. HK, 1998, 144- 148.
- [5] 于波, 王立鼎, 刘立新. 电视显微立体成像系统中的闪烁问题及解决方法探讨[J]. 光学 精密工程, 1998, 6(1): 53- 57.

Study of Micro Mechanical Size Inspection Technology by Microscope Precision Digital Image

WANG Xiang jun, WANG Feng

(College of Precision Instrument and Opto- electronic Engineering, Tianjin University,
The Metrology Technology and Instrumentation National Laboratory
Qilitai, Nankai District, Tianjin 300072, China)

Abstract: The microscope precision digital imaging which is obtained by means of a standard object made by means of semiconductor manufacturing technology or nanotechnology approach, the extraction of four- dimensional space error of microscope vision image system, and the real- time correction and calibration to achieve precision digital imaging are discussed. An example is given for inspection of a micro structure size of 7 μ m. It is an important research subject for the development and application of vision inspection technology in micro- mechanical size ranging from submicrometer to 10mm.

Key words: vision metrology; MEMS; micro part inspection

作者简介: 王向军(1955-), 男, 哈尔滨市人, 现在天津大学精密仪器与光电子工程学院工作, 博士, 教授。1992年于英国留学回国, 主要研究方向为精密测试技术及仪器, 影像与视觉测量理论与技术。E- mail: xdocujw@public.tpt.tj.cn