

一种基于 Radon 变换的精密工作台 微位移和转动测量方法

姜歌东, 陶涛, 梅雪松, 袁渊浩

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对精密工作台微位移和转动测量问题, 提出一种基于平面正交光栅图像 Radon 变换的精密工作台位移测量方法. 构建了由平面正交光栅和显微摄像系统组成的测量实验台, 在不同实验条件下识别了平面正交光栅的栅线间距和角度, 进行了工作台运动测量实验. 实验结果证明, Radon 变换对噪声不敏感, 能很容易地识别出不同条件下平面正交光栅的倾角和位置, 可精确地测量工作台位移, 测量误差小于 $1\ \mu\text{m}$. 通过对现有系统测量分辨率的分析, 提出了取消相机镜头和适配镜、以 CCD 感光面直接接收放大的光栅图像来进一步提高测量系统分辨率的方案.

关键词: 平面正交光栅; Radon 变换; 位移测量

中图分类号: TB92 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)05-0031-05

Micro-Displacement and Rotation Measurement Method of Precision Worktable Based on Radon Transformation

JIANG Gedong, TAO Tao, MEI Xuesong, YUAN Yuanhao

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A measurement method based on the Radon transformation of plane orthogonal-grating image is proposed for measuring the micro-displacement and rotation of a precision worktable. A test table is constructed, which is mainly composed of micro-photography device and plane orthogonal-grating. The grating spaces and angles of the plane orthogonal-grating images are identified under different conditions, and the displacement experiment of the precision worktable is conducted. The experiment results show that Radon transformation is insensitive to measuring noise and the grating position and angles of plane orthogonal-grating image can be easily identified; the displacement of the worktable can be measured accurately, and the measuring error gets within $1\ \mu\text{m}$. By analyzing the resolution capacity of the current measuring system, the measuring system configuration for further enhancing precision is proposed, where the camera lens and adapter in micro-photography device become unnecessary, and the amplified grating image is directly received by CCD sensor.

Keywords: plane orthogonal-grating; Radon transformation; displacement measurement

精密工作台被广泛地应用于光刻机、扫描显微镜、微操作机械手等高精密设备中, 是保证高精密设备运动精度的关键部件. 如何实现精密工作台的多

自由度运动和定位精度测量, 是长期以来人们一直关心的问题. 目前, 常用的测量方法是激光法^[1-5]. 激光测量具有测量精度高、速度快的优点, 但是激光测

量系统结构复杂,体积庞大,价格昂贵,对温度很敏感,测量过程稳定性易受环境的影响。

随着 CCD 制造水平和图像识别技术的飞速发展,在需要重复、迅速地从图像中获取精确信息的场合,CCD 摄像和图像处理的测量和检测方法得到了大量应用。但是,现有的测量和检测大多用于精度要求不是很高的大尺寸物体的位移和角度测量^[6-7],对图像处理技术要求不高,而且在微位移高精度测量方面的研究比较少^[8-9]。文献[8]利用 CCD 图像和 Sobel 边缘检测技术,研究了基于图像处理技术的液压机夹头的位移测量方法。文献[9]研究了一种利用微动工作台上的两点标记,并由标记点图像提取重心、进行工作台微位移和转角测量的方法和系统,测量精度可达到 0.2 μm。但是,文献[10]研究了基于原子力显微镜(AFM)图像处理技术的纳米尺度位移测量问题。但是,文献[8]仅测量了夹头位移,而且位移的计算直接利用图像边缘线位置,因此误差较大。文献[9]所采用的 2 点标记法对于不同测量范围要选用不同尺寸的标记,测量过程非常麻烦。文献[10]虽然可以达到很高的位移测量精度,但由于是利用微力下的接触变形图像进行测量,因此不适合工作台位移的测量。

近年来,作为一种图像特征增强和提取方法,Radon 变换被成功地应用于强噪音下规则目标和空间目标姿态角的高精度识别问题^[11-14],如果能将 Radon 变换应用于正交光栅位置和角度的识别,则可以在一定程度上提高位置识别的准确性和精度。因此,本文提出了基于平面正交光栅图像 Radon 变换的精密工作台位移测量方法,研究了基于 Radon 变换的平面正交光栅栅线位置和角度的识别问题。

1 Radon 变换、正交光栅栅线位置及倾角识别

1.1 Radon 变换

Radon 变换是将原始图像通过线积分变换到另外一对参数域内,其表达式可以在任意维空间定义。在一维空间,二维空间图形的 Radon 变换可表示为

$$R_{\theta}(x)=\int_{-\infty}^{+\infty} f(x\cos\theta-y\sin\theta,x\sin\theta+y\cos\theta)dy$$

(1)

式中: x 、 y 是二维空间相互垂直的 2 个方向; θ 代表不同方向的角度。Radon 变换的结果是 $f(x,y)$ 在不同方向的点沿 y 方向积分。对于连续图像,上述变

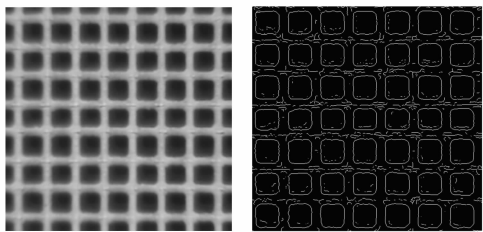
换将二维图像的线积分投影到 x 方向;对于离散图像,上述变换将图像沿某方向的像素相加,再投影到 x 方向。因此,Radon 变换的极值点与二维图形上的直线或线段相对应,如果将 Radon 变换表示为色度图,直线或线段越长,则对应点的亮度越大。

1.2 光栅栅线倾角及位置识别

从 CCD 得到的正交光栅图像必须首先经过预处理,才能够进行 Radon 变换。一般在 Radon 变换前的预处理包括原始图像的灰度化和边缘提取,灰度化是将原始的彩色图形转换为由 256 个灰度表示的黑白图像,边缘提取则是将灰度图像中的边缘用线表示出来。常用的边缘提取方法有 Robert、Sobel、LoG 和 Canny 算子等,在这些方法中 Canny 算子适应于阶跃性边缘的检测,而且对图形污染不敏的感能力很强,非常适合于不同材料和拍摄条件下的正交光栅图像处理。因此,本文采用 Canny 算子来实现边缘提取,边缘检测阈值选用 0.37。图 1a 为正交光栅图像,图 1b 为预处理后的光栅图像。

经过边缘提取的二维图形,在图形空间进行 Radon 变换。图 2 是光栅图像在 Radon 空间的色度图,图中 $\theta=90^{\circ}$ 的亮点(Radon 空间极值点)对应于原始光栅与 y 轴平行的各条直线, $\theta=0^{\circ}$ 的亮点(Radon 空间极值点)对应于原始光栅与 x 轴平行的各条直线(见图 3)。

从图 3 中可以看出,Radon 变换的极值点对应于光栅图像在 x 方向的栅线位置 P_x 。因此,由不同角度下的 Radon 变换就可以得到沿此方向 Radon 空间极值点随像素位置的变化关系,从而由 Radon



(a) 预处理前 (b) 预处理后

图 1 平面正交光栅的图像

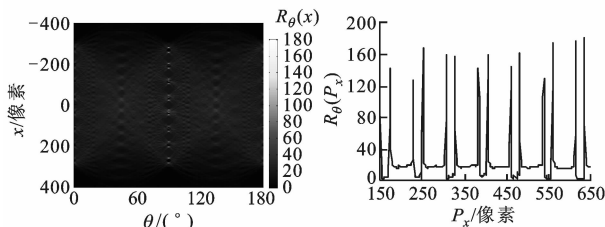


图 2 光栅图像的 Radon 变换 图 3 x 方向栅线的 Radon 变换

变换的极值点分布规律,可以很方便地识别光栅栅线角度和栅线位置、宽度信息.

2 测量系统实验台

测量系统的基本结构如图 4 所示,测量系统的实验台如图 5 所示,其中显微成像系统由显微物镜和 CCD 相机构成,显微物镜是上海永亨光学仪器制造有限公司生产的 53XC 型正置金相显微镜,CCD 采用了 Sony W5 和 Fine Pix S5000 相机.

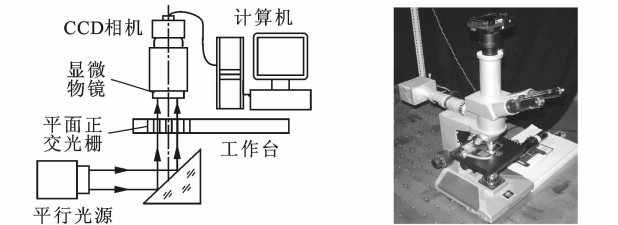


图 4 工作台微位移测量系统

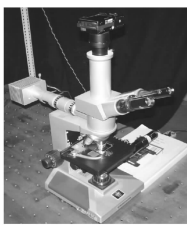


图 5 测量实验台

实验中使用的平面正交光栅是利用飞秒激光直接烧蚀加工的,光栅材料为玻璃和金属薄膜,具有较高的质量和精度.显微成像系统将光栅图像放大后成像于相机的面阵 CCD 上,工作台移动或转动时正交光栅在面阵 CCD 上的图像就会发生变化.在计算机中进行正交光栅图像的处理和栅线位置识别,得到了工作台的位移和转动角度.测量中正交光栅的运动由微位移工作台实现,光栅转动由手动完成.

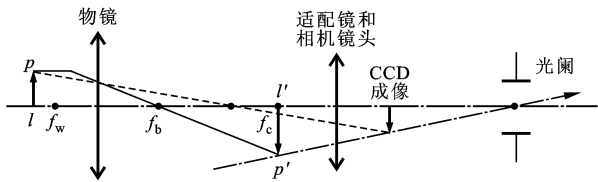
显微成像系统的光路原理如图 6 所示,其核心是显微物镜和面阵 CCD,另外在 CCD 与物镜之间还有适配镜和相机镜头.测量系统的最大分辨率 r 取决于 CCD 的像素尺寸 d_p 、适配镜与相机的综合放大倍数 M 以及显微物镜的放大倍数 β_{ob} ,即

表 1 光栅栅线角度和间距识别的实验条件及结果

组别	光栅材料	栅格/ μm	CCD 对 角线长度/ mm	CCD 感 光面/ $10^4 \times$ 像素	焦距 /mm	光焦度 / m^{-1}	β_{ob}	栅线角 度/ $(^\circ)$	栅格宽度/像素		栅格分辨率/ μm	
									x	y	x	y
1	金属	20×20	9.6	500	24	5.2	10	1	77	76	0.26	0.26
2	金属	20×20	9.6	500	24	5.2	10	61	77	78	0.26	0.26
3	金属	20×20	9.6	500	8 *	2.8	10	3	38	39	0.53	0.51
4	金属	20×20	9.6	500	24	5.2	40	1	150	147	0.13	0.14
5	金属	20×20	9.6	500	24	5.2	40	4	136	134	0.15	0.15
6	金属	20×20	9.6	500	24	5.2	40	4	193	189	0.10	0.11
7	玻璃	25×33	7.5	300	51	3.2	10	1	91	118	0.27	0.28
8	玻璃	40×50	7.5	300	57	3.2	10	4	117	149	0.34	0.34

*: 拍摄时对焦不佳.

$$r = d_p / M \beta_{ob} \tag{2}$$



f_w : 物镜前焦点; f_b : 物镜后焦点; p, l : 物距; p', l' : 像距;
 f_c : 适配镜和相机镜头的等效焦点

图 6 显微成像光路原理图

3 实验结果及分析

3.1 光栅图像栅线角度和间距识别

为了验证不同实验条件下用 Radon 变换实现平面正交光栅栅线角度和位移测量的可行性,在不同拍摄条件下,针对不同材料、不同栅距的平面正交光栅进行了栅线角度和间距的识别.表 1 列出了典型的 8 组实验条件和识别结果.

Radon 变换对噪声不敏感,能很容易地识别出各种不同情况下平面正交光栅图像的栅线倾角和每一条栅线的宽度、位置.对于不同方向的栅线宽度和位置,可以计算出以像素为单位的平均栅线宽度,进而计算出位移测量的分辨率.由于所采用的平面正交光栅具有较高的加工质量和尺寸位置精度,因此在实验中不考虑光栅加工尺寸和位置误差对测量结果的影响.从表 1 的识别结果中可以看出,在不同条件下,系统的位置分辨率在 $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 之间.对于栅距为 $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ 的金属光栅,在相同拍摄条件下(1、2 组与 4~6 组对比),显微物镜的放大倍数较大,则测量分辨率也较高.在相同放大倍数下(1、2 组与 3 组对比),对焦不准确时,则测量分辨率

就较低.在显微物镜放大倍数相同的情况下,采用不同材料和栅距的光栅(1、2组与7、8组对比),测量分辨率则相近.

由式(1)可以看出,现有测量实验系统的分辨率主要取决于 CCD 像素的大小、显微物镜放大倍数和适配镜与相机的综合放大倍数.由于所选择相机的 CCD 像素的大小相差不多(在 $3\text{ }\mu\text{m}$ 左右),测量中适配镜与相机的综合放大倍数基本保持不变(小于 1),因此系统的位移分辨率主要取决于显微物镜的放大倍数.显微物镜放大倍数最大可以到 100 倍,受技术限制,当像素为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 时,即是 CCD 像素大小的极限.因此,要进一步提高测量系统的分辨率,必须改进显微成像系统的结构.由于在现有的测量系统中,适配镜与相机的综合放大倍数总是小于 1,因此在改进方案中可以取消显微成像系统中的相机镜头和适配镜,将面阵 CCD 直接放置在显微放大系统的后端,使 CCD 感光面直接接收显微物镜放大后的光栅图像,这样就可以最大限度地发挥显微物镜和 CCD 的放大作用,提高测量系统的分辨率.

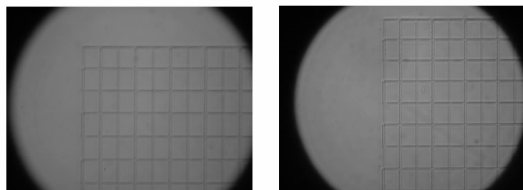
3.2 工作台运动测量

实验中采用平面正交的玻璃光栅, x 方向的栅距为 $25\text{ }\mu\text{m}$, y 方向的栅距为 $33\text{ }\mu\text{m}$,采用放大倍数为 10 倍的物镜.拍摄条件:焦距为 57 mm ,光焦度为 3.2 m^{-1} ,将工作台沿 x 方向正向运动 $40\text{ }\mu\text{m}$,再沿 y 方向正向运动 $40\text{ }\mu\text{m}$.

对图 7 的 2 幅图像先进行预处理,再作 Radon 变换,最后识别出各条栅线的位置.由各条栅线的位置可以计算出 x 方向的平均栅距为 34 像素, y 方向的平均栅距为 45 像素,因此可以得到 x 方向的分辨率为 $0.74\text{ }\mu\text{m}$, y 方向的分辨率为 $0.73\text{ }\mu\text{m}$.比较工作台运动前、后 y 方向最后的一组栅线位置,得到工作台在 y 方向正向运动了 54 像素(位移 $40.0\text{ }\mu\text{m}$).比较运动前、后 x 方向最开始的一组栅线位置,得到工作台在 x 方向正向运动了 55 像素,对应 $39.4\text{ }\mu\text{m}$.与工作台实际运动位移相比, x 、 y 方向的测量误差均小于 $1\text{ }\mu\text{m}$,因此测量系统具有较高的精度.

4 结 论

针对激光测量系统结构复杂、体积庞大、价格昂贵,以及对温度很敏感等缺陷,本文提出了一种基于平面正交光栅图像 Radon 变换的精密工作台位移和转动测量方法.通过实验研究发现,Radon 变换对噪声不敏感,可以很容易地识别出不同条件下平面



(a)工作台运动前 (b) 工作台运动后

图7 平面正交光栅图像

正交光栅图像的栅线倾角和栅线位置,能够精确地识别出工作台的位移,其测量误差小于 $1\text{ }\mu\text{m}$,证明了本文提出的基于 Radon 变换的精密工作台位移和角度测量方法的正确性.

从对实验结果的分析中发现,受适配镜与相机综合放大倍数的限制,现有的分辨率在 $0.1\sim 0.5\text{ }\mu\text{m}$ 之间,为进一步提高测量系统的分辨率,就必须改进测量系统的结构.本文提出了测量系统的改进方案,取消了相机镜头和适配镜,将面阵 CCD 直接放置在显微放大系统的后端,使 CCD 感光面能够直接接收物镜放大后的光栅图像,因此最大限度地发挥了显微物镜和 CCD 的放大作用,提高了测量系统的分辨率.

参考文献:

- [1] 吴鹰飞,周兆英.超精密定位工作台[J].微细加工技术,2002,41(2):41-47.
WU Yingfei, ZHOU Zhaoyin. Ultra precision stages [J]. Micro Fabrication Technology, 2002, 41(2): 41-47.
- [2] HOLMES M, HOCKENA R, TRUMPER D L. The long-range scanning stage: a novel platform for scanned-probe microscopy [J]. Precision Engineering, 2000, 24(1): 191-209.
- [3] KIM W J, TRUMPER D L. High-precision magnetic levitation stage for photolithography [J]. Precision Engineering, 1998, 22(2): 66-77.
- [4] KUO S K, SHAN X, MENQ C H. Large travel ultra precision $xy\theta$ motion control of a magnetic-suspension stage [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2003, 8(3): 334-341.
- [5] JUNG K S, BAE Y S. Study on a novel contact-free planar system using direct drive DC coils and permanent magnets [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2002, 7(2): 35-43.
- [6] 王庆有,蔡锐,马愈昭,等.采用面阵 CCD 对大尺寸轴径进行高精度测量的研究[J].光电工程,2003,30(6):36-38.

- WANG Qingyou, CAI Rui, MA Yuzhao, et al. A study on high-precision measurement of large-size axis diameter with array CCD [J]. Opto-Electronic Engineering, 2003, 30(6): 36-38.
- [7] 林逢春, 刘旭. 基于线阵列 CCD 的带转像棱镜的位置测量 [J]. 浙江大学学报, 2006, 40(6): 1089-1092.
LIN Fengchun, LIU Xu. Position measurement method based on linear array CCD with inverting prism [J]. Journal of Zhejiang University, 2006, 40(6): 1089-1092.
- [8] 李文炳, 冯平, 蔡增伸, 等. 基于数字图像处理的位移测量 [J]. 浙江工业大学学报, 2004, 32(6): 688-691.
LI Wenbing, FENG Ping, CAI Zengshen, et al. Displacement measuring based on digital image processing [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2004, 32(6): 688-691.
- [9] 吴鹰飞, 周兆英. 利用图像处理实现平面工作台三自由度位移的同步检测 [J]. 光学技术, 2002, 28(4): 326-328, 331.
WU Yingfei, ZHOU Zhaoying. Synchronous detection of $xy\theta$ displacements by image processing [J]. Optical Technique, 2002, 28(4): 326-328, 331.
- [10] CHANG S, WANG C S, XIONG C Y, et al. Nanoscale in-plane displacement evaluation by AFM scanning and digital image correlation processing [J]. Nanotechnology, 2005(6): 344-349.
- [11] GALIGEKERE R R, HOLDSWORTH D W. Moment patterns in the Radon space [J]. Optical Engineering, 2000, 39(4): 1088-1097.
- [12] LI J H, PAN Q, ZHANG H C, et al. Image recognition using Radon transform [C]//The IEEE 6th International Conference on Intelligent Transportation Systems—IV: Image Analysis. New York, USA: IEEE Computer Society, 2003: 741-745.
- [13] 孙东卫, 朱程辉. 基于 Radon 变换的倾斜车牌图像角度检测与校正 [J]. 微计算机应用, 2008, 29(2): 18-21.
SUN Dongwei, ZHU Chenghui. Skew angle detection of the vehicle license plate image and correct based on Radon transformation [J]. Microcomputer Applications, 2008, 29(2): 18-21.
- [14] 胡学朋, 王进祥, 刘松芬, 等. 三维倾角分布的 Radon 变换计算 [J]. 南开大学学报, 2006, 39(5): 1-5.
HU Xuepeng, WANG Jinxiang, LIU Songfen, et al. 3D dip distribution computed with Radon transformation [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis, 2006, 39(5): 1-5.

(编辑 管咏梅)