

基于数码相机莫尔效应的位移测量

易学锋^{1,2} 闫利¹

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(2 新疆大学建筑工程学院,乌鲁木齐市阿勒泰路 201 号,830008)

摘要:数码相机在拍摄与像素宽度相近的条纹时,像片上会出现莫尔条纹。针对数码相机莫尔效应的特点,选择了平行莫尔条纹,利用平行莫尔条纹的位移放大作用,可精确推算被摄条纹的微小移动。实验数据表明,100 m 的摄影物距仍然有很高的测量精度。

关键词:莫尔条纹;数码相机;相位差;位移测量

中图法分类号:P237.9; P234.1

众所周知,莫尔条纹技术具有位移高倍率的放大特性,可对位移进行准确的测量,这种技术已广泛用于机械加工、实验室、光电仪器设备中。随着数码相机的发展和普及,特别是图像传感器性能的大幅度提高,利用传感器的莫尔效应进行远距离高精度的位移测量已成为可能。

1 图像传感器莫尔条纹效应原理

当对准含有竖直条纹的平面拍摄时,投影到传感器上的条纹影像与传感器像元叠加。图 1 是传感器上某行像元与影像条纹的叠加图,像元与亮纹的重叠度决定了该像元的灰度值(感光量),显然灰度值在像元序号方向呈周期变化。根据像元的灰度值和序号,分别将单数序号像元与双数序号像元展绘到坐标系中,形成两条曲线,它们类似于正弦曲线,并且相位相差约 180° 。将相邻行的灰度峰值和谷值相连就形成平行莫尔条纹^[2](图 2),曲线的波长 λ_3 就是莫尔条纹的宽度。

2 被摄目标位移测量

2.1 目标移动与影像移动的关系

设标志条纹的栅距为 λ_0 ,投影在传感器上的影像条纹栅距为 λ_1 ,显然,目标移动 λ_0 ,影像就会移动 λ_1 ,若目标移动了 S_0 ,对应影像移动了 S_1 。

由透镜成像原理可知:

$$\begin{aligned}\lambda_0/\lambda_1 &= S_0/S_1 = D/f \\ S_0/\lambda_0 &= S_1/\lambda_1 = \chi\end{aligned}\quad (1)$$

式中, D 为物距; f 为镜头焦距。可以将 λ_0 与 λ_1 看作是目标条纹和影像条纹的波长, χ 就是其移动的周期数量,简称周期数。

2.2 条纹影像的移动与莫尔条纹移动的关系

观察图 1,像元 5 与亮纹⑥ 完全重叠,所以像元 5 的灰度值最大(峰值)。若影像条纹向右移动 $\lambda_1/2$,则暗纹⑤ 将移到像元 5 处与其叠加,此时,像元 5 的灰度值变为最小(谷值)。条纹再右移 $\lambda_1/2$,亮纹④ 将移到像元 5 上,其灰度值又最大(峰值)。所有的像元点灰度值都有同样的周期变化,当影像条纹移动了一波长 λ_1 ,相应曲线也移动了 λ_3 。设影像条纹移动 S_1 ,对应的曲线移动 S_3 ,有:

$$\begin{aligned}S_3/S_1 &= \lambda_3/\lambda_1 \\ S_3/\lambda_3 &= S_1/\lambda_1\end{aligned}\quad (2)$$

莫尔条纹与正弦曲线是相对应的,正弦曲线的移动就是莫尔条纹的移动。正弦曲线在横坐标上的位置可以用相位 φ 表示,正弦曲线移动前的相位 φ^1 减去移动后的相位 φ^2 得到 $\Delta\varphi$, $\Delta\varphi$ 就是正弦曲线用相位表示的移动量,与 S_3 的关系为:

$$\Delta\varphi/2\pi = S_3/\lambda_3\quad (3)$$

参照式(1)、式(2),有:

$$\Delta\varphi/2\pi = S_3/\lambda_3 = S_1/\lambda_1 = S_0/\lambda_0 = \kappa\quad (4)$$

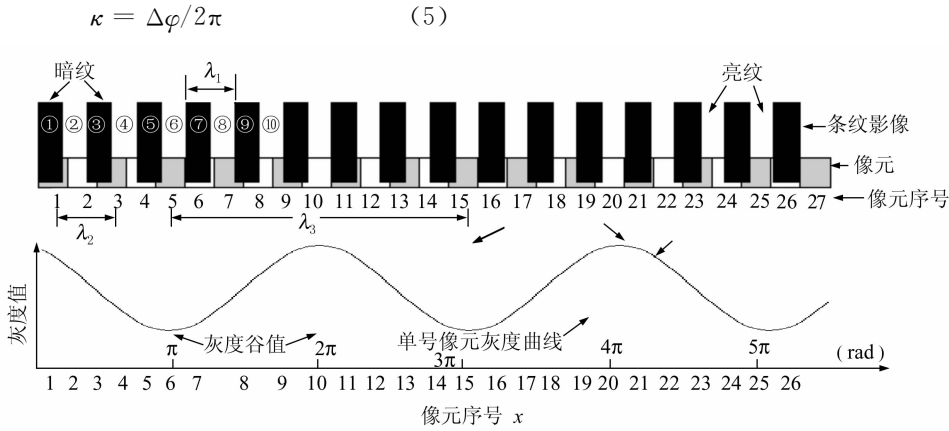


图 1 条纹与像元叠加图及其灰度曲线

Fig. 1 Stripes and Pixel Overlapped Figure and Gray Curve

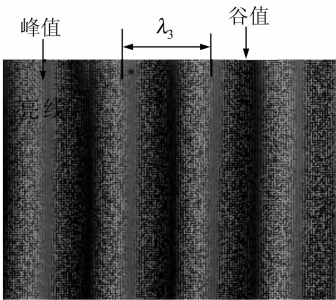


图 2 莫尔条纹影像

Fig. 2 Moire Fringe Image

$$S_0 = \kappa \lambda_0 \tag{6}$$

从式(4)~式(6)可以看出,目标条纹、影像条纹、莫尔条纹三者的移动周期数是相等的,只要用莫尔条纹的正弦曲线求出移动周期数 κ ,就能算出目标的移动距离 S_0 。

2.3 目标移动量的计算

保持相机静止,在条纹标志移动前拍摄像片 1,移动后拍摄像片 2,提取像片 1 的第 j 行像元的灰度值 $j_1 \{ (1, I_1^1), (2, I_2^1), \dots, (n, I_n^1) \}$, I 表示灰度值,上脚标 1 表示像片 1 的数据, $1 \sim n$ 是像元的序号。将每个像元数据代入下式:

$$I_x^1 = A^1 \sin(\omega^1 x + \varphi^1) + C^1 \tag{7}$$

式中, x 为像元序列号; $\omega^1 = 2\pi/\lambda_3$ 为角频率; A^1 为莫尔条纹的灰度振幅(反差); φ^1 为相位; C^1 为平均灰度值。其中, A^1 、 ω^1 、 φ^1 、 C^1 是待求参数,当方程数超过 4 个时,式(7)就变为误差方程:

$$V_x = A^1 \sin(\omega^1 x + \varphi^1) + C^1 - I_x^1 \tag{8}$$

列出 j 行的所有像元的误差方程,用最小二乘法算出参数。同理算出像片 2 第 j 行的参数 A^2 、 ω^2 、 φ^2 、 C^2 ,像片 1 第 j 行莫尔条纹与像片 2 第 j 行莫尔条纹的相位差为:

$$\Delta\varphi_j = \varphi^2 - \varphi^1$$

由于每行像元有单号像元与双号像元两条正弦曲线(图 1),一行像元可算两个相位差 $\Delta\varphi_j^O$ 和 $\Delta\varphi_j^E$,如果莫尔条纹区域有 M 行像元,最终的相位差是它们的平均值:

$$\Delta\varphi = \frac{1}{2M} \sum_{j=1}^M (\Delta\varphi_j^O + \Delta\varphi_j^E) \tag{9}$$

根据式(5)、式(6)可算出目标的移动量 S_0 。

3 实验结果

分别对 10 m、50 m、100 m 远的摄影目标进行测试,实验相机采用佳能 EOS350D 单反数码相机,镜头为 EF 50 mm F1.4 USM,脚架也是普通的摄影三脚架,设备总值 6 000 元。

1) 10 m 测试

在制作条纹标志时,为产生莫尔条纹,标志上的条纹宽度(栅距)应该根据相机的像元尺寸(本相机为 $6.4 \mu\text{m}$)和相机与目标的距离计算,即条纹宽为 $\lambda_0 = 2 \times \frac{10 \text{ m}}{50 \text{ mm}} \times 6.4 \mu\text{m} = 2.56 \text{ mm}$,其中,10 m 为相机与标志的间距,50 mm 为镜头的焦距。将设计好的条纹图像用打印机打出,粘贴到硬板上,这就是条纹标志板。将标志板与电子游标卡尺上的游标固连起来,而电子游标卡尺的主尺又与一厚重的木板固连(图 3)。当移动游标时,标志板也随着移动,从卡尺的屏幕上可读取标志的名义移动量。

拍照在室外进行,保持相机稳定,在标志移动前后各拍一张像片,拍照时,目测相机摄影轴与标志面垂直、标志条纹与相机列像元平行。数据处理时,先从像片上截取条纹区域,本次从像片上截取的条纹区域大小为 200 行 \times 100 列,每行有两条正弦曲线,一张像片上 200 行像元共有 $200 \times 2 =$

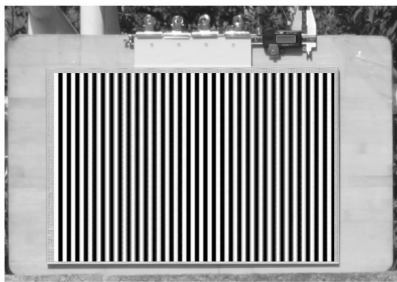


图 3 条纹平板
Fig. 3 Stripes Flat

表 1 相位差的分布/10 m

Tab. 1 Distribution of Phase Difference

相位差范围/rad	1.66~1.67	1.67~1.68	1.68~1.69	1.69~1.70	1.70~1.71	1.71~1.72	1.72~1.73	1.73~1.74
数量	9	29	61	100	113	55	21	12

2) 50 m 测试

莫尔条纹图像大小为 40 行×66 列,有 40×2=80 个相位差,目标条纹宽 $\lambda_0=12.8\text{ mm}$,名义位移量用普通直尺测得(与 10 m 测试不同),相位差分布(表 2)及其相应的结果如下:相位差中误差(rad) $\sigma=\pm 0.027\ 6$;位移测量值中误差 $\sigma_s=\sigma/2\pi\times\lambda_0=\pm 0.055\text{ mm}$;相位差平均值(rad) $\Delta\varphi=0.476\ 7$;位移测量值均值 $S_0=0.971\ 0\text{ mm}$;名义位移量 $S'_0=1.0\pm 0.14\text{ mm}$ 。

3) 100 m 测试

莫尔纹图像的大小为 24 行×33 列,目标条纹宽 $\lambda_0=25.6\text{ mm}$,名义位移量用普通直尺测得,48 个相位差分布(表 3)及其相应结果如下:相位差中误差(rad) $\sigma=\pm 0.023\ 6$;位移测量值中误差 $\sigma_s=\sigma/2\pi\times\lambda_0=\pm 0.096\text{ mm}$;相位差平均值(rad) $\Delta\varphi=0.275\ 3$;位移测量值均值 $S_0=1.121\ 7\text{ mm}$;名义位移量 $S'_0=1.0\pm 0.14\text{ mm}$ 。

表 2 相位差的分布/50 m

Tab. 2 Distribution of Phase Difference

相位差范围/rad	0.40~0.41	0.41~0.42	0.42~0.43	0.43~0.44	0.44~0.45	0.45~0.46	0.46~0.47	0.47~0.48	0.48~0.49	0.49~0.50	0.50~0.51	0.51~0.52	0.52~0.53	0.52~0.53
数量	1	0	3	3	6	9	9	20	4	8	4	8	3	2

表 3 相位差的分布/100 m

Tab. 3 Distribution of Phase Difference

相位差范围/rad	0.19~0.22	0.22~0.23	0.23~0.24	0.24~0.25	0.25~0.26	0.26~0.27	0.27~0.28	0.28~0.29	0.29~0.30	0.30~0.31	0.31~0.32	0.32~0.33
数量	1	1	1	2	4	8	11	10	3	4	2	1

4 结 语

常规的莫尔条纹测量位移的方法是将两个实物光栅紧密地叠加在一起(零距离),采用动态转角莫尔条纹,主要应用于仪器设备内两物件相对位移的测量。本文提出的方法是将两个实物光栅(目标和感光像元)分开(1~100 m),使用的是静态平行莫尔条纹。

用数码相机的莫尔条纹测位移,精度是相当高的,究其原因,主要是传感器感应光的能力达到了 12 位(4 096 阶)^[3],感光误差中的大部分系统

噪声在计算相位差时被抵消,许多随机噪声在正弦函数拟合、相位差平均值的计算中被滤掉。传感器感光能力与相机档次成正比,由于佳能 EOS350D(800 万像素)是低端的数码单反相机,所以绝大多数型号的单反数码相机都能进行精密位移测量。目前,几乎所有的单反数码相机都有遥控功能和计算机操控功能,这就容易实现位移测量的自动化。卓越的测量精度与低廉的仪器设备,使本方法具有较高的性价比,这为本方法在变形观测、实验力学、工业测量等领域中的应用提供了保证。

参 考 文 献

- [1] 何春娟,刘绒霞,曹磊. 莫尔条纹技术在微小位移测量中的应用[J]. 西安工业学院学报,2005,25(6): 565-567

[2] 冯文灏. 工业测量[J]. 武汉:武汉大学出版社,2004

[3] 王亲友. 图像传感器应用技术[J]. 北京:电子工业出版社,2006

[4] 冯文灏. 工业测量方法及其选用的基本原则[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2001,26(4):332-335
- [5] 郭际明,梅文胜,张正禄,等. 测量机器人系统构成与精度研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2000,25(5):421-425

[6] Kafri O,Glatt I. Moire Deflectometry: A Ray Deflection Approach to Optical Testing[J]. Opt Eng, 1985,24(5):944-965
- 第一作者简介:易学锋,副教授,博士生. 现从事近景摄影测量方面的研究.

E-mail:yi4xue1feng1@163.com

Displacement Measurement Based on Moiré Effect of Digital Camera

YI Xuefeng^{1,2} YAN Li¹

(1 School of Geodesy and Geomatics,Wuhan University,129 Luoyu Road,Wuhan 430079,China)
(2 College of Architectural Engineering,Xinjiang University,201 Aletai Road,Urumqi 830008,China)

Abstract: Moiré fringe appears in photos when the stripes with the width similar to the pixel of digital cameras are shot. Considering Moiré effect of digital camera, we select parallel Moiré fringe. With the displacement amplification of parallel Moiré fringes, tiny movement of stripes can be calculated precisely. We expounded its calculating methods in this paper. Experimental results show that a high precision can be guaranteed within 100 m.

Key words: Moiré fringe ;digital camera;phase difference;replacement measurement

About the first author: YI Xuefeng, associate professor, Ph. D candidate, majors in close range photogrammetry.
E-mail: yi4xue1feng1@163.com

2009 中国卫星导航定位技术论坛
“卫星导航定位系统——创新与应用”会议通知

“2009 中国卫星导航定位技术论坛”北京,2009 年 8 月 7 日~9 日在国家科技部的大力支持下,依托 CPGPS(全球华人定位导航协会)论坛的良好基础,对论坛主题进行了扩大、扩容,专题设置涵盖卫星导航系统设计与研究、终端设计与研发、典型行业应用研究、多学科交叉科学研究等,力求为国内外卫星导航科技工作者、产业界提供一个新技术、新方法和新应用的交流平台,让国内外的科技人员探讨国际导航定位领域的前沿技术和发展动态,让海内外学者了解国内导航定位技术的发展状况和最新成果;加强国内卫星导航产业界与科技界交流互动,加强这一领域全球华人的交流与联系,共同探讨我国卫星导航系统的技术发展和应用前景,勾画卫星定位技术发展蓝图,推动卫星导航技术进步与产业发展。

会议热诚地欢迎您提交原创的英文或者中文论文,在递交全文前,请先提交详细摘要,字数控制在 300~800 字。请用 Word 文档排版,以电子文档投稿至 shi@whu.edu.cn, hpzhang@whu.edu.cn 和 y.feng@qut.edu.cn,摘要截止日期为 2009 年 5 月 1 日。

摘要必须包含以下信息:

- 论文题目、作者姓名(姓放在前面)和报告人姓名(加下划线);
- 作者的联系方式(单位、部门、详细地址、电话、传真和电子邮件)。

2009 年 6 月 1 日之前提交论文全文,经过专家的严格审阅,被录用的文章将在国内 EI 检索期刊上刊载。